

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Carbon Composites

Eigenschaftsprofil von Carbonfasergelegen und deren Wirkzusammenhänge in der automobilen Großserienproduktion

Christian Heinrich Jakob Koch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich

Die Dissertation wurde am 09.01.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.08.2020 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München
Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092
Fax: +49 (0) 89 / 289 – 15097
E-Mail: info@lcc.mw.tum.de
Web: www.lcc.mw.tum.de

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group im Bereich Technologie CFK im Werk Landshut.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler, Leiter des Lehrstuhls für Carbon Composites der Technischen Universität München, gilt mein besonderer Dank für die Betreuung dieser Arbeit. Herzlichst möchte ich mich für das Vertrauen und die Handlungsfreiräume, sowie die wertvollen Hinweise und Denkanstöße in unseren gemeinsamen Gesprächen bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich danke ich für die Übernahme des Korreferats und besonders für die eingehende Durchsicht meiner Dissertationsschrift, sowie für die äußerst konstruktive Diskussion meiner Arbeit, die mir manche neue Perspektive eröffnete. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl danke ich herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großes Dankeschön möchte ich allen Mitarbeitern am LCC aussprechen, die immer für einen fachlichen Austausch bereitstanden, sowie zu jeder Zeit ein offenes Ohr und tatkräftige Unterstützung für mich hatten. Stellvertretend seien hier Dr. Elisabeth Ladstätter und Dr.-Ing. Swen Zarembo genannt.

Besonderer Dank gilt vor allem auch meinem Betreuer auf Seiten der BMW AG Herrn Dr.-Ing. Jochen Töpker. Er hat mir nicht nur großartigen methodischen Input geliefert, zur rechten Zeit wichtige Impulse gegeben, sondern auch den Zugang zu spannenden, herausfordernden und verantwortungsvollen Aufgaben im Unternehmen ermöglicht. Vielen Dank dafür. Großen Dank auch an Dr.-Ing. Thomas Maurer für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Hinweise.

Insbesondere möchte ich mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanken die durch Ihren hervorragenden fachlichen Input in einer spannenden und herausfordernden Zeit maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend für das gesamte „Material-Team“ möchte ich Franz Maidl, Joerg Baderschneider und vor allem auch Prof. Dr. Simon Bickerton (University of Auckland) nennen, der mir in seiner Zeit in Landshut und darüber hinaus immer mit seiner herausragenden Expertise und wertvollen Denkanstößen zur Seite stand. Danke für die unzähligen Stunden.

Bedanken möchte ich mich auch bei Daniel Beermann für seine präzise Akribie und unendliche Geduld bei der eingehenden, formalen Durchsicht meiner Arbeit. Weiterhin danke ich allen Praktikanten, Studien- und Diplomarbeitern, die durch ihre Untersuchungen und ihr persönliches Engagement diese Arbeit mitgestaltet haben.

Schließlich danke ich ganz herzlich meinen Eltern, meiner Frau Elfi und meiner Tochter Franziska, die mit sehr viel Geduld und großem Verständnis zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Langquaid, im Dezember 2020

Christian Koch

KURZFASSUNG

Faserverbundwerkstoffe (FVK) haben sich aufgrund ihrer spezifischen mechanischen Eigenschaften als Konstruktionswerkstoff für Leichtbauanwendungen etabliert. Im Automobil bieten insbesondere Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) die Möglichkeit zur Gewichtsreduktion, welche vor allem bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen von großem Interesse ist. Hohe Herstellkosten u. a. verhindern aktuell den flächendeckenden Einsatz von CFK in der Automobilindustrie. Die Anwendungen beschränken sich punktuell auf ausgewählte Fahrzeugkomponenten und vereinzelt auf vollständige Fahrgastzellen.

Ein Verfahren zur Herstellung von CFK-Strukturbauteilen ist das RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding). Dabei werden trockene textile Halbzeuge, hauptsächlich Carbonfasergelege (Carbon Fiber Non-Crimp Fabric, CF-NCF), zunächst lastpfadgerecht aufgebaut, automatisiert umgeformt und anschließend z. B. mit Epoxidmatrix unter Hochdruck imprägniert (HD-RTM). In Kombination mit den großflächig herstellbaren CF-NCF bietet dieses Produktionssystem die Möglichkeit, die Fahrzeugvolumen einer automobilen Großserienproduktion in der notwendigen Taktzeit, der geforderten Qualität und zu tragfähigen Kosten zu realisieren.

Damit die Industrialisierung von CFK-Fahrzeugkomponenten weiter vorangeht, muss den bestehenden wirtschaftlichen und produktionstechnischen Herausforderungen konsequent begegnet werden. Ein Hauptfaktor ist die Sicherstellung von robusten Produktionsprozessen als Voraussetzung für eine kosteneffiziente, automatisierte Faserverbundproduktion.

Das Verständnis der Wirkzusammenhänge der eingesetzten Werkstoffverfahrenskombination, CF-NCF und RTM, entlang der Wertschöpfung (Gelege – Stack – Preform – RTM) ist der Schlüsselparame-ter, um dieses Ziel zu erreichen und der Fokus der vorliegenden Arbeit. Mit der Identifikation der verarbeitungsrelevanten Produkteigenschaften der CF-NCF gelingt die Korrelation zu den textilen und prozesstechnischen Stellgrößen, die die Bauteilqualität beeinflussen. Dies eröffnet die Möglichkeit, Toleranzen zu definieren und die einzelnen Prozessschritte dieses generativen Herstellprozess aufeinander abzustimmen.

Im Rahmen der Untersuchungen werden als relevante Materialeigenschaften vorrangig die Durchlässigkeit (Permeabilität) und die Strukturstabilität (Kompaktierungsverhalten) der eingesetzten Halbzeuge erkannt. Sie beeinflussen signifikant die Formfüllung bei der Hochdruckinjektion und damit die erzielbare Bauteilgüte der CFK-Komponenten. Um die „Stellhebel“ zur Produkt- und Prozessmodifikation zu identifizieren, werden umfangreiche Studien mit unterschiedlichen Gelegetypen und Verarbeitungsparametern durchgeführt. Als Lösungswerkzeug wird ein Qualifizierungsprogramm erarbeitet, welches geeignet ist, die Imprägniereigenschaften von CF-NCF schrittweise zu bewerten: Den Ausgangspunkt bildet die optische Analyse der

textilen Struktur, gefolgt von der Bestimmung der korrespondierenden Permeabilität und der Kompaktierungseigenschaften der Halbzeuge. Daran anknüpfend folgt die Bewertung im ebenen, zweidimensionalen RTM-Fließkanal. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in einem dritten Schritt an einem dreidimensionalen, serienäquivalenten Versuchsträger (HD-RTM) validiert und verifiziert.

Somit ist eine Bewertungsgrundlage geschaffen, die es erlaubt die Wirkmechanismen von CF-NCF, welche die Imprägniereigenschaften beeinflussen, zu evaluieren. Es wird deutlich, dass sich Permeabilität und Kompaktierungsverhalten der CF-NCF gezielt durch die textile Architektur sowie die Prozessführung beim Umformen und Imprägnieren variieren lassen. Dies eröffnet die Möglichkeit, das Eigenschaftsprofil der CF-NCF in der automobilen Serienproduktion zielgerichtet zu konfigurieren und die Bauteilqualität zu verbessern.

ABSTRACT

Fiber-reinforced plastics have established themselves as a construction material for lightweight applications due to their specific mechanical properties. In automotive application, carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in particular, offer the possibility of weight reduction, which is important in electrical-powered vehicles. The high cost of production limits the application of CFRP in automotive industry to specific vehicle components and individual passenger cells.

These components are mainly realized using a complex, automated RTM (Resin Transfer Molding) process. The automated conversion of dry textile semi-finished products (primarily carbon fiber non-crimped fabrics (CF-NCF) and the subsequent high-pressure injection with an epoxy matrix (HP-RTM), represents the baseline for the number and the quality of parts required at an industrial volume scale. This enables the use in automotive mass production at sustainable costs.

For further development of CFRP industrialization, it is necessary to continue to meet existing challenges to cost, production and technology consistently. A main factor in this context is to ensure robust manufacturing processes as a prerequisite for cost efficient and automated composite production.

The understanding of the – so-called "cause and effect relationships" – of the materials used and their interaction with the manufacturing processes is highly important to achieve this goal. Only the identification of the relevant product properties, and the avoidance of interference, will effectively manage the correlation to the significant control variables, which influence the generative manufacturing process. This forms the basis for process optimization, definition of the processing window, and finally the establishment of tolerances to ensure consistent component quality.

For the automated high-pressure RTM-process, the main material parameters are the permeability and compaction behavior of the CF-NCF used. All these factors can be influenced by the textile architecture and the used process parameters while preforming and injection. These factors themselves influence the achievable quality of the CFRP component.

In the experiments introduced in this thesis, different textile structures are examined regarding their injection capacity. A qualification program is generated, that, starting from the analysis of the global textile structure, utilizing the corresponding permeability (in lateral and transverse direction) and the compaction behavior of these materials, shows their influence to a high-pressure inplane RTM injection (2D-HP-RTM). Furthermore, the relevant manufacturing parameters at preforming and injection are investigated utilizing the introduced qualification logic. Finally, the obtained results are verified in an industrially relevant high-pressure RTM process (3D-HP-RTM), demonstrating the correlation from textile architecture to filling behavior using a serial equivalent injection mold.

This provides a basis for assessing the “Cause and Effect relationships” of CF-NCF in automotive serial production and to optimize their characteristics profile to improve parts quality.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Nomenklatur	xi
Abkürzungsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxiii
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung in die Problemstellung	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise	6
2 Vorgaben, Ausgangsbasis und Stand der Technik.....	9
2.1 Darstellung der vorliegenden Prozesskette und Definition der Vorgaben.....	9
2.1.1 Unidirektionales C-Faserbasiertes Gelege und Multidirektionaler Stack	11
2.1.2 Stackprozess	15
2.1.3 Preformprozess	16
2.1.4 Resin Transfer Molding (RTM)	18
2.1.5 Fazit: Randbedingungen und Vorgaben	21
2.2 Ausgangsbasis und Imprägniermechanismen von textilen Halbzeugen	24
2.2.1 Die makroskopische Betrachtungsweise	26
2.2.2 Die meso- und mikroskopische Betrachtungsweise	30
2.2.3 Das Kompaktierungsverhalten	33
2.2.4 Fazit: Bekannte Einflussgrößen auf die Imprägnierung	34
2.3 Stellgrößen und Prüfmethode zur Bewertung von C-Faserbasierten Gelegen	36
2.3.1 Bekannte Stellgrößen.....	36
2.3.2 Bekannte Prüfmethode	38
2.3.3 Fazit: Stand der Technik.....	43

3	Materialien und Methoden	45
3.1	Verwendete Materialien	45
3.1.1	C-Faser, CF-NCF und Stack	45
3.1.2	Harzsystem.....	49
3.2	Eingesetzte Prüfmethode.....	50
3.2.1	Versuchsaufbauten	51
3.2.2	Imprägnierwerkzeuge	60
3.2.3	Fazit: Qualifizierungslogik	65
4	Analyse der eingesetzten Halbzeuge.....	67
4.1	Bewertung der textilen Architektur (UD-NCF)	67
4.1.1	Analyse der Fließkanalgeometrie	67
4.1.2	Fazit: textile Architektur (UD-NCF)	99
4.2	Bewertung des Lagenaufbaus (MD-Stacks).....	101
4.2.1	Einfluss der Lagenanzahl.....	101
4.2.2	Lagenaufbau und Nesting	105
4.2.3	Fazit: Lagenaufbau (MD-Stack)	114
5	Interaktion mit den Verarbeitungsprozessen Preform und RTM.....	117
5.1	Wirkzusammenhänge beim Binderpreformen	117
5.1.1	Einfluss des Bindersystems.....	118
5.1.2	Einfluss der Prozessführung beim Preformen.....	123
5.2	Spaltinjektion im RTM-Prozess	129
5.3	Fazit: Prozessführung Preform und RTM	132
6	Kombinatorik der Einzeleffekte und Validierung im HD-RTM.....	135
7	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	149
A	Anhang	161
a	Datenblätter der verwendeten Materialien	161
b	Weiterführende Abbildungen.....	167
c	Experimentelle Daten.....	175
B	Veröffentlichungen.....	181
C	Betreute studentische Arbeiten	183

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben:

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m ²	Fläche
A _{BT}	m ²	Querschnitt eines Bauteils
A _{sample}	m ²	Fläche der Probe
a, b, c	-	Parametrierung
b	m	Breite
B _x , B _{comp}	-	B-Parameter, Steigung einer Exponentialfunktion
B _{PFT}	N/°	Kraftanstieg über der Verscherung beim PFT
d _{130kPa}	mm	Nennstärke eines Textils bei 130 kPa
d _i	m	Innendurchmesser
d _o	m	Außendurchmesser (engl.: out)
dtex	g/1 E4 m	Garnfeinheit, Dezitex
F	N	Kraft
F _{Peel}	N	Peel-Kraft, Abzugskraft
FF	kg/m ³	Füllungsfaktor einer Platteninjektion
FF _{oben, unten}	m	Fließfrontfortschritt auf der Ober- oder Unterseite einer Platteninjektion
FV _{OU}	%	Fließfrontverhältnis Ober- und Unterseite einer ebenen Platteninjektion
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
K	m ²	Permeabilitätstensor
K ₁ , K ₂	m ²	Permeabilität in Haupt- und Nebenrichtung
K ₁₂	m ²	durchschnittliche ebene Permeabilität
K ₃	m ²	Permeabilität in transversaler Richtung
K _{rr}	m ²	radiale Permeabilität
k, K	-	Faktor 1000
l	m	Länge
l _{BT}	m	Längenabmaß eines Bauteils
m _{abs}	kg	injizierte, absolute Schussmenge
p	Pa	Druck
p _{mold}	Pa	Druck innerhalb des Werkzeugs
p _∞	Pa	Umgebungsdruck
Q	m ³ /s	Austragsleistung
Q _{fluid}	m ³ /s	Volumenstrom eines Fluids

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
r	m	Radius
r_c	m	hydraulischer Radius
T, T_∞, T_0	°C	Temperatur, Umgebungstemperatur, absoluter Nullpunkt
$T_{\text{mold}}, T_{\text{fluid}}$	°C	Temperatur in der Werkzeugkavität (engl.: mold), Fluidtemperatur (Matrix)
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
T_t	tex	Titer
t	s	Zeit
t_{sample}	m	Dicke einer Probe
t_{flow}	s	Zeitdauer einer Fluidströmung
tex	g/1 E3 m	Garnfeinheit, sog. Tex
V_{BT}	m ³	Volumen eines Bauteils
$V_f, V_{f,\text{tar}}$	-	Faservolumengehalt und angestrebter Zielfaservolumengehalt
V_{fluid}	m ³	Volumen eines strömenden Fluids
v	m/s	Geschwindigkeit
x	m	Weg
x_b	m	Durchbiegung

Griechische Buchstaben:

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Δ	-	Delta, Differenz
ρ	kg/m ³	Dichte
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	kg/m ³	Dichte von Wasser
μ	Pas	dynamische Viskosität
μ_∞, μ_0	Pas	dynamische Viskosität bei Umgebungstemperatur, bei T_0
\dot{I}_i	-	Stöchiometrischer Koeffizient eines Reaktionspartners i
Φ	-	Porosität
$\sigma, \sigma_{\text{tar}}, \sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{rel}}$	Pa	Spannung, Spannung bei Zielfaservolumengehalt, max. erreichte Spannung, Relaxierungsspannung
τ	N/mm ²	Schubspannung
ϑ_c	°	Kontaktwinkel
∇	-	Differentialoperator Nabla

Indizes:

Formelzeichen	Bezeichnung
1, 2, 3	Richtung entsprechend kartesischem Koordinatensystem
aus	am Auslass einer Injektionsstrecke
BT	ein Bauteil betreffend
c	die Kapillare betreffend
ein	am Eingang einer Injektionsstrecke
fluid	das Fluid betreffend
FK	Fließkanal
FVF	Faservolumengehalt (Fiber Volume Fraction)
G	Gas
i	Laufvariable
L	flüssig (engl.: liquid)
min	minimal auftretend
max	maximal auftretend
mold	die Kavität betreffend
S	fest (engl.: solid)
s	symmetrisch
sample	die Probe betreffend
rr	radialer Haupttensor
tar	bei Zielfaservolumengehalt (engl.: target)
x, y, z	kartesische Koordinaten
xx, yy, zz	Haupttensorrichtung

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
2D, 3D	zwei- bzw. dreidimensional
Abk.	Abkürzung
BMW	Bayerische Motoren Werke AG
BMC	Bulk Molding Compound
CF-NCF	carbonfaserverstärktes Gelege (engl.: Carbon Fiber Non-Crimp Fabric)
C-Faser	Kohlenstofffaser (engl.: Carbon Fiber)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter (carbonfaserverstärkter) Kunststoff
COV	Variationskoeffizient (engl.: Coefficient of Varianz)
etc.	et cetera
dpi	dots per inch
DOE	Design of Experiments
FFT	Fast Fourier Transformation
FGW	Flächengewicht
FK	Fließkanal
FKB	Fließkanalbreite eines NCF
FKD	Fließkanaldurchgängigkeit eines NCF
FVB	Faserverbund
FVG / FVF	Faservolumengehalt (engl.: Fiber Volume Fraction)
FVK	faserverstärkter Kunststoff
GB	Legebarre
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
ggü.	gegenüber
GMT	glasmattenverstärkte Thermoplaste
HD	Hochdruck (engl.: High Pressure)
HSS	Schnellarbeitsstahl (engl.: High Speed Steel)
i. O.	in Ordnung
Kap.	Kapitel
Kfz	Kraftfahrzeug
l.	links
LCCM	Liquid Composites Compression Molding, Nasspressen
LCM	Liquid Composite Molding
LFT	langfaserverstärkte Thermoplaste
Lkw	Lastkraftwagen
MD	multidirektional
MD-NCF	multidirektionales Gelege
MSA	Messsystemanalyse
MPUL	Masse je Längeneinheit, hier je 1 m (engl. Mass Per Unit Length)

Abkürzung	Beschreibung
MR	Maschenreihe
MRC	Mitsubishi Rayon Co. Ltd.
MS	Maschenstäbchen
MSP	MRC-SGL Precursor Co. Ltd.
MW	Mittelwert
ND	Niederdruck
NCF	Gelege (Non-Crimp Fabric)
n. i. O.	nicht in Ordnung
o.	oben
o. g.	oben genannt
OT	Oberteil
OTSU	Schwellenwertermittlungsverfahren nach Nobuyuki Otsu
p. a.	per annum
PAN	Polyacrylnitril
PNG	Grafikformat (engl.: portable network graphics)
Pkw	Personenkraftwagen
PW	Plattenwerkzeug
QI	quasiisotrop
R	Rapport
r.	rechts
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Molding
SGL	SGL Carbon SE bzw. SGL Group
SGL-ACF	SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG
SMC	Sheet Molding Compound
s. o.	siehe oben
sog.	sogenannt(e)
TFP	Tailored Fiber Placement
u.	unten
u. a.	unter anderen
UD	unidirektional
UD-NCF	unidirektionales Gelege
UPM	universelle Prüfmaschine
UT	Unterteil
u. v. m.	und viele(s) mehr
v. o. n. u.	von oben nach unten
VP	Versuchspunkt
WZG	Werkzeug
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Fertigungsverfahren von FVK abhängig von Stückzahl und Automatisierungsgrad in Anlehnung an [20].	2
Abb. 1-2: Fahrzeugarchitektur des BMW i8: das Life-Drive-Konzept [24].	3
Abb. 1-3: Schematische Darstellung des vorliegenden Prozessfensters.	5
Abb. 1-4: Schematischer Ablauf der vorliegenden Arbeit	7
Abb. 2-1: Schematische Darstellung des Wertstroms der CF-NCF Prozesskette bei BMW/SGL ACF [24].	10
Abb. 2-2: Textile Konstruktion der verwendeten CF-NCF.	11
Abb. 2-3: Kettenwirkmaschine Liba Copcentra Max 5 in Anlehnung an [45].	12
Abb. 2-4: Darstellung des Online-Spreizens (A) [46] und einer Wirkeinheit mit Nadelbarre und Legebarre einer Kettenwirkmaschine (B) [45].	13
Abb. 2-5: Typische Grundbindungen und Bindungselemente [48].	14
Abb. 2-6: Multidirektionaler Stack (MD-Stack) aufgebaut aus einzel. UD-NCF.	15
Abb. 2-7: Beispielhafte Stacking-Anlage [20].	15
Abb. 2-8: Schema des Preformprozess bei BMW in Anlehnung an [56].	17
Abb. 2-9: Schema des RTM-Prozess bei BMW in Anlehnung an [20].	19
Abb. 2-10: Repräsentativer Forminnendruckverlauf der RTM-Hochdruckinjektion.	20
Abb. 2-11: Explosionszeichnung Life-Modul i3 in Anlehnung an [20] und das untersuchte „Bodenelement“.	21
Abb. 2-12: Forminnendruckverlauf und Korrelation zu erzielter Bauteilfüllung.	24
Abb. 2-13: Makro-, Meso- und Mikrodarstellung eines CF-NCF in Anlehnung an Loendersloot [61] editiert von Dix [62].	25
Abb. 2-14: Schematische Darstellung des Fließfrontverlaufs bei anisotropen Textilien.	28
Abb. 2-15: Schematische Darstellung der Injektionsmechanismen einer rechteckigen Platte.	29
Abb. 2-16: Schematische Darstellung der hydrostatisch (1) und kapillar (2) dominierten Benetzung nach Loendersloot [72].	32
Abb. 2-17: Viskoelastisches Verhalten textiler Flächen mit plast. Anteil [78].	33
Abb. 2-18: Plast. Verformung von NCF bei wiederholter Kompaktierung [85].	34
Abb. 2-19: Prinzipskizze eines typischen Versuchsaufbaus zur Permeationsprüfung.	40
Abb. 2-20: Permeationsmesszelle LCC [138] (1) und Messzelle IVW [96] (2).	41
Abb. 3-1: Viskositätsentwicklung Harz- /Härterssystem XB3585/XB3458 [162].	50
Abb. 3-2: Versuchsaufbau NCF-Scanner [165].	51
Abb. 3-3: Schema des NCF-Scanner-Algorithmus in Anlehnung an [168].	53
Abb. 3-4: Ergebnisdarstellung NCF-Scanner-Analyse.	53
Abb. 3-5: Unterschiedliche Permeationsprüfköpfe.	54
Abb. 3-6: Versuchsaufbau H ₂ O-Permeationprüfung [165].	55

Abb. 3-7: Verifikation Gesetz von Darcy für H ₂ O-Permeabilitätsprüfstand.....	55
Abb. 3-8: Ergebnisdarstellung H ₂ O-Permeationsprüfung.	58
Abb. 3-9: Versuchsaufbau Kompaktierungsprüfung.	58
Abb. 3-10: Ergebnisdarstellung der Kompaktierungsprüfung über der Zeit (oben) und dem FVG (unten).	59
Abb. 3-11: Werkzeugober- und -unterteil des Plattenwerkzeugs.....	61
Abb. 3-12: Versuchsaufbau 2D-RTM-Prozesskette in Anlehnung an [165].....	62
Abb. 3-13: Werkzeugober- und -unterteil des Bodenwerkzeugs.....	63
Abb. 3-14: Injektionsstrategie für das Bodenwerkzeugs.	64
Abb. 3-15: Qualifizierungslogik zur Untersuchung des Eigenschaftsprofils von CF-NCF in Anlehnung an [175].....	65
Abb. 4-1: Geometrische Darstellung des Fließkanals im CF-NCF.	68
Abb. 4-2: CT-Aufnahme eines Preforms in Anlehnung an [179].	68
Abb. 4-3: Schliffbild eines ebenen Laminats.	69
Abb. 4-4: Permeabilitätsprüfung in Abhängigkeit der CF- Grammatur.....	71
Abb. 4-5: 2D-RTM-Injektionsergebnis in Abhängigkeit der CF-NCF- Grammatur.....	72
Abb. 4-6: Schliffbilder ebener Lamine gleicher Wanddicke.	72
Abb. 4-7: Versuchsaufbau Glasplattenwerkzeug.	73
Abb. 4-8: Einfluss des Faservolumengehalts auf die Fließkanalbreite in Abhängigkeit der Grammatur in Anlehnung an [168]	74
Abb. 4-9: Einfluss der Gelegegrammatur auf das Kompaktierungsverhalten.	75
Abb. 4-10: Variabilität in der Fließkanalausprägung, 0°-Gelege (1) und ±45°- Gelege (2).	76
Abb. 4-11: Fließkanalbreite und Gassendurchgängigkeit, NCF-9.2, NCF-9.3 und NCF-9-4 in Anlehnung an [168]	78
Abb. 4-12: Einfluss von Fließkanalbreite und Gassendurchgängigkeit auf die (un-)gesättigte Permeabilität K_1 , NCF-9.2, NCF-9.3 und NCF-9-4 in Anlehnung an [168].....	78
Abb. 4-13: Zielgröße Füllrate in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt.....	81
Abb. 4-14: Einfluss der Fließkanalbreite auf den Druckverlauf bei der HD- RTM-Injektion (Lagenaufbau: 3,4,2,2,2,4,3).	82
Abb. 4-15: Mikroskopaufnahme zweier CF-NCF, Franse-Teilschuss-Bindung (1) und Trikotbindung (2).....	83
Abb. 4-16: Vergleich des Fließfrontfortschritts von Oberseite zu Unterseite zweier sechslagiger 0° 300 g/m ² -Aufbauten nach der Injektion im 2D-RTM (15 bar).	84
Abb. 4-17: Vergleich von NCF-2.1 (Franse-Teilschuss-Bindung) und NCF-2.3 (Trikotbindung) hinsichtlich K_3 -Permeabilität: fünfflagiger UD- Aufbau.	85

Abb. 4-18: Prinzip des Fließfrontfortschritts: homogene Füllung (links) und inhomogener Füllungsverlauf (rechts).....	86
Abb. 4-19: Vergleich K_{12} - und K_3 -Permeation unterschiedlicher 0° 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt V_f, tar von 53 % (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4) in Anlehnung an Koch [175].....	88
Abb. 4-20: Vergleich des Kompaktierungsverhaltens unterschiedlicher 0° 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt V_f, tar von 53 % (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4).	89
Abb. 4-21: Vergleich 2D-HD-RTM unterschiedlicher 0° 300 g/m^2 -Materialien (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4), absolute Schussmenge (oben), Fließfrontverhältnis (unten links) und Füllungsfaktor (unten rechts) in Anlehnung an Koch [175].....	90
Abb. 4-22: Prinzip der Schliiffuntersuchung von ebenen Laminaten hinsichtlich Füllqualität. Probenentnahmeposition im ebenen Laminat (oben) und Kategorisierung der ausgewerteten Poren.....	91
Abb. 4-23: Identifizierte Fehlstellen im ebenen Laminat, NCF-2.1 und NCF-2.4.	92
Abb. 4-24: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Franse-Teilschuss-Bindung und Trikotbindung am siebenlagigen Aufbau (3,4,2,2,2,4,3) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).	93
Abb. 4-25: Vergleich der K_{12} - und K_3 -Permeation unterschiedlicher $+45^\circ$ 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt V_f, tar von 53 % (NCF-5.1, NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0° -Referenz).....	95
Abb. 4-26: Vergleich des Kompaktierungsverhaltens unterschiedlicher $+45^\circ$ 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt V_f, tar von 53 % (NCF-5.1, NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0° -Referenz).....	96
Abb. 4-27: Vergleich von 2D-HD-RTM unterschiedlicher $+45^\circ$ 300 g/m^2 -Materialien (NCF-5.1 und NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0° -Referenz), absoluter Schussmenge (oben), Fließfrontverhältnis (unten links) und Füllungsfaktor (unten rechts).	97
Abb. 4-28: Identifizierte Fehlstellen im ebenen Laminat, NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-5.4.....	98
Abb. 4-29: Vergleich des Forminnendruckanstiegs bei Teilung E 3,5 (NCF-5.1) und Teilung E 5 (NCF-5.2) am fünf-lagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung 25 bar).	99
Abb. 4-30: Einfluss der NCF-Lagenanzahl auf die Permeabilität K_3 (NCF-2.4, $0^\circ/90^\circ$ -Aufbau).....	102
Abb. 4-31: Vergleich des Forminnendruckanstiegs eines Stacks unterschiedlicher Lagenanzahl bei identischem CF-Flächengewicht (1500 g/m^2) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung 25 bar).....	103
Abb. 4-32: Einfluss der NCF-Lagenanzahl auf die Permeabilität K_3 (NCF-2.1, $0^\circ/0^\circ$ -Aufbau).....	104
Abb. 4-33: Schliiffbilder unterschiedlicher 1500 g/m^2 -Aufbauten.	105

Abb. 4-34: Nestingprinzip bei UD- und MD-Lagenaufbauten.....	106
Abb. 4-35: Exemplarische Schliffbilder unterschiedlicher UD-Lamine: kein Nesting (links) und Nesting (rechts).	106
Abb. 4-36: Vergleich Permeabilität K_3 unterschiedlicher Lagenversatzszenarien, fünfflagiger UD-Stack, NCF-2.1.	108
Abb. 4-37: Vergleich Permeabilität K_3 unterschiedlicher Stacksequenzen.....	110
Abb. 4-38: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Preforms unterschiedlicher Lagenfolge im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 100 bar).....	111
Abb. 4-39: Zielgrößen Permeabilität und Kompaktierung in Abhängigkeit Parameter Fließkanalbreite, Materialtyp und Lagenaufbau.	112
Abb. 4-40: Gewichtung der Einzeleffekte Fließkanalbreite, Materialtyp und Lagenaufbau abhängig von den Zielgrößen Permeabilität und Kompaktierung.....	113
Abb. 5-1: Bindermigration auf einem CF-NCF in Abhängigkeit des Wärmeeintrags.....	118
Abb. 5-2: Mikroskop- und REM-Aufnahmen eines CF-NCF (bebindert und angesintert).	119
Abb. 5-3: Skizze der Versuchsaufbauten zur Bewertung der Preformsteifigkeit (1) und der Lagenhaftung (2).	120
Abb. 5-4: Einfluss von Wärmeeintrag und Bindermenge auf die Durchbiegung (Steifigkeit) und Lagenhaftung eines ebenen Preforms.	121
Abb. 5-5: Bindermigration in ein CF-NCF entlang der Prozesskette in Anlehnung an Dickert [109].	122
Abb. 5-6: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Preforms mit 7,5 g/m ² und 12,5 g/m ² -Binder am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).	123
Abb. 5-7: Zielgröße Permeabilität und Kompaktierung abhängig von Preformprozessparametern in Anlehnung an Fenske [173]	125
Abb. 5-8: Vergleich des Forminnendruckanstiegs unterschiedlicher Preformtemperaturen am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).	127
Abb. 5-9: Vergleich des Forminnendruckanstiegs in Abhängigkeit des Preformspalts am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).....	128
Abb. 5-10: Vergleich des Prinzips des „Über“- und „Unterpressens“ anhand von Schliffbildern eines dreilagigen Laminats (NCF-9.6).	129
Abb. 5-11: Versuchsaufbau RTM-Spaltinjektion.....	130
Abb. 5-12: Versuchswerkzeug „Schikane“: Aufsicht Werkzeugkavität (1) und Ansicht Preform (2).....	130
Abb. 5-13: Füllstudien am Versuchswerkzeug „Schikane“ (Niederdruckinjektion) mit Variation des Injektionsspalt.	131

Abb. 6-1: Vergleich des Forminnendruckanstiegs der Ausgangsbasis und der Modifikation I (Textil) am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM:.....	136
Abb. 6-2: Gewichtung der Einzeleffekte (Modifikation I: Textil).....	137
Abb. 6-3: Versuchsraum der Prozessparameter Preformspalt und RTM-Spalt.	137
Abb. 6-4: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Modifikation I (Textil) und Modifikation II (Textil und Prozess) am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM.....	138
Abb. 6-5: Gewichtung der Einzeleffekte (Modifikation II: Textil und Prozess).	139
Abb. 6-6: Vergleich des Druckniveaus: Ausgangsbasis und Modifikation I u. II. ..	139
Abb. 6-7: Vergleich der erzielbaren Bauteilgüte am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im Versuchswerkzeug „Bodenelement“.....	140
Abb. 6-8: Repräsentative Schlibfbilder eines „Bodenelements“.....	141
Abb. 6-9: Prinzip eines robusten Prozesses: erzielter Zustand nach Produkt und Prozessoptimierungen.	142
Abb. A-1: Datenblatt C-Faser (CF-1) 50K ACF-50-02, Fa. SGL ACF [153].	161
Abb. A-2: Datenblatt C-Faser (CF-2), Zoltek™ PX35, Fa. Zoltek [154].	162
Abb. A-3: Datenblatt UD-Gelege (NCF-2.2) Zoltek™ PX35 Uni-Directional Fabrics, Fa. Zoltek [188].	163
Abb. A-4: Datenblatt Harzsystem XB 3585 / XB 3458, Fa. Huntsman [189].	164
Abb. A-5: Datenblatt Bindersystem LT 3366 / XB 3366, Fa. Huntsman [190].	165
Abb. A-6: Datenblatt Harzsystem Epikote™ Resin 06000 und Epikure™ Curing Agent 06130, Fa. Momentive [189].	166
Abb. A-7: Einteilung GFK nach Herstellverfahren (li.) u. anwendungsbezogenem GF-Verbrauch (re.), in Anl. an [18].	167
Abb. A-8: Einteilung CFK nach Herstellverfahren (li.) u. anwendungsbezogenem CF-Verbrauch (re.), in Anl. an [2, 17].	168
Abb. A-9: Schematische Darstellung der unterschiedl. Prozessrouten von FVK.	169
Abb. A-10: Einteilung textiler Flächengebilde in Anlehnung an [64, 48].	170
Abb. A-11: Schematische Darstellung der Herausforderungen bei der CFK-Verarbeitung im automobilen Umfeld [1, 3-4, 20, 25-30]	171
Abb. A-12: Prinzip des fähigen und stabilen Prozess in Anlehnung an [198].	171
Abb. A-13: Karosseriestruktur der BMW 7er Baureihe (G11/G12, 2015) mit Carbon Core™ [22]	172
Abb. A-14: Globale CFK-Bedarfsentwicklung von 2010 bis 2020 nach [17].	172
Abb. A-15: Ansicht Bodenwerkzeug.	173
Abb. A-16: Produkteigenschaften, Stellgrößen und Prüfmethode von CF-NCF.	174
Abb. A-17: Füllrate im MD-RTM in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt für 0° 300 g/m²-Materialien.	175

Abb. A-18: Füllrate im MD-RTM in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt für $\pm 45^\circ$ 300 g/m ² -Materialien.	176
Abb. A-19: Einfluss von Fließkanalbreite und Lagenaufbau auf die Permeabilität K_{12} u. K_3	177
Abb. A-20: Einfluss von Fließkanalbreite und Lagenaufbau auf σ_{tar} , σ_{max} und σ_{rel}	178
Abb. A-21: Gesättigten Permeabilität K_{12} , K_3 und B-Parameter bei $V_f, tar = 53\%$ unterschiedlicher textiler Architekturen.	179
Abb. A-22: Einfluss des Preformspalts auf die Permeabilität K_3	180

Anmerkung: Abbildungen ohne Quellenangabe sind eigene Entwürfe.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Übersicht der gegebenen produkt- und prozessseitigen Randbedingungen.....	22
Tab. 2-2: Übersicht der definierten Vorgaben im vorliegenden RTM-Verfahren.	23
Tab. 2-3: Übersicht der bekannten und variablen Einflussgrößen von CF-NCF bzgl. Imprägniereignung.	35
Tab. 2-4: Übersicht der bekannten textilen Stellgrößen von CF-NCF bzgl. der Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung.....	37
Tab. 3-1: Verwendete C-Fasern.....	45
Tab. 3-2: Einteilung der verwendeten CF-NCF.	46
Tab. 3-3: Verwendete UD-CF-NCF-Varianten.	47
Tab. 3-4: Schematische Darstellung der eingesetzten CF-NCF in Anlehnung an [161].	48
Tab. 3-5: Notation exemplarisch verwendeter MD-Stacks.	49
Tab. 3-6: Einteilung der Analyseebenen in Abhängigkeit von der Injektionsstrategie.	66
Tab. 4-1: Verwendete CF-NCF zur Analyse der textilen Grammatik.....	70
Tab. 4-2: Verwendete CF-NCF zur Analyse von Fließkanalbreite und -durchgängigkeit (1).....	77
Tab. 4-3: Verwendete CF-NCF zur Analyse von Fließkanalbreite und -durchgängigkeit (2).....	79
Tab. 4-4: Verwendete CF-NCF zur Analyse der Bindungsart.	84
Tab. 4-5: Verwendete CF-NCF zur Analyse der 0°-Materialien.....	88
Tab. 4-6: Verwendete CF-NCF zur Analyse der 45°-Materialien.....	94
Tab. 4-7: Verwendete Lagenaufbauten zur Analyse unterschiedlicher Gelegekonfigurationen mit identischem CF-Flächengewicht (Netto-FVG).	103
Tab. 4-8: Mögliche Lagenversatzszenarien eines fünflagigen UD-Stacks.....	107
Tab. 4-9: Verwendete Lagenaufbauten zur Analyse der Lagenorientierung.....	109
Tab. 4-10: Verwendete CF-NCF zur Untersuchung der Entkopplung, 3D-HD-RTM.	110
Tab. 5-1: Parameter der Injektionsspaltvariation.....	131
Tab. 6-1: Übersicht der variierten Stellgrößen von CF-NCF bzgl. Produkt und Prozess.	135
Tab. 7-1: Wirkzusammenhänge von Carbonfaserbasierten Gelegen im HD-RTM-Prozess.	145

Anmerkung: Tabellen ohne Quellenangabe sind eigene Entwürfe.

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Problemstellung

Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe und damit einhergehend deren Preisentwicklung stellt die Automobilindustrie vor neue Aufgaben, sofern der Pkw das Massentransportmedium des zukünftigen Individualverkehrs bleiben soll. Weiterhin machen aktuelle Gesetzgebungen bzgl. zulässiger CO₂- und NO_x-Ausstoß-Obergrenzen neue ökologisch ausgerichtete Mobilitätskonzepte notwendig. Andernfalls ist mit Strafzahlungen für Fahrzeughersteller und mit weiteren Fahrverboten für den Fahrzeugnutzer zu rechnen. [1-7]

Es resultieren u. a. folgende Lösungsmöglichkeiten: zum einen durch effektive Abgasreinigungssysteme den Schadstoffausstoß zu reduzieren; und zum anderen durch den Einsatz von effizienten Motorenkonzepten (Down-Sizing) den Kraftstoffverbrauch zu minimieren oder durch alternative Antriebskonzepte (H₂-Antriebe, der Brennstoffzellentechnik etc.) den Einsatz fossiler Energiestoffe gesamthaft zu vermeiden. Die beiden zuletzt genannten Ansätze verbindet ein Parameter: das Fahrzeuggewicht. Es beeinflusst direkt den Leistungsbedarf sowie den Streckenverbrauch eines Fahrzeugs. [2, 8-11]

Besonders deutlich wird der Einfluss des Fahrzeuggewichts bei einem der effizientesten Antriebskonzepte, dem Elektroantrieb. Dessen Wirkungsgrad übertrifft aktuelle Benzin- und Diesellaggregate und bietet ein Einsparpotenzial bezogen auf den Primärenergiebedarf und somit auch hinsichtlich des Schadstoffausstoßes. Aufgrund der geringen Reichweite, bedingt durch die vergleichsweise niedrige, aber kostspielige Energiedichte der heute verfügbaren Batterien gegenüber einem fossilen Brennstoff, konnten sich E-Fahrzeuge bis heute nicht durchsetzen. [12-13]

Um die Reichweite eines solchen Fahrzeugs zu steigern, muss die Batteriekapazität erweitert werden. Dies führt zu einer Gewichtszunahme und erhöht damit den Energieverbrauch, was wiederum die Reichweite reduziert. Diese Gewichtsspirale muss durch konsequenten Leichtbau durchbrochen werden, denn auch die Möglichkeit zur Rekuperation¹ ersetzt die Notwendigkeit zur Gewichtsreduktion nicht. [12-15]

¹ Bezeichnet ein Verfahren zur Energierückgewinnung. In E-Fahrzeugen wird beim Bremsen elektrische Energie in einen Akkumulator oder einen anderen Energiespeicher (zurück)gespeist.

Leichtbau umfasst im Automobilssektor u. a. sowohl den Einsatz von Leichtbaumaterialien wie Hochleistungsstählen (HSS), Aluminium-, Magnesiumlegierungen etc. (Werkstoffleichtbau) als auch die belastungsoptimierte Konstruktion der Fahrzeugkarosse mit minimalem Materialeinsatz (konstruktiver Leichtbau). Großes Potenzial für diesen effizienten, lastpfadgerechten Leichtbau bieten vor allem die anisotropen Faser-verbundkunststoffe (FVK). [10, 16]

Wichtigste Vertreter von FVK sind hinsichtlich Produktionsvolumen die glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK). Sind hohe gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften für strukturelle, sicherheitsrelevante Anwendungen gefordert, finden anstelle von Glasfasern überwiegend Kohlenstofffasern (CF) als Verstärkung Anwendung: im Carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK). [2, 17-19]

Ein genereller Überblick zu aktuellen Produktionsmengen, Herstellverfahren, Halbzeugen und Anwendungsbeispielen von GFK und CFK wird im Anhang gegeben, siehe Abb. A-7 bis Abb. A- 10.

Im für diese Arbeit relevanten Bereich, der Anwendung von CFK in Fahrzeugstrukturen, lassen sich die Fertigungsverfahren auf Basis von erzielbarer Stückzahl und Automatisierungsgrad der angewandten Prozesskette drei Generationen zuordnen, entsprechend Abb. 1-1 [20]:

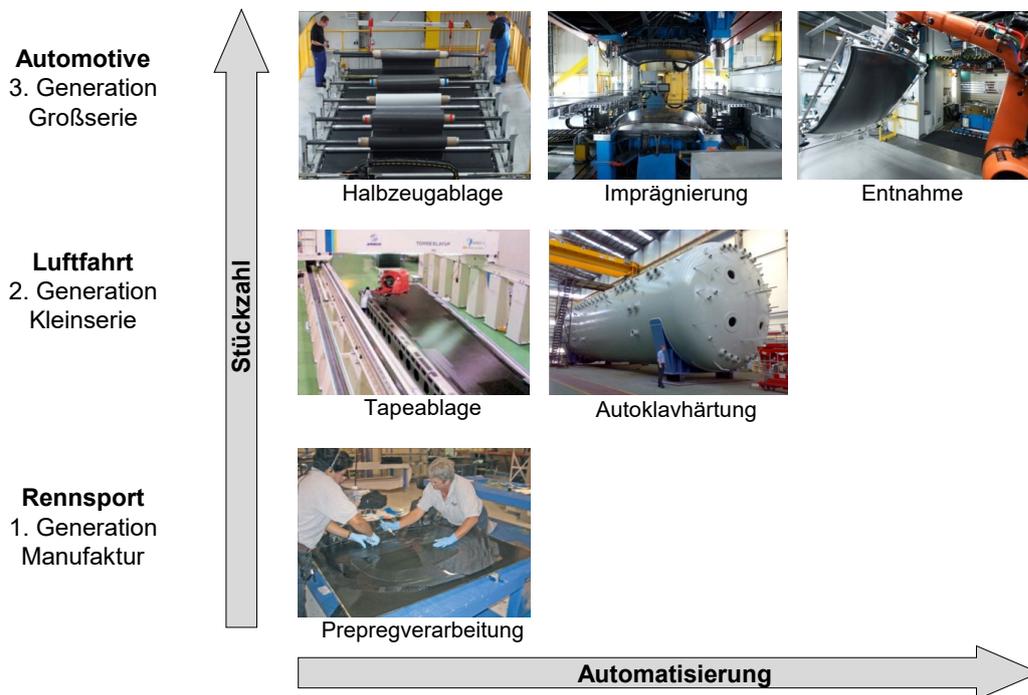


Abb. 1-1: Fertigungsverfahren von FVK abhängig von Stückzahl und Automatisierungsgrad in Anlehnung an [20].

Sowohl die erste Fertigungsgeneration, wie beispielsweise die manuellen Prepregverfahren (vorherrschend im Rennsportbereich), und auch die zweite Anwendungskategorie, die teilautomatisierten Tape- oder Prepregverfahren mit nachgelagerter Auto-

klavenaushärtung (bekannt aus der Luftfahrt), sind mit Zykluszeiten ≥ 24 h nicht in der Lage, die für eine automobiler Großserienproduktion nötigen Stückzahlen in der geforderten Zeit, Qualität und zu wettbewerbsfähigen Kosten zu realisieren. Als Referenzbeispiel sei die Baureihe X6 (Werksbezeichnung F16, Modelljahr 2014) der Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (BMW) mit 43.323 produzierten Einheiten im Jahr 2016 genannt [21]. Um ein solches Produktionsvolumen zu erzielen, sind Zykluszeiten von ≤ 10 min. (6 Einheiten / h) notwendig. Hiermit lassen sich exemplarisch bei einem teilkontinuierlichen Schichtsystem (24 h / Tag) mit 250 Arbeitstagen im Jahr 36.000 Einheiten jährlich realisieren. Bei einem vollkontinuierlichen Modell mit 365 Tagen im Jahr ergeben sich bereits 52.560 Fahrzeuge (bzw. 144 Einheiten pro Tag und Werkzeug).

Zur Realisierung der oben diskutierten Zykluszeiten ist eine dritte vollautomatisierte Fertigungsgeneration zur Herstellung von Composites-Strukturbauteilen im Großserienmaßstab erforderlich; z. B. nach dem Vorbild der CFK-Dachfertigung der BMW M Modelle (z. B. F80/82, 2014) oder der BMW 7er Baureihe (G11/G12, 2015) der BMW AG. Im G11/G12 befindet sich der sog. Carbon Core™ mitunter im Dachrahmen und wird durch weitere CFK-Komponenten wie z. B. Windlauf und Mitteltunnel ergänzt, siehe Abb. A-13 im Anhang. Gesamthaft verspricht die Mischbauweise der Karosserie aus Stahl, Aluminium, Kunststoff und FVK eine Optimierung der Karosseriesteifigkeit und deren Gewichtsreduktion. Beide Produktreihen nutzen zur Fertigung der CFK-Komponenten u. a. das RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) mit duroplastischer Matrix. Als textile CF-Halbzeuge kommen dabei vornehmlich Gelege, Gewebe und Geflechte zum Einsatz. [22]

Das 2007 gegründete Project i verbindet den strukturellen Einsatz von CFK-Komponenten und die E-Mobilität im Großserienmaßstab (33.676 Einheiten BMW i im Jahr 2017 [21]). Die Fahrzeuge dieser Produktlinie (BMW i3, i8 und i8 Roadster) sind u. a. ein Beitragsleister für die positive Marktentwicklung von CFK im Automotivbereich, siehe Abb. A-14 im Anhang [2]. Grundlage hierfür bildet die „Life-Drive“-Fahrzeugarchitektur, bestehend aus einem Aluminium-Chassis (dem sog. Drive-Modul mit elektrischem Antrieb) und einer CFK-Fahrgastzelle (dem Life-Modul) [20, 23]. Abb. 1-2 veranschaulicht diese Fahrzeugarchitektur am Beispiel des BMW i8:

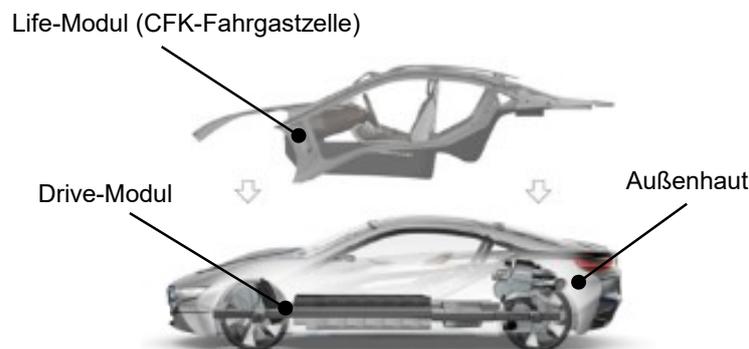


Abb. 1-2: Fahrzeugarchitektur des BMW i8: das Life-Drive-Konzept [24].

Die Carbonkomponenten der Fahrgastzelle werden mittels Nassimprägnierverfahren (engl. Liquid Composite Molding, LCM) hergestellt. Im Zentrum steht dabei die Werkstoffverfahrenskombination: Carbonfasergelege (Carbon Fiber - Non-Crimp Fabric) mit Resin Transfer Molding, CF-NCF-RTM.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Eine zentrale Problemstellung beim Einsatz der Werkstoffverfahrenskombination CF-NCF-RTM nimmt die Schwankung in der erzielten Bauteilgüte und deren Reproduzierbarkeit ein. Denn infolge der Verwendung dieser neuen, aufwendigen Herstellprozesse sind hohe Ausschussraten (bis zu 30%) zu erwarten. [1]

Ursächlich für die o. g. Streuung ist neben der Verwendung von neuen Anlagentechnologien die Tatsache, dass bei der Komponentenherstellung nicht nur das Bauteil, sondern insbesondere auch der eigentliche Werkstoff CFK in einem gemeinsamen Prozessschritt entstehen. Bei dieser generativen Fertigung werden textile Halbzeuge eingesetzt, die ihrerseits hinsichtlich ihrer makroskopischen Struktur variieren. Es lassen sich z. B. Schwankungen im Flächengewicht, hervorgerufen durch das wiederholte Beschneiden, das manuelle Konfektionieren oder das Handling der Faserhalbzeuge bei der Verarbeitung zum Verbundwerkstoff, feststellen [31]. Dies wiederum führt zu Schwankungen in der Durchlässigkeit (Permeabilität) der textilen Halbzeuge und damit zur Variation des Forminnendruckanstiegs im RTM-Prozess bei der Harzinjektion. Dadurch werden die Komponentenfüllung und die Bauteilqualität direkt beeinflusst, siehe Kap. 2.2.

Dementsprechend sind umfassende Qualitätskontrollen notwendig, um die prozesssichere Komponentenherstellung im RTM-Verfahren sicherzustellen. Komplexe Anlagensensoriken zur Kontrolle von Prozesstemperaturen, Mischungsverhältnissen von Matrixkomponenten oder deren Austragsvolumina u. a. sind Stand der Technik [32]. Diese Parameterüberwachung erfolgt inline und gibt dem Anwender beispielsweise Aufschluss über die Matrixvernetzung oder Glasübergangstemperatur und somit ein Indiz über die mechanischen Eigenschaften der produzierten Komponente. Die Qualität der Bauteilfüllung, d. h. das Vorhandensein von nicht imprägnierten Bereichen oder Trockenstellen, muss hingegen visuell vom Werker kontrolliert werden. Darüber hinaus lassen sich interlaminaire Fehlstellen nur mittels aufwendiger Ultraschallprüfung, Thermografie- oder Wirbelstromprüfung detektieren [33], [34]. Diese erfolgen nachgelagert offline und erfordern spezielles Equipment sowie hochqualifiziertes Personal.

Es ergeben sich u. a. zwei Lösungsansätze, die Ausschussraten sowie die kostenintensiven nachgelagerten Qualitätskontrollen zu reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit der Werkstoffverfahrenskombination zu erhöhen:

Zum einen kann durch die Identifikation und Überwachung der Prozessparameter im RTM-Prozess, welche Aufschluss über die Bauteilfüllung zulassen, eine kontinuierliche Online-Prüfung ermöglicht werden. Dies erlaubt dem Anwender eine aktive Prozesskontrolle. Abweichungen von der Spezifikation werden erkannt und Ausschussbauteile werden entweder frühzeitig ausgeschleust oder durch den regelnden Eingriff in den Verarbeitungsprozess vermieden.

Zum anderen muss das Prozessfenster der CFK-Herstellung insoweit erweitert werden, dass ein robustes (d. h. fähiges und beherrschtes²) Produktionsfenster generiert wird. Dadurch wird eine nachgelagerte 100 % - Qualitätskontrolle verzichtbar und gleichzeitig steigt das Qualitätsniveau. Abb. 1-3 veranschaulicht die Ausgangssituation und den Zielzustand schematisch. Im Fall (1) übersteigt die Streuung der Produkteigenschaften der eingesetzten Materialien das Prozessfenster des Verarbeitungsprozess: es entsteht Ausschuss. Im Zielzustand (2) ist das Verarbeitungsprozessfenster größer als die Schwankungsbreite der Gelegeeigenschaften. Es sind nur Gutteile zu erwarten.

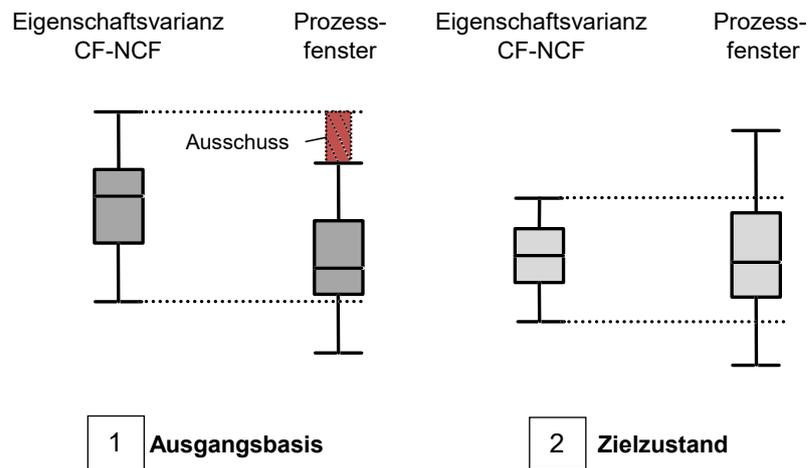


Abb. 1-3: Schematische Darstellung des vorliegenden Prozessfensters.
Die Ausgangsbasis (links) und der robuste Zielzustand (rechts).

Die Erreichung des zuletzt genannten Aspekts (vgl. Abb. 1-3 (2)) ist die Absicht der vorliegenden Arbeit. Ziel ist es, die eingesetzten CF-NCF und die Verarbeitungsprozesse unter definierten Vorgaben in der Art zu modifizieren, dass eine prozesssichere Imprägnierung dieser Halbzeuge mit der Matrix gewährleistet wird. D. h. vor allem das Druckniveau und dessen Varianz bei der Injektion muss auf ein Niveau gesenkt werden, welches ein Überschreiten der Prozessgrenzen der eingesetzten Anlagentechnologie ausschließt.

² Das Prinzip der Prozessfähigkeit und in diesem Zusammenhang die Begriffe „fähig“ und „beherrscht“ sind im Anhang Abb. A-12 erläutert

Dabei sind das Verständnis der Wirkweise der Gelegeigenschaften und deren Interaktion mit den Verarbeitungsprozessen von zentraler Bedeutung. Mit deren Kenntnis können die richtigen „Stellschrauben“ identifiziert und das Textil sowie die Prozessführung zielgerichtet optimiert und aufeinander abgestimmt werden. In der Folge wird der Prozessausschuss auf ein Minimum reduziert und damit ein Beitrag zur Wirtschaftlichkeit von CF-NCF-RTM geleistet.

1.3 Vorgehensweise

Aus der Zielsetzung leitet sich die Gliederung der vorliegenden Arbeit ab, welche schematisch in Abb. 1-4 (umseitig) dargestellt ist.

In Kapitel 2 wird die Prozesskette der CFK-Komponentenfertigung der Fahrzeugproduktlinie I der BMW AG beschrieben, welche die Grundlage für die folgenden Untersuchungen bildet. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung des textilen Prozesses zur Herstellung der CF-NCF, der Weiterverarbeitung im Preformprozess und der abschließenden Injektion im Hochdruck-RTM-Verfahren (HD-RTM). Dabei werden die Vorgaben an das eingesetzte Textil und dessen Prozessgrößen bei der Verarbeitung vorgestellt, die den Lösungsraum der vorliegenden Problemstellung aufzeigen. Daran anschließend folgen mit den gegebenen Randbedingungen Injektionsversuche. Es werden Wirkmechanismen identifiziert, die das Injektionsergebnis beeinflussen. Die Permeabilität und Kompaktierung der eingesetzten Textilien werden als zentrale Produkteigenschaften herausgearbeitet. Daraus ergibt sich das Eigenschaftsprofil für ein CF-NCF im HD-RTM-Prozess.

Darauf aufbauend werden diejenigen in der Literatur bekannten Parameter dargestellt, die potentiell Einfluss auf die o. g. relevanten Produkteigenschaften nehmen und mit den definierten Vorgaben abgeglichen. Hieraus leiten sich die textile Architektur des Geleges und der Lagenaufbau des Gelegestapels (Stacks) als variable Stellgrößen ab. Dementsprechend können spezifische, textile Parameter identifiziert werden und den jeweiligen Stellgrößen und Produkteigenschaften „Permeabilität“ und „Kompaktierung“ zugeordnet werden. Die Untersuchung der Wirkzusammenhänge dieser Parameter und die Validierung im HD-RTM-Prozess generiert das Versuchsprogramm der vorliegenden Arbeit. Der Stand der Technik im Bereich der zugehörigen Prüfmethode schließt das Kapitel ab.

Im folgenden Kapitel 3 wird die Versuchsumgebung detailliert beschrieben. Die unterschiedlichen verwendeten Gelegetypen werden spezifiziert sowie die Versuchsmethoden zur Bewertung der Permeabilität, Kompaktierung und Injektionsfähigkeit vorgestellt und die (Weiter-)Entwicklung beschrieben. Daraus leitet sich eine Qualifizierungslogik zur gestaffelten Untersuchung der Einflussparameter auf unterschiedlichen Analyseebenen (Labor-, Technikums- und Serienprozessebene) ab.

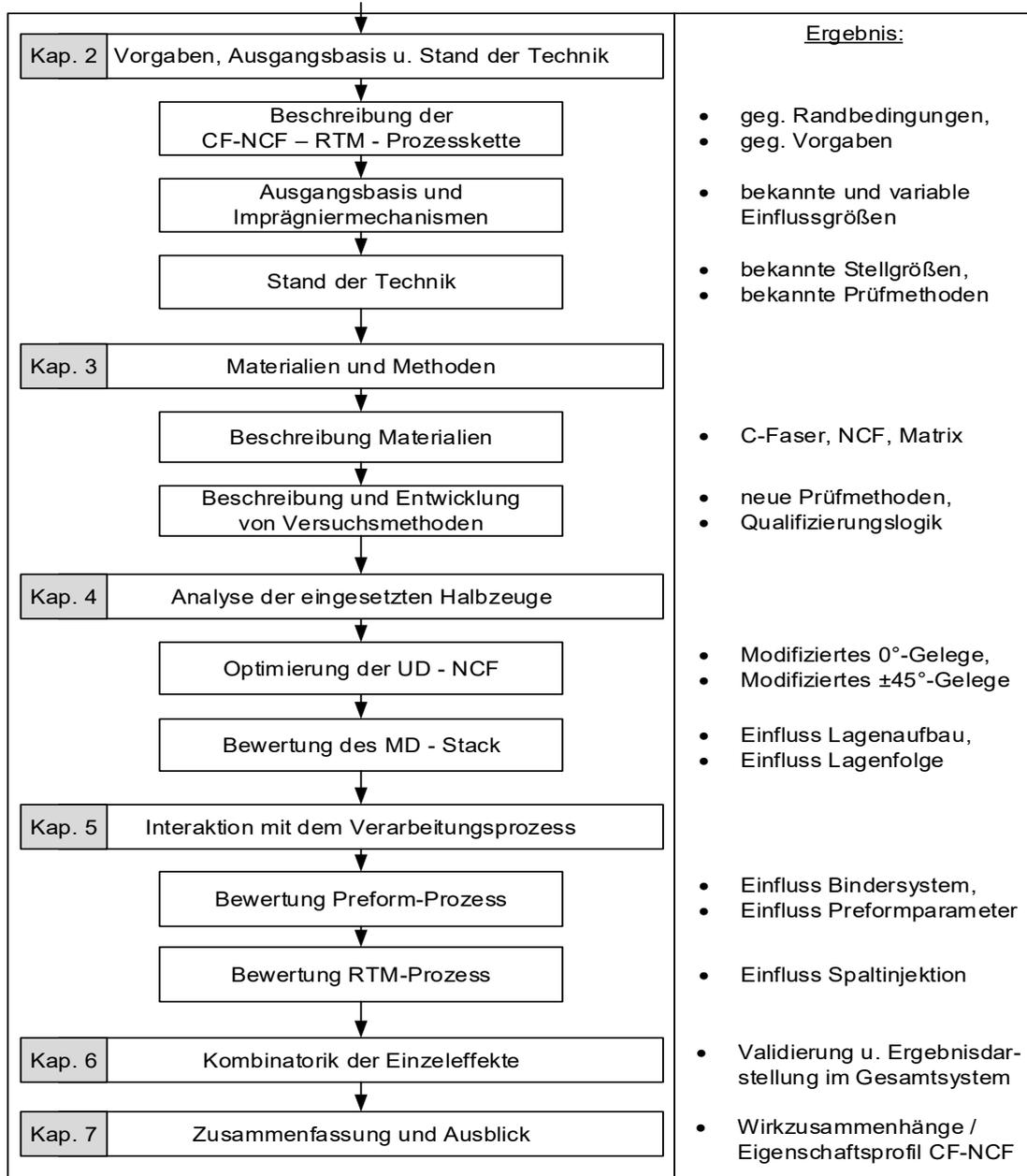


Abb. 1-4: Schematischer Ablauf der vorliegenden Arbeit

Das Kapitel 4 bildet den Kern der Arbeit. Im Fokus stehen Injektionsversuche unterschiedlicher Gelegearchitekturen von unidirektionalen Einzellegen (UD-NCF) sowie multidirektionalen Stackaufbauten (MD-Stack). Es werden die Parameter Grammatur, Wirkfadenspannung, Bindungstyp, Stichanzahl des CF-NCF sowie Lagenanzahl und -folge im Gelegestapel untersucht. Das Ergebnis ist ein hinsichtlich Injektionseignung optimiertes CF-NCF.

Im anschließenden Kapitel 5 werden die Erkenntnisse auf die Verarbeitungsprozesse Preform und RTM übertragen, um die Auswirkungen der Modifikation auf die Verarbeitungseigenschaften zu untersuchen.

In Kapitel 6 erfolgt die Validierung der Untersuchungsinhalte: Es werden die untersuchten Einzeleffekte der vorangegangenen Abschnitte kombiniert und das modifizierte Gesamtsystem dem Ausgangszustand gegenübergestellt. Die Optimierung wird dabei durch die Reduktion des erzielten Druckniveaus im RTM-Verfahren quantifiziert und anhand der erzielten Bauteilegüte bzgl. Komponentenfüllung verifiziert.

Kapitel 7 stellt den Abschluss der Arbeit dar. Hier werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und abschließend ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungsfelder und Anwendungsgebiete der erzielten Erkenntnisse gegeben.

2 Vorgaben, Ausgangsbasis und Stand der Technik

Das Kapitel 2.1 stellt die Prozesskette zur CFK-Komponentenfertigung der Fahrzeugproduktlinie I der BMW AG vor. Daraus werden die produkt- und prozessseitigen Randbedingungen für die Untersuchungen dieser Arbeit abgeleitet. Diese werden um weitere, nicht variierbare Vorgaben, welche die funktionale Auslegung der Fahrzeuge beeinflussen, ergänzt, siehe Kap. 2.1.5.

Abschnitt 2.2 konkretisiert darauf aufbauend die Problemstellung: Die Schwankungen im Forminnendruck bei der RTM-Injektion werden dargestellt und bekannte Mechanismen, welche die Imprägnierung der Halbzeuge beeinflussen vorgestellt. Im Fazit (Kap. 2.2.4) werden daraus die Einflussgrößen abgeleitet, welche im Rahmen dieser Arbeit variabel sind und untersucht werden.

Kapitel 2.3 benennt die in der Literatur bekannten Stellgrößen, mit welchen sich die im vorherigen Abschnitt identifizierten Einflussgrößen auf die Imprägniereigenschaften der CF-Halbzeuge modifizieren lassen. Weiterhin wird der Stand der Technik der zugehörigen Prüfmethode zusammengefasst und erläutert.

2.1 Darstellung der vorliegenden Prozesskette und Definition der Vorgaben

BMW schließt 2009 ein Joint Venture mit der SGL Carbon SE (SGL), SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG (SGL ACF). Dieses bildet die Grundlage für die Produktion von CFK-Komponenten im Rahmen des Project i, da hiermit die vollständige Prozesskette zur Herstellung dieser FVK angefangen vom Precursor bis hin zum fertigen Bauteil abgebildet wird, siehe Abb. 2-1 umseitig.

Im dargestellten Flussdiagramm werden neben den Produktionsstandorten die einzelnen Prozessschritte verdeutlicht; unterteilt in die Verarbeitungskategorien: Faser (1), Textil (2), Preform (3) und RTM-Bauteil (4).¹

¹ Am 24.11.2017 erwirbt SGL die Beteiligung der BMW Group am Gemeinschaftsunternehmen SGL ACF. Die bestehenden Lieferverträge für die Carbonumfänge von BMW i3, i8 sowie 7er Baureihe bleiben bestehen. Weiterhin wurde eine Vereinbarung zur Fortführung der Geschäftsbeziehungen bei zukünftigen Projekten mit Einsatz von Carbon geschlossen. [35, 36]

Den PAN-Precursor (Polyacrylnitril), das Ausgangsprodukt zur Herstellung von C-Fasern (CF), bezieht SGL ACF aus einem weiteren Joint Venture der MRC-SGL Precursor Co. Ltd. (MSP), (Joint Venture Fa. Mitsubishi Rayon Co. Ltd. und SGL Precursor Co. Ltd.) in Otake, Japan. Die Weiterverarbeitung zur CF (1), d.h. Stabilisierung, Oxidation, Oberflächenbehandlung u. a., findet an den Produktionsstandorten von SGL ACF in Moses Lake (USA) statt.

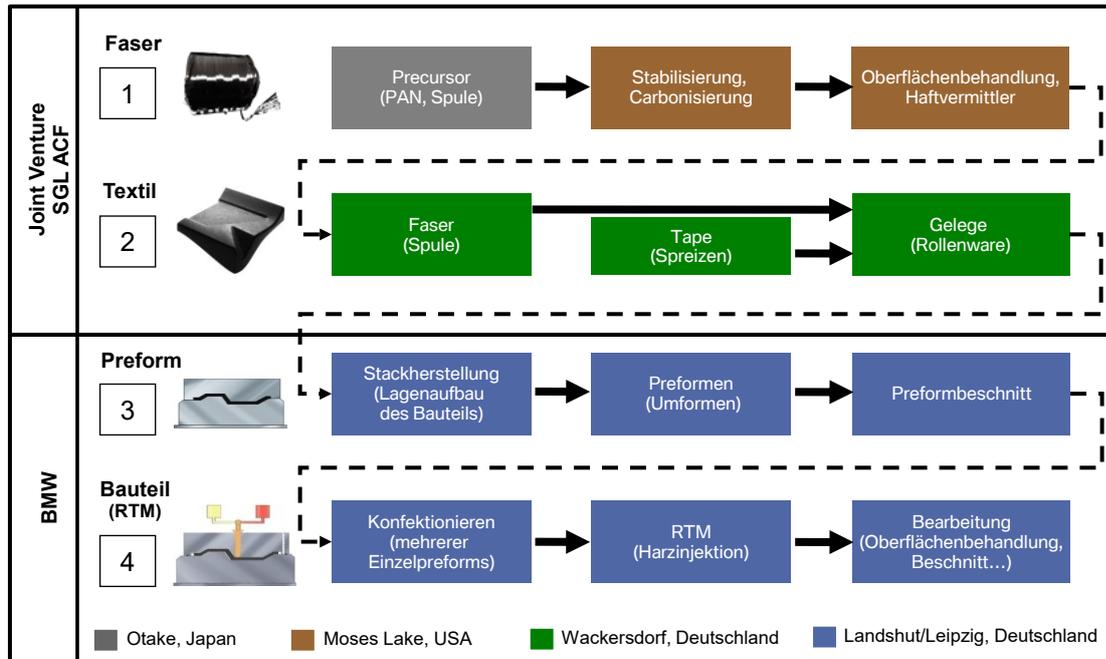


Abb. 2-1: Schematische Darstellung des Wertstroms der CF-NCF Prozesskette bei BMW/SGL ACF [24]

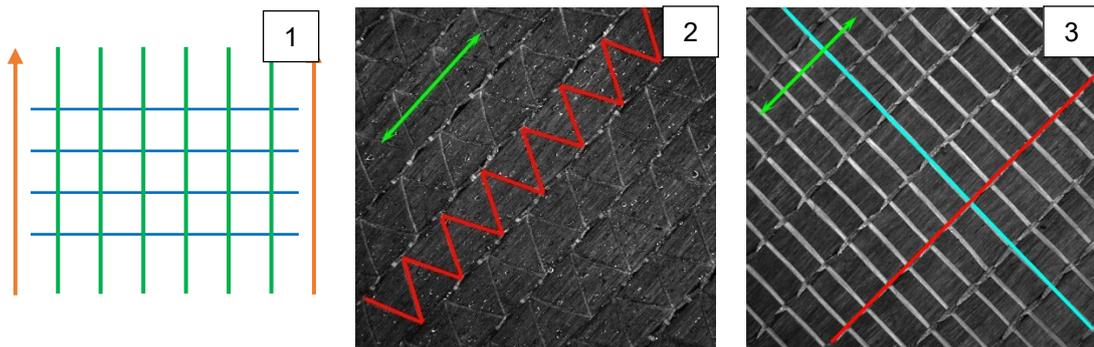
Die CF wird am Standort Wackersdorf (Deutschland) direkt oder über die Zwischenstufe CF-Tape zu textilen CF-Gelegen (CF-NCF) verwirkt (2). Je nach struktureller Anforderung werden Gelegestapel (sog. Stacks) aufgebaut, bevor sie wahlweise in den BMW-Werken Landshut oder Leipzig weiterverarbeitet werden. Beim Preformen (3) werden die noch trockenen CF-Stacks in die Zielgeometrie drapiert und auf die für den folgenden RTM-Prozess notwendige Kontur beschnitten. Abhängig von der geometrischen Komplexität der späteren Komponenten ist dem Harzinjektionsprozess das Konfektionieren vorgelagert. Mehrere Einzelpreforms werden dabei zu einem Hauptpreform kombiniert und ins RTM-Werkzeug transferiert (4). Im Anschluss an die Harzinjektion erfolgen der Endkonturbeschnitt der konsolidierten Komponente und die Oberflächenbehandlung von Klebeflächen. Abschließend werden die einzelnen CFK-Komponenten im Karosseriebau am Produktionsstandort Leipzig zu Fahrgastzellen (Life-Modul) zusammengefügt und in die Fahrzeugmontage übergeben. [20, 24, 37]

Die einzelnen Prozessschritte der PAN-basierten CF-Herstellung (vgl. Abb. 2-1 (1)) stehen nicht im Betrachtungsfokus der vorliegenden Arbeit und sind der weiterführenden Literatur zu entnehmen: [38-42]. Demgegenüber bilden die Textilherstellung (2),

das Preformen (3) und das anschließende RTM-Verfahren (4) die Ausgangsbasis für die Untersuchung des Eigenschaftsprofils von CF-NCF und werden im Weiteren detailliert vorgestellt.

2.1.1 Unidirektionales C-Faserbasiertes Gelege und Multidirektionaler Stack

Im Rahmen des Project i kommen als NCF unidirektionale CF-Gelege (UD-CF-NCF), also einaxiale verwirkte textile Flächen mit nur einer C-Fadenlage zum Einsatz. Die textile Konstruktion ist unabhängig von der verwendeten Grammaturn oder Bindungsart entsprechend dem in Abb. 2-2 (1) dargestellten Schema aufgebaut: Quer zur Carbonfaserorientierung werden die Gelege mit einem maschengerecht eingebrachten Glasfaden verstärkt. Als Wirkfaden wird ein Polyestergerarn verwendet. Die „Gelegeoberseite“ (linke Wareseite) ist in (2) und die „Gelegeunterseite“ (rechte Wareseite) ist in (3) veranschaulicht. Wirk- und Glasfaden sowie die CF-Orientierung sind hervorgehoben.



Produktionsrichtung, C-Faser, Polyestergerarn und Glasfaden

Abb. 2-2: Textile Konstruktion der verwendeten CF-NCF.

SGL ACF realisiert in Wackersdorf auf Grundlage dieser textilen Konstruktion NCF unterschiedlicher CF-Orientierung (0° , $\pm 45^\circ$ und 90° zur Produktionsrichtung) und unterschiedlicher Grammaturn (150, 300 und 600 g/m^2) als UD-CF-NCF [43].

Die Herstellung der $\pm 45^\circ$ - und 90° -CF-NCF erfolgt u. a. auf Kettenwirkmaschinen der Fa. Liba Maschinenfabrik GmbH, Naila² wie sie in Abb. 2-3 exemplarisch dargestellt ist.

² Das Unternehmen Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH, Obertshausen, zum 1. Januar 2014 die Mehrheit der Geschäftsanteile an der Liba Maschinenfabrik GmbH [44].

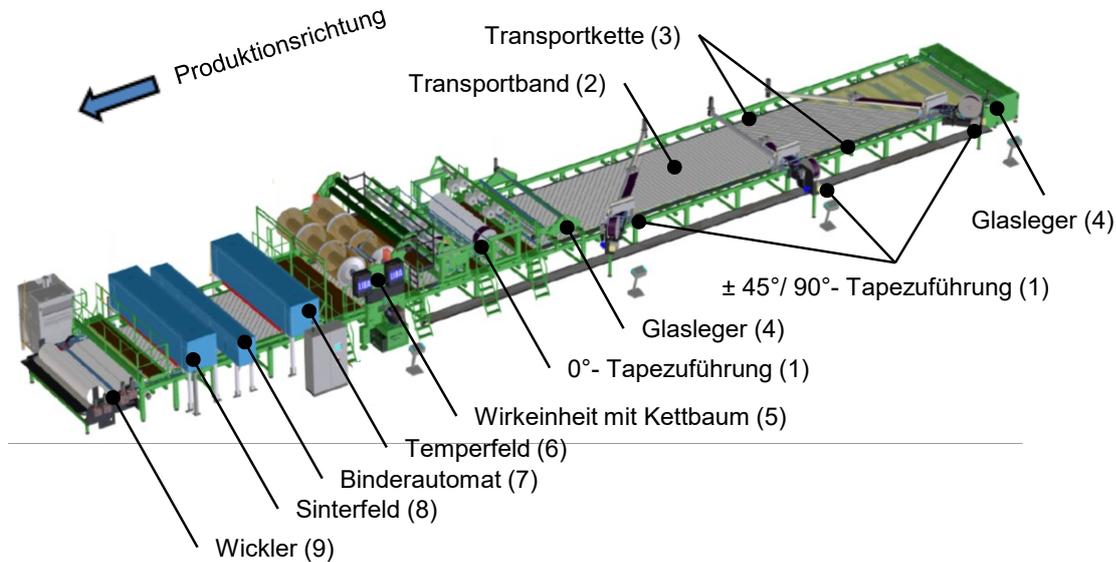


Abb. 2-3: Kettenwirkmaschine Liba Copentra Max 5 in Anlehnung an [45].

Eingangsprodukt für diese Kettenwirkmaschinen bilden je nach Maschinentyp CF-Spulen direkt oder wie hier dargestellt sog. CF-Tapes, welche in einem vorgelagerter Prozessschritt durch das „Verspreizen“ mehrerer CF-Tows hergestellt werden. Für weitere Informationen zu dieser sog. Offline-CF-Tapeherstellung sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen, z. B. [45]. Die Anzahl der eingesetzten Fadenlagen je Warenbreite definiert dabei das Flächengewicht der textilen Fläche. Die unterschiedlichen Tapezuführungen (1) in 0°, ±45°- und 90°-Richtung ermöglichen weiterhin den Aufbau von CF-Fadenlagen unterschiedlicher Orientierung³. Über die jeweilige Zuführung (1) werden einzelnen CF-Tapes von einem automatisiertem Leagesystem auf einem Transportband (2) abgelegt, wobei die einzelnen Fadenlagen (nur ±45°- und 90°-Orientierung) am Rand der Transportkette (3) durch eine Nadelklemmung fixiert werden. Ebenso ist es möglich, Glasfasern über die sog. Glasleger (4) vor- oder nachzulegen, d. h. unter- oder oberhalb der CF-Warenbahn einzubringen, bevor die Maschenbildung in der Wirkeinheit (5) mit einem Polyesterfaden, über einen Kettbaum zur Verfügung gestellt, erfolgt. Ein Temperfeld (6) relaxiert die textile Konstruktion durch Temperaturbeaufschlagung in gespanntem Zustand, um etwaigen Schrumpf nach Lösen der textilen Fläche aus der Transportkette zu vermeiden. Im nächsten Schritt wird ein Pulverbinder aufgestreut (7) und angesintert (8), um diesen

³ Im Kontext dieser Arbeit werden wie eingangs erwähnt nur einlagige, unidirektionale Gelege (UD-Gelege) verwendet, d. h. in obiger Abbildung ist immer nur eine Tapezuführung (1) aktiv, gleich wenn die Herstellung von multidirektionale Gelegen (MD-Gelege) möglich wäre.

auf dem Gelege zu fixieren. Das Bindersystem garantiert die Handlingsstabilität der textilen Fläche, ermöglicht die Verbindung der Einzellagen im nachfolgenden Stackprozess und fixiert den Preform in seiner Endkontur, siehe Kap. 2.1.3. Das fertige Gelege wird als Rollenware (9) gewickelt.

Die Produktion der 0° -CF-NCF findet dem obigen Ablauf entsprechend mit Anlagen der Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH, Obertshausen statt. Jedoch werden hier die CF-Rovings direkt in Produktionsrichtung zugeführt und online gespreizt, siehe Abb. 2-4 (A). Die Einzeltows werden dabei über sog. Spreizstäbe gezogen (1), verbreitern (spreizen) ihre Ablagefläche und bilden schließlich eine geschlossene textile Fläche, bevor diese der Wirkeinheit Abb. 2-4 (B) zugeführt werden:

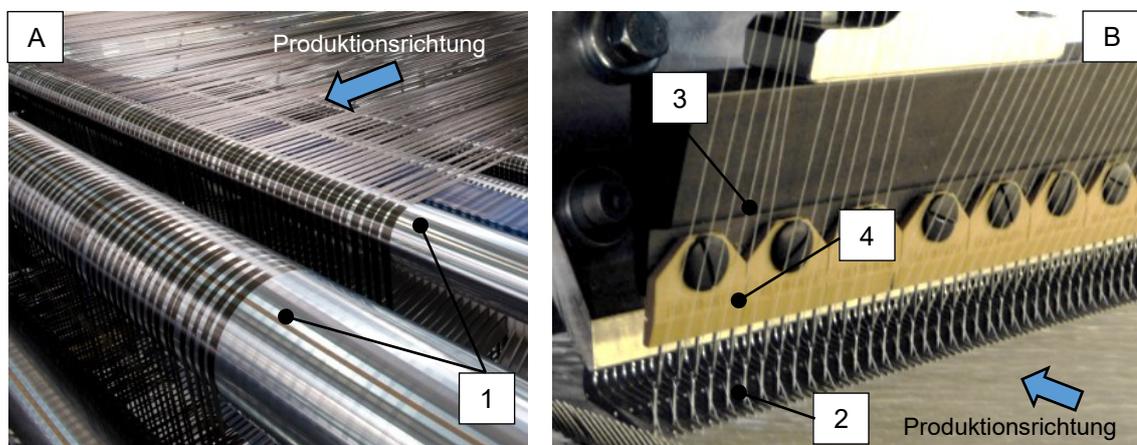


Abb. 2-4: Darstellung des Online-Spreizens (A) [46] und einer Wirkeinheit mit Nadelbarre und Legebarre einer Kettenwirkmaschine (B) [45].

Die Maschenbildung in der Wirkeinheit ist der zentrale Prozessschritt bei der CF-NCF-Herstellung. Hier entsteht das verwirkte Gelege. Im Gegensatz zum Stricken wird eine Nadelbarre (2) mit parallel nebeneinander angeordneten und gemeinsam bewegten Nadeln verwendet. Jeder Nadel ist (sind) ein (oder auch mehrere) Wirkfadensystem(e) (3) zugeordnet. Die Fadensysteme werden in der Regel von einem Kettbaum abgezogen und über die sog. Legebarre(n) (GB) (4) den Schiebernadeln zur Verfügung gestellt. Wird nun die vorgelegte Grundfläche (also das CF-Gelege) über die Transportkette in die Wirkeinheit gefördert, durchdringen hier die einzelnen Nadeln der Nadelbarre das Gelege in vertikaler Richtung. Die Legebarren (GB) übergeben den Wirkfaden abhängig von der sog. Musterung an die einzelnen Nadeln. Aus der Kombination des Nadelhubs, des Vorschubs der Gelegegrundfläche und durch den alternierenden Versatz der Fadenführer quer zur Produktionsrichtung erfolgt die Maschenbildung nicht nur in Kettenrichtung (Maschenstäbchen, MS) sondern auch in Schussrichtung (Maschenreihe, MR). Dabei wird die Grundfläche fixiert und ein handlingsstabiles Flächengebilde entsteht.

Die Masche ist dabei das wichtigste Bindungselement des Kettengewirkes. Dieses kann in unterschiedlichsten Bindungsarten ausgeführt und mit weiteren Bindungselementen ergänzt werden [47]. Typische Grundbindungen und Bindungselemente zeigt Abb. 2-5 beispielhaft.

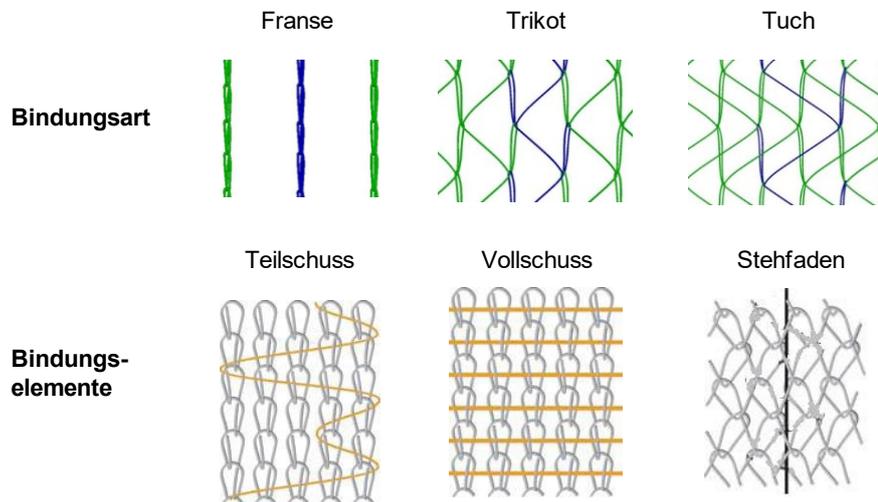


Abb. 2-5: Typische Grundbindungen und Bindungselemente [48].

Daneben können die einzelnen Grundbindungen untereinander kombiniert (sog. Kombinationsbindungen), offen oder geschlossen (also als Über- oder Unterlegung) ausgeführt und in Stichelänge und -breite variiert werden. Die sog. Nadelteilung definiert die Stichbreite (oder auch Feinheit) und das Verhältnis von Maschinendrehzahl zu Abzugsgeschwindigkeit der einzelnen Fadenlagen (gekoppelt über die Musterscheibe) gibt die Stichelänge vor. Der Variantenvielfalt sind an dieser Stelle keine Grenzen gesetzt. Einen Überblick über die Wirkerei bei technischen Textilien geben Hausding und Märtin in [49].

Es ist festzuhalten, dass ein CF-NCF erst durch die Grammatik und Orientierung des eingesetzten C-Fasermaterials, die Bindungsart des Gewirkes (dieses schließt die Legung, Feinheit, Stichelänge und die Verwendung weiterer Bindungselemente mit ein) hinreichend genau beschrieben ist. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Normen verwiesen [50-53]⁴.

⁴ Zur Abgrenzung des „Wirkens“ ggü. dem „Nähen“ sei auf [54-55] verwiesen.

2.1.2 Stackprozess

Im nächsten Verarbeitungsschritt, dem sog. Stacking, erfolgt der multidirektionale Aufbau eines CF-NCF-Stapels (MD-Stack). Abhängig von der mechanischen Beanspruchung der späteren CFK-Komponente werden einzelne UD-Gelege unterschiedlicher Faserorientierung achsensymmetrisch gestapelt. Abb. 2-6 (1) zeigt das beschriebene Schema und Abb. 2-6 (2) beispielhaft drei Lagen eines „geöffneten“ Stacks.

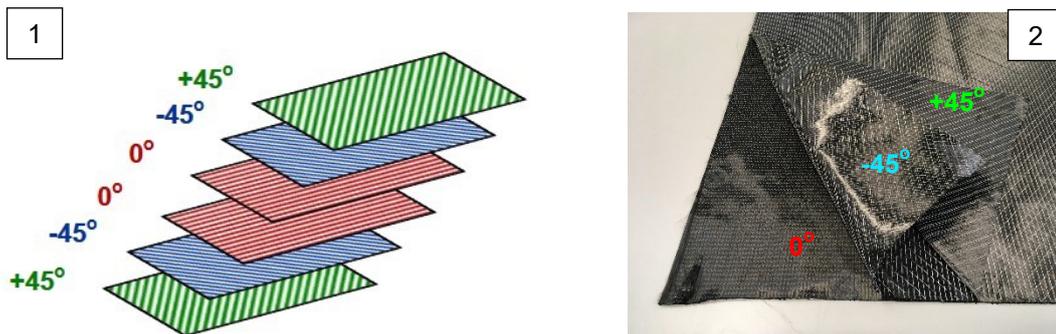


Abb. 2-6: Multidirektionaler Stack (MD-Stack) aufgebaut aus einzelnen UD-NCF.

Der Lagenaufbau wird in einer automatisierten Stackanlage realisiert, exemplarisch in Abb. 2-7 dargestellt.

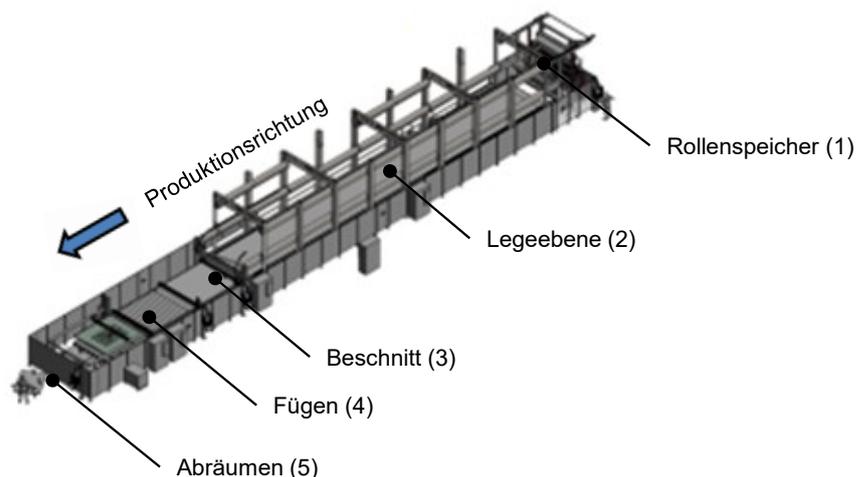


Abb. 2-7: Beispielhafte Stacking-Anlage [20].

Gelege unterschiedlicher Orientierung werden nacheinander aus einem Rollenspeicher (1) entnommen und auf einer Legeebene (2) abgewickelt und abgelegt. Anschließend schneidet ein Cuttersystem (3) aus der so entstandenen Legung bauteilabhängig

und verschnittoptimiert die Endkontur mehrerer Stacks. Jeder so dimensionierte Stack wird lokal mittels Ultraschallsonotroden gefügt (4), d. h. vertikal durch Aufschmelzen und Abkühlen des Pulverbinders verbunden. Abschließend werden die Einzelstacks in Gebinden zwischen 100 bis 400 Stacks aufgestapelt. Diese bilden das Eingangsprodukt für den nachfolgenden Umformprozess, das Preformen [20, 56].

2.1.3 Preformprozess

Das Vorformen (englisch „Preformen“) der flächigen Stacks in eine dreidimensionale Geometrie findet in einer vollautomatisierten Prozesskette statt. Den Ausgangspunkt bildet der Transfer der Stackstapel in die Preformanlage der Fa. Fill, Gurten (Österreich) und die sog. Vereinzelnung des Gebindes mittels eines Nadelgreifersystems. Hierbei wird jeweils der oberste Stack vom Stapel separiert und in ein Handlingsystem (Transfersystem) übergeben (ohne Abbildung). Daran anschließend untergliedert sich der Preformprozess in folgende sechs Teilprozessschritte, wie in Abb. 2-8 schematisch veranschaulicht:

1. Aufheizen des Stacks:
Der Stack durchläuft eine Heizstrecke (Kontaktheizfeld) mit definierter Heizzeit und -dauer abhängig vom jeweiligen Lagenaufbau. Dabei wird der Pulverbinder über die Schmelztemperatur von 150 °C (siehe Datenblatt, Abb. A-5 im Anhang) erwärmt und aufgeschmolzen. Die Fügepunkte der Einzelgelegelagen aus dem vorangegangenen Stackprozess werden damit gelöst. Die Einzellagen des Stacks sind nun relativ zueinander verschieblich.
2. Materialtransfer ins Preformwerkzeug und Einschwenken in die Werkzeugtrennebene:
Das Transfersystem übergibt den aufgeheizten Stack in das geöffnete Formwerkzeug und schwenkt in die Werkzeugtrennebene ein. Diese bezeichnet die Ebene zwischen Werkzeugoberseite (WZG-OT) und Werkzeugunterseite (WZG-UT).
3. Materialübernahme vom Transfersystem in den Spannrahmen:
Der Stack wird vom sog. Spannrahmen übernommen. Dieser positioniert den Stack im Preformwerkzeug.
4. Vordrapierung:
Mittels Absenken des Spannrahmens wird der Stack vordrapiert.
5. Hauptumformung:
Durch vollständiges Schließen des Preformwerkzeugs wird das CF-Gelege abhängig von der Topologie des Formwerkzeugs und des Spannrahmens in die Zielgeometrie gezogen. Das temperierte Formwerkzeug ($T=T_{\infty}$) kühlt den Preform ab und der Binder geht in die feste Phase über.

6. Bauteilentformung:

Ein nachgelagertes automatisiertes Greifersystem entnimmt den formstabilen Preformling und führt diesen dem Endkonturbeschnitt zu (ohne Abbildung).

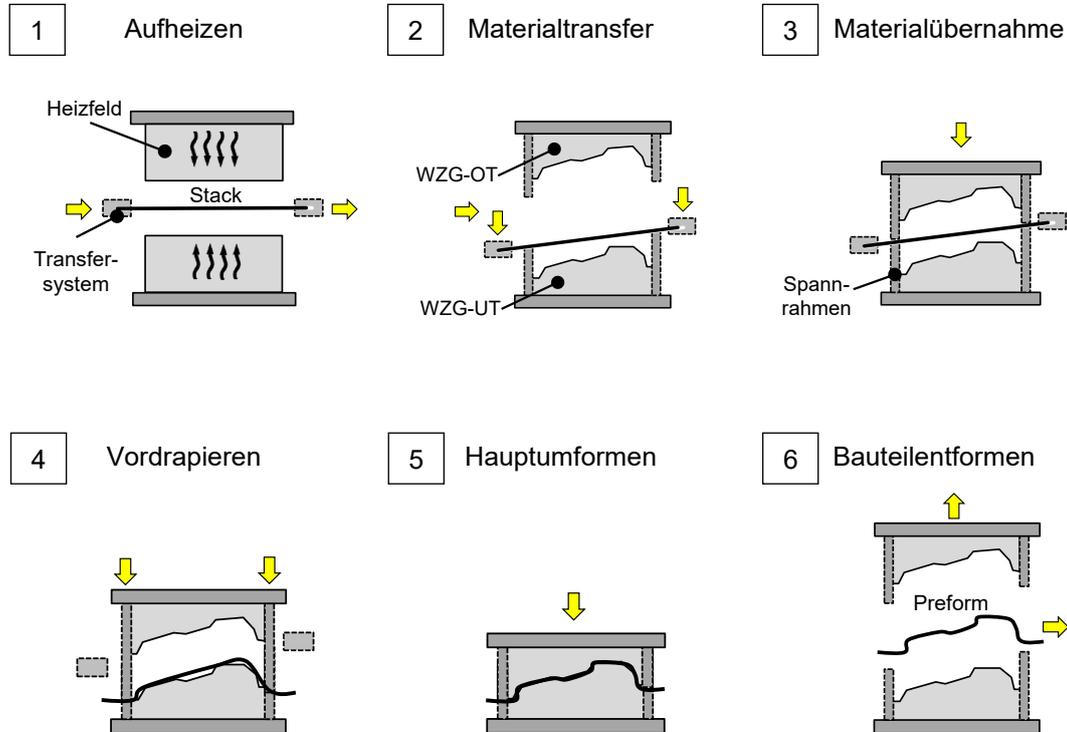


Abb. 2-8: Schema des Preformprozess bei BMW in Anlehnung an [56].

Der so entstandene Preformling behält durch die Adhäsion der Einzellagen infolge der Klebewirkung des Pulverbinders nach Erkalten des Halbzeugs seine dreidimensionale Kontur [20, 32, 56-57].

2.1.4 Resin Transfer Molding (RTM)

Der anschließende RTM-Prozess beginnt mit der manuellen Positionierung der Preforms in einer Ablagevorrichtung, dem sog. Konfektioniertisch (ohne Abbildung). Die Halbzeuge werden mittels federbelasteten Stiften und diversen Haltervorrichtungen fixiert. Besteht das spätere Bauteil aus mindestens zwei Preforms, werden die sog. Subpreforms miteinander verbunden, d. h. konfektioniert. Weiterhin können Patches, Inserts oder Verteilermedien als Fließhilfen eingebracht werden.

Der RTM-Zyklus unterteilt sich in vier Hauptschritte, wie in Abb. 2-9 schematisch visualisiert:

1. Preformeinlegen und Positionieren:
Ein teilautomatisiertes Handlingsystem nimmt den Preform vom Konfektioniertisch auf, transferiert diesen in das geöffnete RTM-Werkzeug und positioniert das Halbzeug im Werkzeugunterteil (WZG-UT). Das Werkzeug selbst wiederum ist in einer Presse der Fa. Schuler AG, Göppingen montiert.
2. Werkzeugschließen und Evakuierung:
Werkzeugoberteil (WZG-OT) und Werkzeugunterteil (WZG-UT) werden bis zu einem definierten Spalt I geschlossen (ca. +10 % der späteren Bauteilwanddicke). Im Anschluss wird die Kavität evakuiert, um Lufteinschlüsse auszuschließen.
3. Injektion, Schließen auf Zieldicke und Aushärten:
Die Injektion der Matrix in das temperierte Werkzeug (z. B. 100 °C) erfolgt volumenstromkonstant über den von Dosier- und Mischanlagen generierten Druckgradienten (Fa. KraussMaffei Group GmbH, München). Im Angusspunkt sorgt ein sog. Mischkopf für die statische oder dynamische Durchmischung der Einzelkomponenten des 2K-EP-Systems: Harz und Härter (A und B). Die einschießende Matrix durchtränkt das Faserhalbzeug im Formnest entlang im Werkzeug eingebrachter Angusskanäle hin zu den Werkzeugentlüftungen. Sensor- oder zeitgesteuert werden diese verschlossen. Nach der Füllung wird die Injektion beendet und die Zieldicke des Bauteils (definierter Spalt II) durch das Schließen mit der maximalen Pressenkraft (36.000 kN) realisiert.⁵ Die Aushärtung der Matrix beginnt bereits beim Mischen der Einzelkomponenten. Durch die Vernetzungsreaktion geht die Matrix vom niederviskosen in den festen Zustand über.

⁵ Die Imprägnierung bei niedrigen Faservolumengehalten und somit hoher Durchlässigkeit des Faserhalbzeugs begünstigt die Injektion [58]

4. Entformen und Reinigung:

Ist das Epoxid formstabil vernetzt, wird das Werkzeug geöffnet. Das konsolidierte Bauteil wird mittels werkzeugseitigen Auswerfern entformt und durch ein Handlingsystem in einer Abkühlvorrichtung positioniert. Abschließend erfolgt die Reinigung der Kavität und die Weitergabe der CFK-Komponente an die Folgeprozesse (Qualitätsprüfung, ggf. Tempern, Beschneiden, etc.).

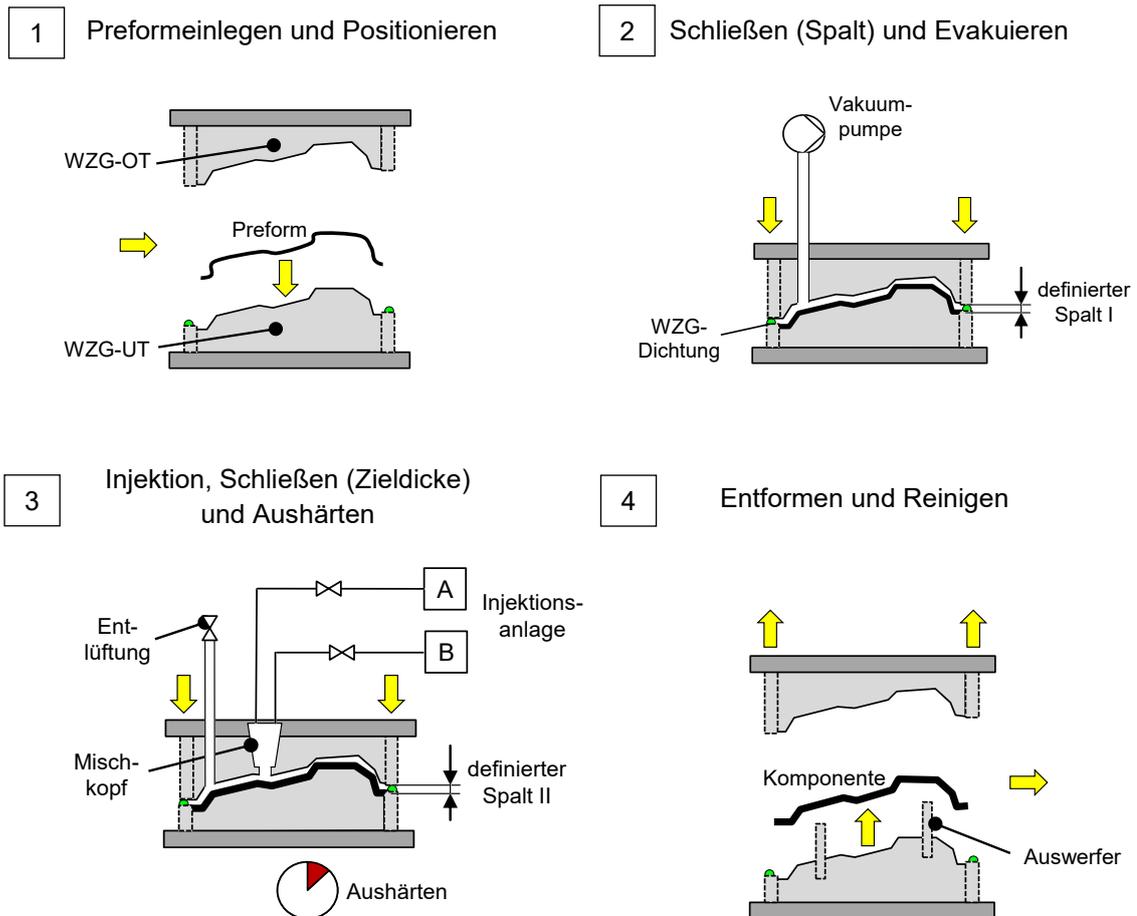


Abb. 2-9: Schema des RTM-Prozesses bei BMW in Anlehnung an [20].

Während der Harzinjektion werden die auftretenden Kavitätensinnendrucke von piezoelektrischen Sensoren erfasst. Abb. 2-10 zeigt einen charakteristischen Forminnen-druckverlauf eines vollständig imprägnierten Bauteils. Aufgetragen ist die Druckänderung über die einzelnen RTM-Zyklusphasen: Evakuierungsphase (1), Injektionsphase (2), Nachdruckphase (3) und Aushärtephase (4).

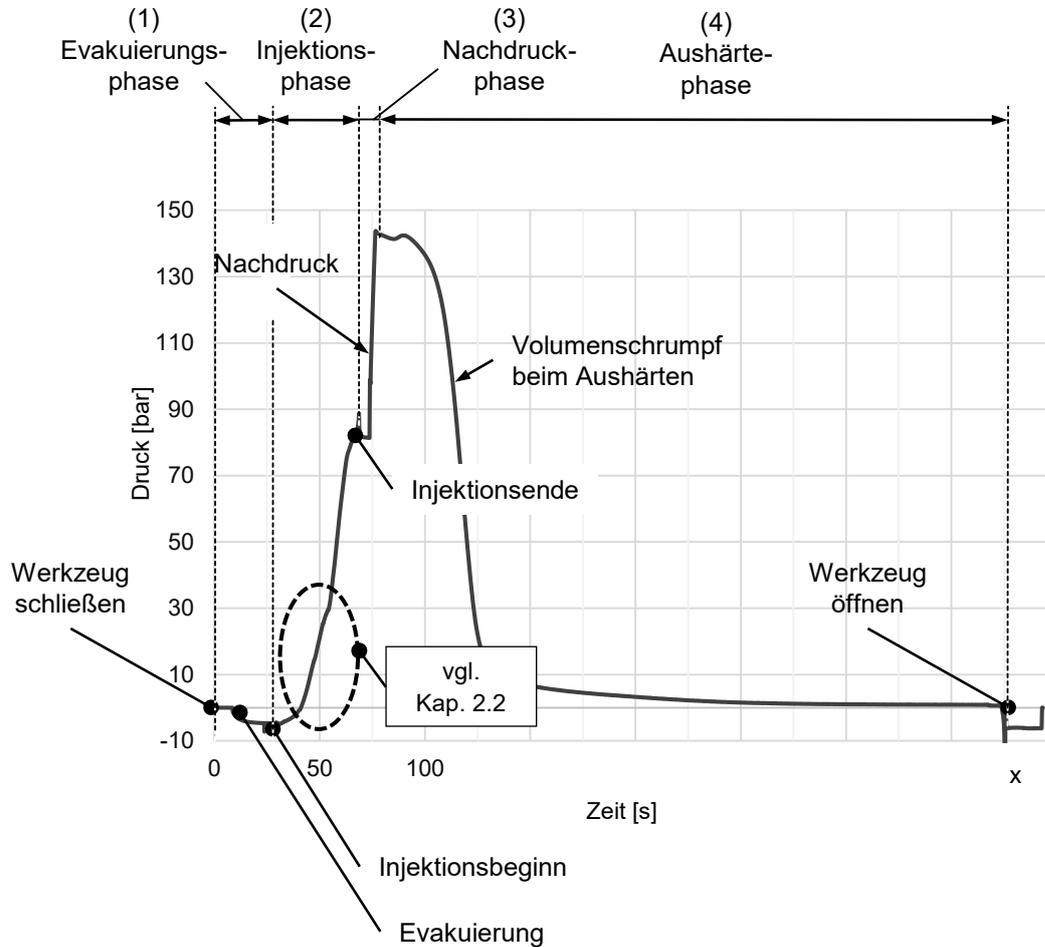


Abb. 2-10: Repräsentativer Forminnendruckverlauf der RTM-Hochdruckinjektion.

Anhand des aufgezeichneten Druckgradienten lassen sich die einzelnen Prozessphasen exakt ableiten. Im ersten Bereich (1) wird die Kavität geschlossen und evakuiert, es entsteht ein Unterdruck. Bei Erreichen eines definierten Werkzeuginnendrucks p_{mold} (z. B. 0,1 bar Absolutdruck) erfolgt die Injektion mit konstantem Austragsvolumen Q und mit dieser einhergehend der entsprechende Forminnendruckanstieg bis 80 bar (2). Die anlagenseitige Druckbegrenzung der Injektionsanlage (100 bar) oder aber hier die Austragsmengenbegrenzung beendet den Injektionsvorgang nach Erreichen des zur vollständigen Komponentenfüllung notwendigen Matrixvolumens. Die weitere Druckerhöhung im Formnest ist in der Nachdruckphase (3) begründet, wenn die Kavität auf die Komponentenzielstärke geschlossen wird, um den spezifizierten Faservolumengehalt (FVG) zu erreichen. Der Druckabfall in der Aushärtephase (4) ist mit der beginnenden exothermen Vernetzungsreaktion der Matrix zu erklären. Während der Aushärtung stellt sich abhängig vom Matrixsystem ein diskreter Bauteilschwund ein. In einem geschlossenen System, hier der Kavität, muss der Systeminnendruck daher abnehmen.

Das Öffnen des Werkzeugs beendet den RTM-Zyklus, es entsteht ein kurzzeitiger Unterdruck. Der beschriebene Ablauf ist repräsentativ für die im RTM-Verfahren hergestellten CFK-Komponenten des Project i [20, 32, 56-57].

Abb. 2-11 kategorisiert die Einzelkomponenten des i3-Life-Moduls nach deren Herstellungsverfahren. Es wird zwischen Bauteilen unterschieden, die im RTM-Verfahren oder anderen Herstellungsverfahren, z. B. Nasspressen (engl. Liquid Composites Compression Molding, LCCM) u. a., realisiert werden. Weiterhin ist das für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit gewählte „Bodenelement“ visualisiert. Der in der vorhergehenden Abb. 2-10 diskutierte Forminnendruckverlauf entstammt dem Injektionsprozess der unten hervorgehobenen Komponente.

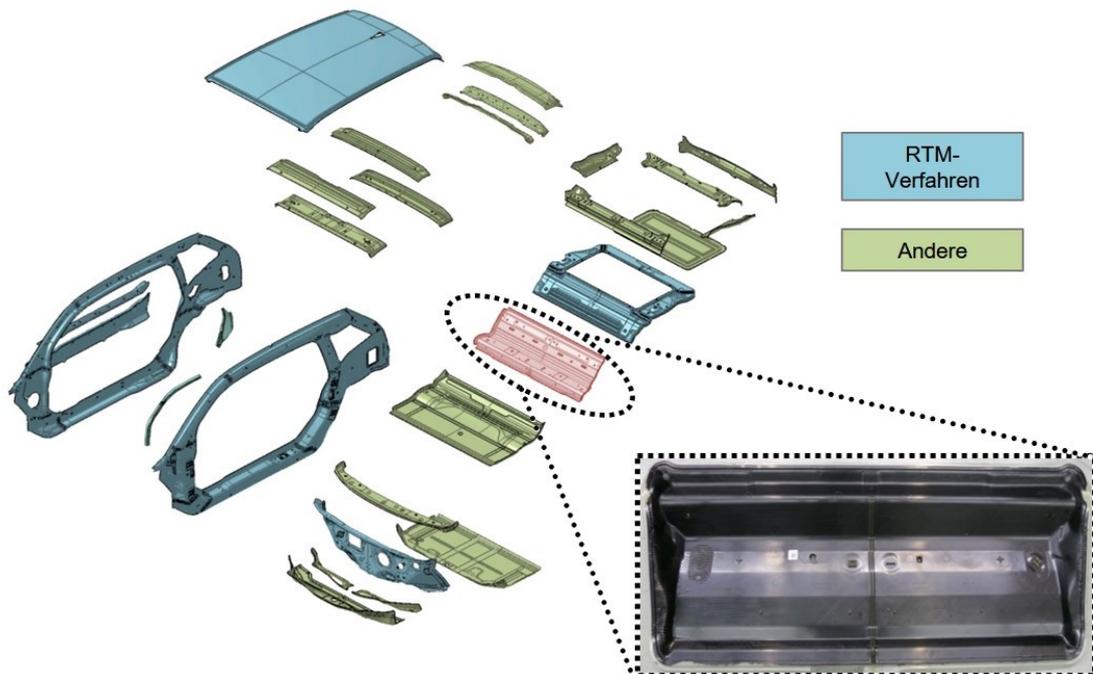


Abb. 2-11: Explosionszeichnung Life-Modul i3 in Anlehnung an [20] und das untersuchte „Bodenelement“.

2.1.5 Fazit: Randbedingungen und Vorgaben

Die vorgestellte Prozesskette stellt die Rahmenbedingungen für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit dar. Diese lassen sich gemäß Tab. 2-1 in produkt- und prozessseitige Randbedingungen zusammenfassen:

Tab. 2-1: Übersicht der gegebenen produkt- und prozessseitigen Randbedingungen.

Produkt bzw. Prozessschritt	Gegebene Randbedingung
<ul style="list-style-type: none"> • Produkt: <ul style="list-style-type: none"> ○ Precursor ○ C-Faser ○ CF-NCF ○ Stack ○ Matrix 	
	PAN
	50 K, Heavy Tow
	Unidirektional (UD): 0°, ±45° und 90° Flächengewicht: 150, 300 und 600°g/m ²
	Multidirektional (MD), achsensymmetrisch
	Duroplast, Epoxidharz
<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitungsprozess: <ul style="list-style-type: none"> ○ Umformverfahren ○ Imprägnierverfahren 	
	Preformen mit Binder
	HD-RTM

Neben den in Kap. 1.1 genannten Prämissen hinsichtlich Stückzahl (>30.000) und Zykluszeit (< 10 min.) spezifizieren nach abgeschlossener Fahrzeugauslegung noch zusätzlich weitere, nicht variierbare Vorgaben das Prozessfenster im RTM-Verfahren. Diese sind zur Sicherstellung der mechanischen Eigenschaften der einzelnen CFK-Komponenten nicht veränderbar und müssen daher bei den folgenden Untersuchungen ebenfalls berücksichtigt werden:

- Der FVG, der Lagenaufbau und die Geometrie der jeweiligen Komponente ist festgelegt:
Neben dem FVG ($V_{f,tar} \geq 53\%$) ist auch die Orientierung der Einzellagen in einer Komponente durch funktionale Anforderungen spezifiziert. Ebenso sind Radienübergänge, Dickenschwankungen und –sprünge, also die Geometrie des Bauteils, vorgeben. Weiterhin ist die Angussstrategie unveränderlich. Im vorliegenden Fall wird ein Punktanguss mit Verteilerkanal gewählt, siehe auch Kap. 3.2.2.2).
- Die Rezeptur des verwendeten Matrixsystem ist spezifiziert:
Diese umfasst neben dem Typ auch das Mischungsverhältnis der eingesetzten Matrixbestandteile: Harz, Härter und ggf. Trennmittel. D. h. die stöchiometrischen Koeffizienten (v_i) der Einzelkomponenten sind festgelegt.
- Das Prozessfenster im RTM-Prozess ist definiert:
Eingesetzt wird eine vakuumunterstützte Hochdruckinjektion mit Spaltimprägnierung. Weiterhin sind im speziellen die Parameter Zykluszeit (t), Werkzeug- und Harztemperatur (T_{mould} und T_{fluid}) festgelegt. Alle genannten Parameter nehmen Einfluss auf die funktionalen Eigenschaften des FVK, insbesondere auf die Glasübergangstemperatur (T_g) sowie den Vernetzungsgrad der Matrix und

sind daher nicht variierbar. In der Folge ist der Viskositätsverlauf der Matrix bei der Injektion gegeben ($\mu_{fluid} = f(v_i, t, T) = \text{const.}$)

Als Konsequenz aus diesen Prämissen sind Verdüsungsdrücke bis ca. 110 bar im Mischkopf und Austragsleistungen (Q) bis zu 100 g/s notwendig, um die Imprägnierung des Preforms mit der Matrix zu realisieren. Folglich werden Werkzeuginnendrucke zwischen 80 und 100 bar erreicht. Dies erfordert bei den realisierten Bauteilgeometrien eine pressenseitige Niederhaltezeit von 36.000 kN (Stößelkraft). Die Schusszeit liegt zwischen 30 bis 60 s und die Aushärzeit nach Schussende liegt bei einem temperierten Werkzeug zwischen 180 und 360 s. Darüber hinaus sind die Heizfeldtemperatur beim Preformprozess mit 215 °C und die bei der Gelegeherstellung applizierte Bindermenge mit 10 bzw. 12,5 g/m² ($\pm 20\%$) vorgegeben [20, 59-60]. Tab. 2-2 fasst die im Rahmen der Analysen gewählten Vorgaben zusammen:

Tab. 2-2: Übersicht der definierten Vorgaben im vorliegenden RTM-Verfahren.

Prozessparameter bzw. Produkteigenschaften	Vorgabe
<ul style="list-style-type: none"> • Prozessparameter RTM: <ul style="list-style-type: none"> ○ Zykluszeit < 10 min ○ Temperatur WZG (T_{mold}) und Matrix (T_{fluid}) 100 °C / 100 °C ○ Pressenkraft 36.000 kN ○ Verdüsungsdruck am Mischkopf ≤ 110 bar ○ Austragsleistung (Q) 25 – 100 g/s ○ Kavitätinnendruck: <ul style="list-style-type: none"> ○ infolge Injektionsdruck ≤ 100 bar ○ infolge Nachdruck beim Werkzeugschließen ≤ 150 bar ○ Injektionszeit 30 – 60 s ○ Aushärzeit 180 – 360 s ○ Angusskonzept Punktanguss mit Verteilerkanal ○ Angelegtes Vakuum 0,1 bar (absolut) ○ Mischungsverhältnis Matrixkomponenten (v_i) 100:19 • Produkteigenschaften der CFK-Komponente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Viskositätsverlauf Matrixsystem (μ_{fluid}) const., siehe Kap. 3.1.2 ○ Vernetzungsgrad und T_g const. ○ Faservolumengehalt ($V_{f,tar}$) ≥ 53 % (strukturelle Anwendung) • Weitere: <ul style="list-style-type: none"> ○ Heizfeldtemperatur Preform max. 215 °C ○ Eingesetzte Bindermenge auf CF-NCF 10 bzw. 12,5 g/m² (± 20 %) 	

2.2 Ausgangsbasis und Imprägniermechanismen von textilen Halbzeugen

Injektionsversuche am Bodenelement⁶ (vgl. Abb. 2-11, Kap. 2.1.4) unter den im vorangegangenen Abschnitt (Kap. 2.1.5) vorgestellten Randbedingungen und Vorgaben zeigen ein inkohärentes Bild in der erzielten Bauteilgüte hinsichtlich ihrer Matrixfüllung. Preforms gleicher Architektur (bezogen auf textile Parameter und Lagenaufbauten) liefern bei der Injektion mit unveränderten RTM-seitigen Prozessparametern nur teilweise wie auch vollständig imprägnierte Komponenten.

Die Gegenüberstellung der erzielten Bauteilgüten und der korrespondierenden Forminnendruckprofile zeigen einen Zusammenhang auf. Denn gerade der Gradient der Injektionsphase (vgl. Abb. 2-10 (2) im vorangegangenen Kap. 2.1.5) korreliert mit dem erzielten Injektionsergebnis, siehe Abb. 2-12. Hier wird der für die weiteren Analysen relevante Bereich des Druckverlaufs in der Vergrößerung dargestellt:

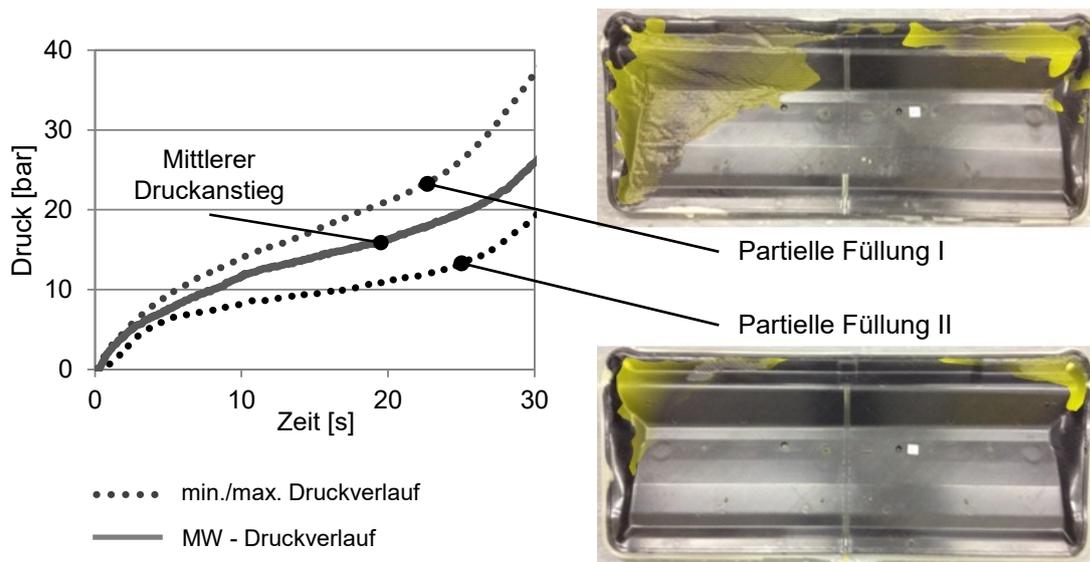


Abb. 2-12: Forminnendruckverlauf und Korrelation zu erzielter Bauteilfüllung.

Links ist der Forminnendruckanstieg zu Beginn der Injektionsphase (0 bis 30 s) unterschiedlicher Bauteile dargestellt⁷, rechts die entsprechend exemplarisch erzielte Bau-

⁶ Ausgangsbasis dieser Voruntersuchungen ist ein fünfzügiger Aufbau (5/6/2/6/5, mit NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-6.1 injiziert im Bodenwerkzeug. Die spezifischen Material- und Versuchsaufbauten werden in Kap. 3 detailliert.

⁷ Der Werkzeuginnendruck p_{mould} ist auf 0 bar tariert, auch wenn reell zu Injektionsbeginn ein Unterdruck von 0,9 bar anliegt.

teilgüte. Die nicht benetzten, trockenen Bereiche der abgebildeten Komponenten sind „gelb“ hinterlegt. Neben dem Mittelwert („MW-Druckverlauf“) der Druckkurven von 30 untersuchten Bauteilen ist zusätzlich deren Streubreite aufgetragen („min./max. Druckverlauf“, gepunktete Graphen). Oberhalb des mittleren Druckverlaufs stellt sich demnach eine partielle Preformimprägnierung, Partielle Füllung I (PF I), unterhalb eine weiter fortgeschrittene Füllung, Partielle Füllung II (PF II) ein.

Die Resultate legen den Schluss nahe, dass ein geringerer Druckanstieg eine längere Imprägnierzeit bis zum Erreichen des Druckmaximums sicherstellt und den damit einhergehenden Injektionsabbruch (100 bar) durch die Injektionsanlage verzögert. Ein höheres injiziertes Matrixvolumen und eine ausgeprägte Bauteilfüllung sind die Folge. So wird im Fall der vollständigen Imprägnierung eines Preforms die anlagenseitige Druckbegrenzung nicht erreicht und der Imprägniervorgang erst nach Erreichen des kalkulierten Harzvolumens, also der vollständigen Tränkung der Komponente, beendet. Dieser Zusammenhang lässt sich entsprechend Gleichung (2-1) beschreiben:

$$\frac{dp_{mould,PF I}}{dt} > \frac{dp_{mould,PF II}}{dt} \Leftrightarrow PF I < PF II \quad (2-1)$$

mit: p_{mould} Absoluter Druck in der Werkzeugkavität

$PF I, II$ Partielle Füllung I, Partielle Füllung II

Daraus resultierend wird der Druckgradient beim Injektionsvorgang für die folgenden Untersuchungen als messbarer Parameter für das Maß der Komponentenfüllung herangezogen. Die Effekte aber, die zu der beobachteten Spreizung in der erzielten Komponentenimprägnierung führen, gilt es in der Folge zu analysieren.

Um die Imprägniermechanismen, die den Druckverlauf beeinflussen, zu untersuchen, sind unterschiedliche Analyseebenen eines textilen Halbzeugs bekannt. Nach Loendersloot [61] können diese Ebenen, wie in Abb. 2-13 veranschaulicht, definiert werden:

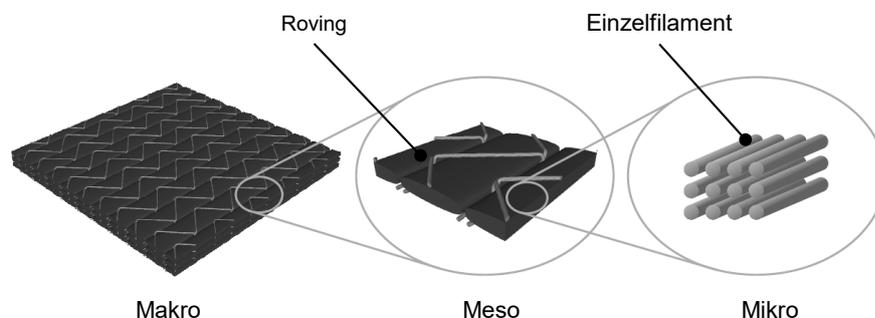


Abb. 2-13: Makro-, Meso- und Mikrodarstellung eines CF-NCF in Anlehnung an Loendersloot [61] editiert von Dix [62].

Der makroskopische Bereich umfasst hier die textile Fläche global, d. h. deren Grammatik, Faserorientierung und textile Konstruktion. Demgegenüber nimmt die Mesoebene Bezug auf mehrere benachbarte Einzelrovings. Die Mikroebene beschreibt die Interaktionen innerhalb eines Rovings auf Faserebene.

Auf makroskopischer Ebene ist die Tränkung des Faserbetts eine Folge aus dem Druckgefälle zwischen Anguss und Kavität, also rein hydrostatisch, wohingegen auf meso- und mikroskopischer Injektionsebene neben der hydrostatisch getriebenen Imprägnierung kapillarkraftinduzierte Benetzungsvorgänge ablaufen. Beide Phänomene und deren Zusammenhang lassen sich modellhaft mathematisch wie folgt beschreiben: [63]

2.2.1 Die makroskopische Betrachtungsweise

Die Basis für den Harzfluss im RTM-Verfahren ist zunächst die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\nabla(\rho \cdot \mathbf{v}) \quad (2-2)$$

mit: $\rho, t, v_{x,y,z}$ Dichte, Zeit und Geschwindigkeitsvektor

\mathbf{v}, ∇ Geschwindigkeitsvektor und Differentialoperator

Bei inkompressiblen Fluiden, d. h. bei konstanter Dichte, vereinfacht sie sich zu:

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \quad (2-3)$$

Weiterhin beschreibt die allgemeine Navier-Stokes-Gleichung die Strömung Newtonscher Fluide (in guter Näherung ein Harzsystem):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \mathbf{v}) + \nabla(\rho \cdot \mathbf{v}^2) = -\nabla \cdot \mathbf{p} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \cdot \mathbf{g} \quad (2-4)$$

mit: $\boldsymbol{\tau}, \mathbf{g}$ Schubspannung, Erdbeschleunigung

Diese Gleichung lässt sich durch Vernachlässigung der Trägheitskräfte (sehr gering gegenüber der Druckdifferenz und den Reibungskräften, siehe Term linke Seite) mit dem Newtonschen Ansatz (siehe Gleichung (2-5))

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (2-5)$$

mit: τ, μ Schubspannung, dynamische Viskosität

zu Gleichung (2-6) vereinfachen. Es verbleiben die Terme für Oberflächenkräfte, Reibung und Gravitationskraft (siehe rechte Seite der Gleichung (2-4)).

$$-\nabla p - \mu \nabla \nabla \mathbf{v} + \rho \cdot \mathbf{g} = 0 \quad (2-6)$$

Mit der Lösung der Differentialgleichung durch Integration ergibt sich schließlich Gleichung (2-7), das Gesetz von Darcy:

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} (\nabla p - \rho \cdot \mathbf{g}) \quad (2-7)$$

mit: \mathbf{K} Integrationskonstante, der Permeabilitätstensor

Durch die Vernachlässigung der Gravitationskraft resultiert die für das RTM-Verfahren relevante Form:

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla p \quad (2-8)$$

In dieser Form sind die Eigenschaften des festen Körpers (Faserhalbzeug), die Permeabilität K , sowie die des Fluids (Harzsystem), nämlich die dynamische Viskosität μ , getrennt. Die Permeabilität K beschreibt dabei die Durchlässigkeit eines porösen Mediums (im Fall der RTM-Injektion die Durchlässigkeit des Preforms) gegenüber einem strömenden Fluid (der Matrix)⁸. [42, 63-65]

Wird das Gesetz von Darcy (2-7) mit der Kontinuitätsgleichung (2-2) kombiniert, ergibt sich die Grundgleichung zur Fließfrontberechnung: [63]

$$\nabla \left(\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (2-9)$$

⁸ Die Einheit der Permeabilität ist historisch bedingt „Darcy“, wobei übertragen ins metrische System gilt: 1 Darcy = $0,986923 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. In der Praxis ist die Verwendung von $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ hinreichend genau. [66]

In der Realität ist der zu injizierende Preform anisotrop. Bedingt durch diese Anisotropie des Faserhalbzeugs ist der Permeabilitätstensor K vollständig besetzt. Mit der Annahme eines linear orientierten Faserstrangs kann das Halbzeug als transversal isotrop, also orthotrop angesehen werden, wodurch die Nebenrichtungen K_{xy} , K_{xz} und K_{yz} zu null werden⁹. Weiterhin wird die Hauptrichtung der höchsten Permeabilität mit K_{11} , die der zweithöchsten als K_{22} und die der transversalen mit K_{33} bezeichnet. Somit lässt sich der Permeabilitätstensor vereinfacht als Diagonalmatrix schreiben: [67]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & & \\ & K_{22} & \\ & & K_{33} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

In Abb. 2-14 ist der Fließfrontverlauf in einem anisotropen Textil skizziert:

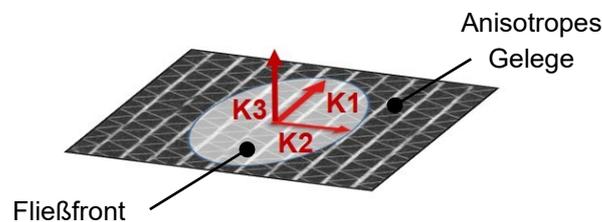


Abb. 2-14: Schematische Darstellung des Fließfrontverlaufs bei anisotropen Textilien.

Weiterhin ist die Permeabilität eine Funktion des FVG V_f . Dieser ist definiert als das Verhältnis von Faseranteil V_{faser} zu Gesamtvolumen V_{ges} des Verbundbauteils: [64]

$$V_f = \frac{V_{faser}}{V_{ges}} \quad (2-11)$$

Zusammenfassend gilt das Gesetz von Darcy bei:

- stationärer Strömung eines inkompressiblen, Newtonschen Fluids
- Vernachlässigung der Gravitation und der Trägheitskräfte im Fluid
- laminarer, gesättigter (Vernachlässigung von Kapillarkräften) Strömung chemisch inerte Fluide

Wird Gleichung (2-8) um das vom Harz zu durchströmende Volumen erweitert, ergibt sich folgende auf dem Gesetz von Darcy basierende Gleichung für den Matrixvolumenstrom Q in ein Faserhalbzeug: [64]

⁹ Genauso sind die hauptachsensymmetrischen Tensoren K_{yx} , K_{zx} und K_{zy} auf null zu setzen.

$$Q = - \frac{A \cdot K}{\mu \cdot l} \Delta p \quad (2-12)$$

mit: Q Matrixvolumenstrom, Fließrate oder Austragsleistung

A, l Querschnitt der durchströmten Fläche, dessen Länge

Zur Veranschaulichung stellt Abb. 2-15 die oben beschriebenen Mechanismen anhand einer ebenen, rechteckigen Kavität der Länge l , Breite b und Höhe h dar. Diese ist mit einem Faservolumen V_f eines Preforms gefüllt, der eine Permeabilität K aufweist. Injiziert wird ein Fluid mit der Viskosität μ bei einem Volumenstrom Q . Am Anguss liegt der Druck p_{ein} und an der Entlüftung der Druck p_{aus} an.

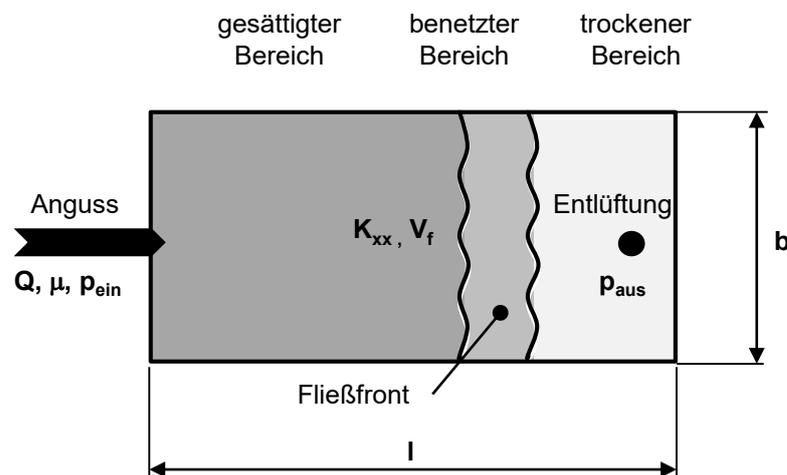


Abb. 2-15: Schematische Darstellung der Injektionsmechanismen einer rechteckigen Platte.

Im idealen Fall sind die Parameter $\mu, l, A (= h \cdot b)$ und K über den Injektionsprozess nicht veränderlich. Hiermit ergeben sich unter Berücksichtigung von Gleichung (2-12) grundsätzlich zwei Injektionsstrategien: die Injektion mit konstantem Druckniveau ($\Delta p = const.$) oder mit konstanter Austragsleistung ($Q = const.$). Im ersten Fall wird ein konstanter Druck angelegt. Der Volumenstrom ergibt sich aus dem entsprechenden Druckabfall abhängig von der Position der Fließfront über den zeitlichen Verlauf der Injektion. Im zweiten Fall ist der Druckabfall vom Anguss zur Position der Fließfront als linear fallend anzunehmen und steigt mit fortschreitender Fließfront proportional über die Injektionsdauer (theoretisch) ins Unendliche. In der Realität sind die Leistungsgrenze der Injektionsanlage und die verfügbare Pressenkraft die Obergrenze. Die Imprägnierversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden mit konstanter Austragsleistung durchgeführt. [64]

2.2.2 Die meso- und mikroskopische Betrachtungsweise

Zusätzlich wird die Benetzung der Preforms durch die Kapillarwirkung der eingesetzten Faserhalbzeuge überlagert. Dieser sog. ungesättigte Anteil der Permeabilität tritt bei der Erstimpregnierung des Faserhalbzeugs – der Benetzung – auf. In der vorangegangenen Abb. 2-15 ist neben dem gesättigten und trockenen Faserbereich eine weitere Zone skizziert, der „benetzte Bereich“. In dieser ungesättigten Übergangszone befindet sich zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt die Position der Fließfront. Abhängig von der Betrachtungsweise laufen hier unterschiedliche Effekte ab:

Aus mikroskopischer Sicht kommt es bei der Berührung eines Fluids mit einem Festkörper abhängig vom Verhältnis der Kohäsionskräfte innerhalb des Fluids und der Adhäsionskräfte zum festen Körper zur Benetzung. Das Verhältnis zwischen den auftretenden Oberflächenspannungen der drei Phasen Fluid (das Harz), Festkörper (die C-Faser) und Gas (die verbleibende Luft in der Kavität) gibt der Kontaktwinkel wieder. Er lässt sich mit der Young'schen Gleichung ausdrücken: [68-69]

$$\cos \vartheta_c = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LG}} \quad (2-13)$$

mit:	σ_{SG}	spez. Oberflächenspannung, Festkörper zum umgebenden Gas
	σ_{LS}	spez. Oberflächenspannung, Festkörper und berührendes Fluid
	σ_{LG}	spez. Oberflächenspannung, Fluid zum umgebenden Gas
	ϑ_c	Kontaktwinkel

Die Differenz aus der Oberflächenspannung σ_{SG} und der Grenzflächenspannung σ_{LS} ist als Haftspannung definiert. Im ebenen, horizontalen Fall ergibt sich der für das RTM-Verfahren relevante, resultierende Kapillardruck zu [70-71]:

$$\Delta p_c = \frac{2\sigma_{LG}}{r_c} \left(\frac{\Phi_s}{1 - \Phi_s} \right) \cos \vartheta_c \quad (2-14)$$

mit:	Δp_c	Kapillardruck
	Φ_s	Porosität der festen Phase
	r_c	hydraulischer Radius

Wobei sich der hydraulische Radius als Quotient aus durchströmter Querschnittsfläche und benetztem Umfang des zu imprägnierenden Körpers ergibt. Dies hat zur Folge, dass sich bei einem geringen Faserdurchmesser ein geringer hydraulischer Radius und demnach ein hoher Kapillardruck einstellt. Bei der Imprägnierung des C-Faserbündels (50K-Roving!) mit Harz wirken daher Kapillareffekte.

Auf mesoskopischer Ebene läuft die Imprägnierung entlang der sog „Engineered Gaps“ ab. Diese bezeichnen den Spalt zwischen den Einzelrovings in einem NCF, der sich beim Verwirken der CF-Fadenlagen einstellt und entlang dem das Harz bei der Injektion strömt, siehe Abb. 2-16. Den Einfluss dieser Gaps verdeutlicht die modellhafte Betrachtung des NCF als eine geschlossene Fläche, die von Fließkanälen (FK) durchzogen ist. Wird ein stationäres, laminares Strömungsprofil zugrunde gelegt und der Querschnitt eines FK als näherungsweise kreisrund angenommen, kann der Harzfluss mit dem Hagen-Poiseuille-Gesetz beschrieben werden:

$$Q = \frac{\pi r_{FK}^4}{8\mu} \frac{\Delta p}{l} \quad (2-15)$$

mit:	Q	Matrixvolumenstrom im FK
	μ	dynamische Viskosität des Fluids
	$\Delta p, l$	Druckdifferenz zw. Ein- und Ausgang und Strömungslänge
	r_{FK}	Radius des Fließkanals zwischen zwei Rovings

Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 2-16 die Kombination aus Meso- (im Fließkanal zwischen den Einzelrovings) und Mikrofluss (innerhalb eines Rovings). Die horizontalen Pfeile zeigen die Hauptflussrichtung des Fluids an, die vertikalen den transversalen Fluss. Im hydrostatisch dominierten Fall (1) (Mesofluss > Mikrofluss) werden die Rovings ausgehend vom Fließkanal imprägniert und im vom Kapillardruck dominierten Fall (2) (Mikrofluss > Mesofluss) umgekehrt.

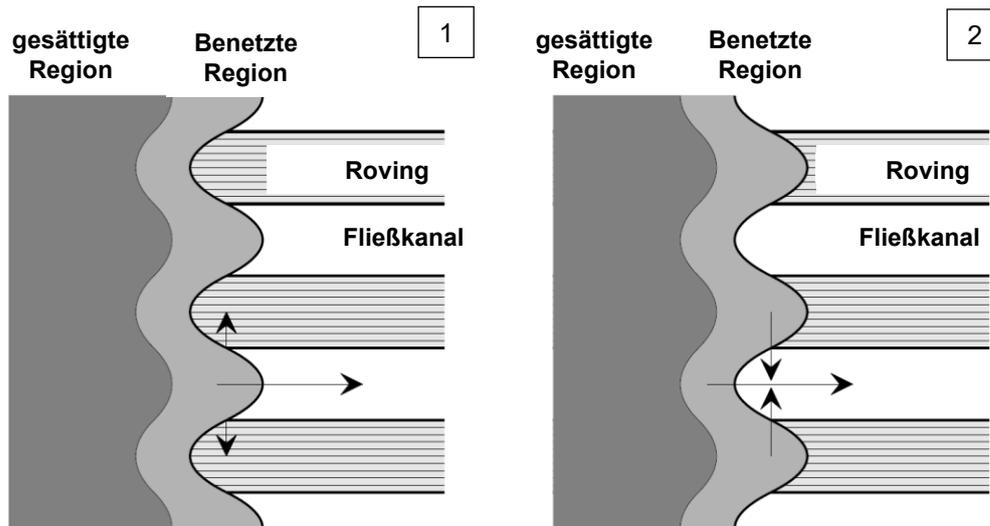


Abb. 2-16: Schematische Darstellung der hydrostatisch (1) und kapillar (2) dominierten Benetzung nach Loendersloot [72].

Analog zu Abb. 2-15 (vorangegangener Abschnitt) wird in Abb. 2-16 zwischen einer gesättigten und einer ungesättigten (benetzten) Region unterschieden. Im vollständig imprägnierten Bereich ist die Gasphase (Luft) nicht mehr vorhanden. Der Kontakt zwischen Fluid (Matrix) und festem Körper (C-Faser) hat bereits stattgefunden. Es wirken keine Kapillarkräfte mehr. Die oben beschriebenen Effekte laufen also nur in der benetzten Region ab. Dabei wird der hydrostatische Druck vom Kapillardruck überlagert und scheint damit höher als der angelegte Injektionsgradient zu sein. Somit ist die Permeabilität in der Theorie tatsächlich druckabhängig und macht daher die Unterscheidung zwischen gesättigter und ungesättigter Permeabilität notwendig. In der Folge ist die effektive Permeabilität in einem trockenem Faserhalbzeug höher als in einem bereits durchtränkten Preform [63,73].

Schell bescheinigt der Meso- und Mikropermeation einen großen Einfluss auf die Laminatqualität [64, 74]. Der resultierende Kapillardruck liegt jedoch nach Connor bei max. -10 kPa und ist im Verhältnis zu den beim makroskopischen Injektionsvorgang herrschenden Drücken des hier untersuchten HD-RTM-Prozess von bis zu 10.000 kPa vernachlässigbar [70]. Demgegenüber ist mit Blick auf das vorangegangene Hagen-Poiseuille-Gesetz (Gleichung (2-15)) im hydrostatischen Fall bemerkenswert, dass neben der Strömungslänge l der Radius des Fließkanals r_{FK} mit der vierten Potenz in die Strömungsgleichung eingeht. Folglich ist die geometrische Form der FK eines Textils in die anschließenden Untersuchungen einzubeziehen.

2.2.3 Das Kompaktierungsverhalten

Ein weiterer Aspekt beeinflusst das Imprägnierverhalten eines textilen Halbzeugs; dessen Strukturstabilität oder das sog. Kompaktierungsverhalten. Denn durch das Umformen beim Preformen oder auch durch den Fließwiderstand der Matrix bei der RTM-Injektion wird das Textil wiederholt mit Druck belastet. Steigt die aufgebrauchte Last über die korrespondierende Druckspannung, also die Kompaktierungsspannung, des Textils hinaus an, wird das Faserhalbzeug verformt, gestaucht oder lokal verdichtet. In einem solchen Bereich steigt der FVG. Damit wird die lokale Permeabilität reduziert und in der Folge erhöht sich nach Darcy der Forminnendruck [64, 75-77].

In der Literatur wird dieses Kompaktierungsverhaltens als viskoelastisch mit plastischem Anteil beschrieben. Bickerton, Lee oder Kelly charakterisieren diese Eigenschaft mit dem Maxwell'schen Feder-Dämpfer-Modell [78-82]. Abb. 2-17 stellt die unterschiedlichen Verhaltensformen qualitativ dar. Im ersten Fall (1) wird das Textil komprimiert und die erzielte Dicke gehalten, analog zum Vorgang beim Schließen eines Injektionswerkzeugs. Ein Kraftabfall über die Zeit ist zu beobachten, d. h. das Textil relaxiert. Die Einzelfilamente im Textil gleiten aneinander ab, es kommt zu Setzerscheinungen. Im zweiten Beispiel (2) wird die Kompaktierung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten vollzogen. Hierbei wird das viskoelastische Verhalten deutlich, denn der Kraftaufwand zum Komprimieren nimmt mit steigender Verformungsgeschwindigkeit zu. In der dritten Phase (3) wird die Kavität nach der Kompaktierung wieder geöffnet. Das Textil entspannt sich. Die sich einstellende Hysterese ist durch den zuvor genannten plastischen Anteil bedingt.

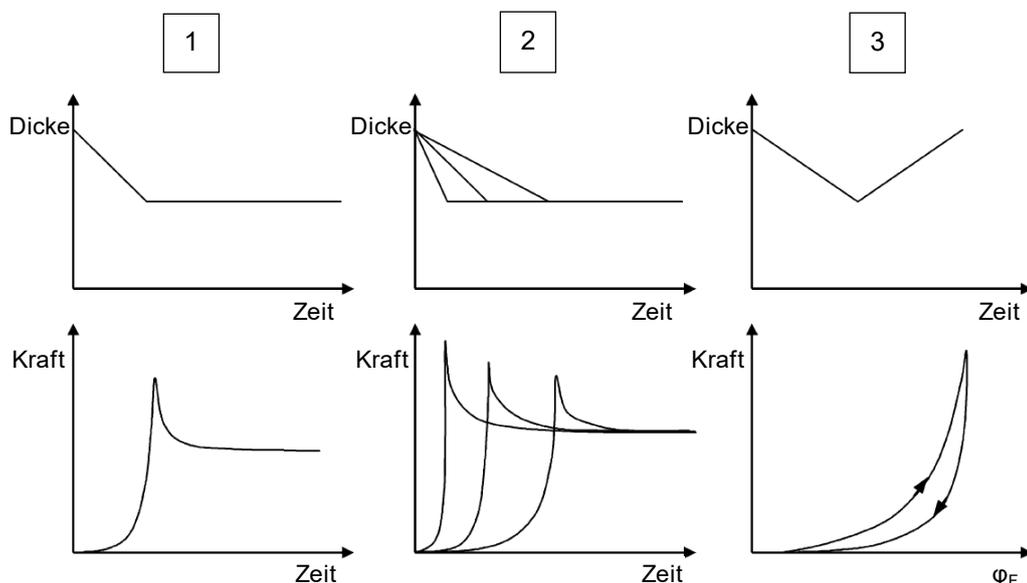


Abb. 2-17: Viskoelastisches Verhalten textiler Flächen mit plastischem Anteil [78].

Abb. 2-18 verdeutlicht den Abfall der Kompaktierungsspannung σ_{comp} bei wiederholter Druckbeaufschlagung eines trockenen Verstärkungstextils. Dieser Zusammenhang gilt für die Kompression eines trockenen und eines bereits imprägnierten Halbzeugs gleichermaßen [83-84].

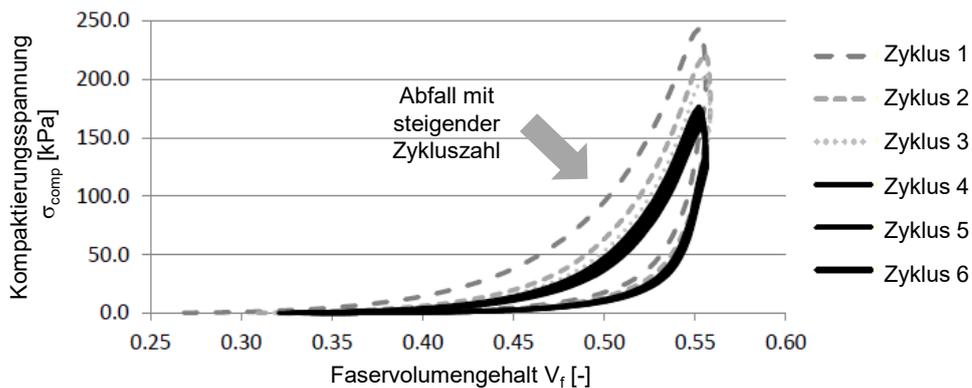


Abb. 2-18: Plastische Verformung von NCF bei wiederholter Kompaktierung [85].

Eine transversale Verdichtung erfolgt z. B. beim Aufheizen des Stacks vor dem eigentlichen Preforming im Kontaktheizfeld, beim Preforming selbst (Weg-gesteuert) und beim Schließen des Injektionswerkzeugs im RTM-Prozess durch die entsprechende Werkzeugkavität.

2.2.4 Fazit: Bekannte Einflussgrößen auf die Imprägnierung

Anknüpfend an die in diesem Kap. 2.2 diskutierten Imprägniermechanismen lässt sich die Permeabilität des Preforms als eine zentrale Zielgröße für den Injektionsprozess festhalten. Dabei ist aber nicht nur der Preform, sondern sind auch die vorgeschalteten Halbzeuge Stack, Gelege und Faser von Interesse. Denn grundsätzlich muss das Ziel im Sinne eines wirtschaftlichen Produktionssystems sein, die relevanten Produkteigenschaften zum frühestmöglichen Zeitpunkt zu identifizieren. So kann ggf. in die Prozessführung der Folgeprozesse korrigierend eingegriffen werden, sollte kein fähiger und beherrschter Prozess vorliegen. Daneben ist die Viskosität der eingesetzten Matrix entscheidend für den Druckanstieg bei der Injektion. Beide Parameter, Permeabilität und Viskosität definieren den Fließwiderstand und damit das Druckgefälle, welches auf die textile Struktur bei der Injektion wirkt und durch das Kompaktierungsverhalten beschrieben werden kann.

Die Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette – angefangen vom Precursor bis zur fertigen Komponente – mit dem Fokus einer vollständigen Bauteilfüllung, liefert die in Tab. 2-3 veranschaulichten Parameter, um den Druckverlauf bei der Imprägnierung zu manipulieren [63, 75, 86-92].

Die einzelnen Einflussgrößen sind dabei den Kategorien „Faser“, „Textil“, „Matrix“ und „Prozess“ zugeordnet. Zusätzlich sind die entsprechend beeinflussten Zielgrößen Permeabilität K , Kompaktierung σ_{comp} des Halbzeugs und Viskosität(-verlauf) μ des Fluids mitaufgeführt:

Tab. 2-3: Übersicht der bekannten und variablen Einflussgrößen von CF-NCF bzgl. Imprägniereignung.

Einflussgröße	variabel?
• Faserebene ($\rightarrow K$):	-
• Textilebene ($\rightarrow K$ und σ_{comp} von Gelege, Stack und Preform):	
○ Art und Konstruktion der Textilien (UD-Gelege)	✓
○ Lagenaufbau (MD-Stack)	✓
○ Pulverbinder (Bindermenge)	✓
• Matrixebene ($\rightarrow \mu$ bzw. $d\mu/dt$):	-
• Prozessebene ($\rightarrow K$ und σ_{comp} des Textils; μ der Matrix):	
○ Wärmeeintrag beim Preformen	✓
○ Spaltimprägnierung (Faservolumengehalt bei der Injektion)	✓

Legende: „✓“ = ja; „-“ = nein.

Darüber hinaus kategorisiert Tab. 2-3 die aufgeführten Einflussgrößen gemäß der bereits im Abschnitt 2.1.5 definierten Randbedingungen und Vorgaben in variabel „✓“ und nicht veränderlich „-“.

So entfallen die Parameter auf Faserebene (z. B. Faserwerkstoff, Garngeometrie und Titer, Schlichte, Haftvermittler und Oberflächenspannung bzw. Kontaktwinkel) als Untersuchungsgegenstand genauso wie das definierte Matrixsystem mit all seinen Einflussfaktoren (z. B. chemische Zusammensetzung, Mischungsverhältnis und Verarbeitungstemperatur der Einzelkomponenten). Ebenso ist auf Textilebene das Drapierverhalten, d. h. die Intensität eines Textils abhängig vom Grad der Umformung beim Preformen sog. „Merkmale“ (z. B.: Locken, Wellen, Falten, etc. [64, 93-94] auszubilden, nicht Gegenstand der Untersuchungen und für die vorliegende Arbeit als konstant definiert. Auch der Typ des eingesetzten Pulverbinders ist festgelegt. Nur die eingesetzte

Menge ist in definierten Grenzen variabel. Weiterhin ist die Prozessführung beim RTM, wie auch beim Preformen, grundsätzlich fixiert. D. h. die Geometrie, der Faservolumengehalt der Zielkomponente wie auch vorherrschende Drücke, Prozesstemperaturen, angelegtes Vakuum oder Angusskonzept, u. a. sind nicht veränderlich. Einzig der Wärmeeintrag beim Umformprozess (Einfluss auf das eingesetzte Bindersystem und damit auf die Permeabilität und die Kompaktierung des Vorformlings) und der Injektionspalt im RTM-Prozess sind in spezifizierten Toleranzen variierbar. Dementsprechend richtet sich der Betrachtungsfokus nun auf die beiden verbliebenen variablen Einflussgrößen „Art und Konstruktion des Textils“ und „Lagenaufbau“ des Gelegestacks.

2.3 Stellgrößen und Prüfmethode zur Bewertung von C-Faserbasierten Gelegen

2.3.1 Bekannte Stellgrößen

Auf Grundlage der in Abschnitt 2.2.4 definierten Prämissen wird Tab. 2-4 generiert. Diese ordnet den verbliebenen variablen Einflussgrößen spezifische Stellgrößen zu. Dabei sind die relevanten Produkteigenschaften Permeabilität (in lateraler und transversaler Richtung) und Kompaktierungsverhalten über den sog. „Stellhebeln“ aufgetragen. Diese Faktoren gliedern sich in die Parameter „Textile Architektur“ (des eingesetzten UD-CF-NCF), „Lagenaufbau“ (des verwendeten MD-Stacks) und „Prozessführung beim Preformen und RTM“ gemäß Tab. 2-3 im vorangegangenen Kap. 2.2.4. Weiterhin ist in Tab. 2-4 der in Veröffentlichungen und Fachliteratur bekannte Stand der Analysen abgebildet. Es wird dabei der Einfluss vom jeweiligen Stellhebel (vertikale Spalte) auf die korrespondierende Produkteigenschaft (horizontale Zeile) qualitativ bewertet. (\uparrow) verdeutlicht dabei einen positiven, (\rightarrow) keinen und (\downarrow) einen negativen Einfluss des Stellhebels auf die jeweilige Eigenschaft, wenn sich numerische Parameter erhöhen oder sich die kategorialen Parameter ändern.

Z. B. reduziert eine Erhöhung der eingesetzten Bindermenge sowohl die Permeabilität K_{12} sowie K_3 , der Kompaktierungswiderstand steigt demgegenüber jedoch an. Der weiterhin angegebene Exponent zeigt den Untersuchungsgegenstand an: Im Fall der lateralen Permeabilität wurden hier „2, 3“, d. h. Multidirektionale-Gelege (MD-Gelege) und Gewebe gewählt, im Fall der transversalen Durchlässigkeit und der Kompaktierung waren „2“, also MD-Gelege, die verwendeten Materialien.

Tab. 2-4: Übersicht der bekannten textilen Stellgrößen von CF-NCF bzgl. der Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung.

Produkt- eigenschaft Stellhebel	Permeabilität		Kompaktierung
	K ₁₂	K ₃	
UD-Gelege (Textile Architektur):			
• Flächengewicht der Verstärkungstextilien	→ ² [95], ↑ ³ [96]	k. A.	↑ ² [75]
• Fadenspannung (Fließkanalbreite)	↑ ^{2/3} [97] / [96], ↗ ² [89]	↗ ^{3,4} [98]	↘ ^{2,3,4} [99]
• Bindungsart (Wechsel von Franse zu Trikot)	↑ ^{1/2} [100]/[101], → ^{2/3,4} [97] / [88], ↓ ² [102]	→ ¹ [103]	→ ² [75]
• Stichanzahl/-breite (Kehrwert ist die Stichlänge)	↓ ^{2/3,4} [95] / [88], → ¹ [104]	↑ ^{1/3,4} [103, 105] / [98], ↓ ¹ [104]	↑ ² [75], ↓ ^{2,3,4} [99]
MD-Stack (Lagenaufbau):			
• Lagenanzahl	↕ ² [105], → ^{1,2/3} [106] / [91]	↓ ³ [107]	↓ ^{2,3} [105, 108]
• Lagenfolge, (Wechsel von 0°/0° zu 0°/90°)	↑ ⁵ [105]	→ ¹ [103], ↓ ⁵ [105]	↑ ^{2,3,5} [75, 105, 108]
Prozessführung (beim Preformen und RTM):			
• Pulverbinder (Bindermenge)	↓ ^{2,3} [105, 109-110]	↓ ² [105]	↑ ² [105, 111-112]
• Wärmeeintrag beim Preformen	↓ ² [109]	k. A.	↓ ² [111]
• Spaltimprägnierung beim RTM	↑ ² [58]	k. A.	k. A.

Dargestellt ist der qualitative Einfluss von Stellgröße auf Eigenschaft, wenn sich numerische Parameter erhöhen oder die kategorialen Parameter ändern:

(↑) positiv, (↗) neutral bis positiv, (→) neutral, (↘) neutral bis negativ, (↓) negativ.

Legende: 1: UD-Gelege, 2: MD-Gelege, 3: Gewebe, 4: Nähen, 5: Tailored fiber placement (TFP); k. A.: keine Angabe.

Tab. 2-4 stellt somit das Programm für die folgenden Analysen dar, denn die abgebildeten Wirkzusammenhänge gilt es im HD-RTM-Prozess nachzuweisen. Sollen diese Faktoren untersucht und verifiziert werden, sind entsprechende Prüfmethoden notwendig. Ein Überblick des Stands der Technik in diesem Bereich wird im Folgenden gegeben.

2.3.2 Bekannte Prüfmethoden

2.3.2.1 Prüfung der textilen Architektur

Um die textile Struktur eines Halbzeugs zu beschreiben, sind unterschiedlichste Prüfverfahren und -technologien bekannt. Zur globalen Klassifizierung der grundlegenden Architektur wie Bindungsart, Stichelänge und Nadelteilung oder aber z. B. der Bestimmung der Breite, Länge oder der flächenbezogenen Masse von textilen Flächengebilden existieren entsprechende Normen und Prüfvorschriften. Diese werden hier nicht explizit beschrieben. Es sei stattdessen auf die entsprechende Literatur verwiesen: [51-52, 55, 113-115]

Demgegenüber steht vor allem die Bewertung der CF-NCF-Qualitätscharakteristika nach Schneider im Vordergrund [116], wie z. B.:

- Gassen (engl. Gaps) zwischen zwei Rovings¹⁰
- Flusenansammlung (engl. Fuzz: Anhäufung von bei der Produktion entstehenden gebrochenen Einzelfilamenten)
- fehlende, gerissene oder lokal falschorientierte Wirk- und Schussfäden
- fehlende, gerissene oder lokal falschorientierte Verstärkungsfasern u. a.

Auf Basis dieser Qualitätsmerkmale werden zahlreiche optische Prüftechnologien entwickelt, mit dem Ziel diese zu quantifizieren.

Ein Beispiel stellt die digitale Bildverarbeitung dar, bei der mittels Grauwertanalyse und Schwellwertbetrachtung die oben genannten Faktoren erkannt werden können. Als

¹⁰ Grundsätzlich können Gassen in zwei Kategorien eingeteilt werden: eine Gasse als Fehlermerkmal, das sich durch fehlende C-Fasern auszeichnet oder aber der gewollte Fließkanal (das sog. „Engineered“ Gap). Als Fehlermerkmal kann eine Gasse „race tracking“ begünstigen oder die strukturelle Integrität der Komponente schwächen [117]. Als Engineered Gap gewährleistet diese den Harzfluss durch den Preform. Eine Abgrenzung beider Ausprägungen ist in der Literatur nicht bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Fließkanäle größer 2,5 mm Breite als Fehlstellen (Gasse) festgelegt.

Aufnahmequelle zur Bildanalyse dienen Flachbettscanner oder Kameras [116]. Ein weiteres System ist das kommerziell verfügbare System Fila Inspect™ der Fa. Profaktor [118-119]. Auch dieses optische Prüfsystem ist in der Lage, die aufgeführten Qualitätsmerkmale zu erfassen und erlaubt dem Benutzer nachgelagert die Vermessung und Auswertung der aufgenommenen Bilder. Ein drittes Beispiel ist das Apodius Vision System™ (AVS) der Fa. Apodius. Hierbei dient ein Kamerasystem zur Analyse der textilen Struktur. Durch die Kombination mit einem Laserlichtschnittsensor lässt sich dann darauf aufbauend die dreidimensionale Topographie des Prüfkörpers abbilden und bewerten. [120-122]

Es existieren zahlreiche weitere bildgebende Prüftechnologien, teils in der reinen Anwendung im Labormaßstab, teils in der industriellen Anwendung [123-124].

Eine Sonderstellung nimmt die Prüftechnologie der Fa. Suragus ein. Basierend auf dem Wirbelstromverfahren, wird in ein elektrisch leitendes Prüfobjekt (z. B. eine C-Faser) ein Magnetfeld induziert. Die rückgekoppelten Signale können bildgebend aufbereitet werden. Die Innovation ist hierbei, auch innenliegende Bereiche einer Probe, unabhängig ob als trockene oder bereits durchtränkte Struktur vorliegend, zerstörungsfrei visuell darzustellen. [125-127]

Sind die Architektur und die Qualitätscharakteristika der vorliegenden textilen Fläche bekannt, kann deren Einfluss auf die Permeabilität und Strukturstabilität (Kompaktierungsverhalten) untersucht werden.

2.3.2.2 Bestimmung der Permeabilität

Zur Bestimmung der Permeabilität selbst existieren an Instituten und Forschungseinrichtungen eine Reihe von Prüfmethode und Versuchsaufbauten. Einen detaillierten Überblick stellt Sharma dar: [128]

Grundsätzlich basiert das Prüfprinzip darauf, einen textilen Probenkörper in einer Versuchskavität mit einem Fluid zu tränken. Dabei werden im Allgemeinen der sich einstellende Druck beim Imprägniervorgang am Anguss und Auslass gemessen und/oder der Fließfrontfortschritt detektiert. Bei den verwendeten Testfluiden reicht das Anwendungsspektrum von einfachen Pflanzenölen, Silikonölen, bis hin zu vollsynthetischen Ölen, immer vor dem Hintergrund, die Viskosität und die Benetzungseigenschaften der späteren Matrix abzubilden.¹¹ Aus Druckdifferenz und dem sich einstellenden Volumenstrom lässt sich dann mit dem Gesetz von Darcy oder Varianten davon die Permeabilität berechnen.

¹¹ Der direkte Einsatz derselben kann durch deren Vernetzungsreaktion nicht erfolgen, da aufwendige Spülvorgänge notwendig wären, um die „Imprägnierung“ des Versuchsaufbaus zu verhindern.

Ein Beispiel für einen solchen Versuchsaufbau ist in Abb. 2-19 abgebildet:

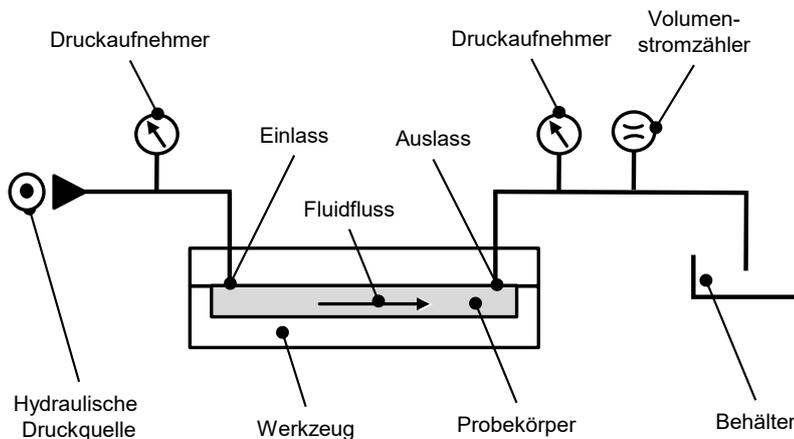


Abb. 2-19: Prinzipskizze eines typischen Versuchsaufbaus zur Permeationsprüfung.

Im Allgemeinen werden die einzelnen Verfahren anhand dreier Kategorien unterschieden: [129]

- Fließgeometrie (linear oder radial)
- Injektionsstrategie (bei konstantem Druck oder konstantem Volumenstrom)
- Benetzungszustand des Prüfkörpers (gesättigt oder ungesättigt)

Insgesamt überwiegen die Verfahren zur Bestimmung der ebenen Permeabilität. Sie zielen überwiegend auf die Ermittlung exakter Permeabilitätswerte als Eingangsgrößen für Simulationsmodelle ab. Dabei haben sich zahlreiche Modelle zur mathematisch-simulativen Ermittlung der Permeabilität wie z. B. das Kozeny-Carman-Modell, das Gebart-Modell, das Lundström-Modell und das Netzmodell, u. a. etabliert. [61, 72, 89, 130-134]

Die transversale Permeation steht dagegen nur in wenigen Arbeiten im Fokus der Untersuchungen [75, 107, 135-137].

Basis für diese Arbeit bilden mitunter Permeationsuntersuchungen am Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC, München) und am Institut für Verbundwerkstoffe (IVW, Kaiserslautern) [138, 96], siehe Abb. 2-20.

Das zuerst genannte stellt ein lineares, eindimensionales (1) und das zweite ein radiales, zweidimensionales Verfahren (2) dar.

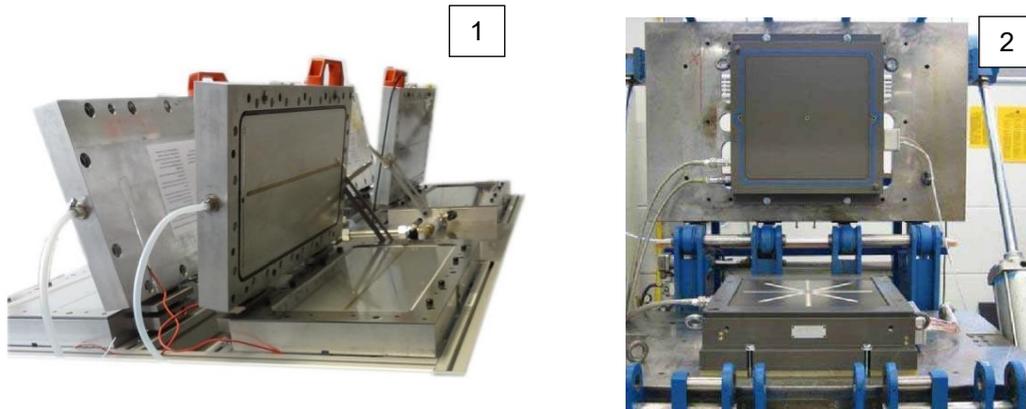


Abb. 2-20: Permeationsmesszelle LCC [138] (1) und Messzelle IVW [96] (2).

Darüber hinaus existieren Anwendungen mit transparenten Werkzeughälften, welche die optische Onlineüberwachung der Fließfront während der Imprägnierexperimente ermöglichen. Diese erlauben neben der Bestimmung der Permeabilität auch die Bewertung des Einflusses von lokalen Inhomogenitäten oder gezielt in das Textil eingebrachter Fehlstellen auf die Durchlässigkeit und die Fließfrontausbreitung. [57, 101, 125, 138]

Eine Abwandlung der gängigen Verfahren ist das CFM (Compression Fluid Method). Hierbei wird eine Kavität mit einer benetzten Probe in einer universellen Zugprüfmaschine platziert (UPM). Durch das Kompaktieren beim Verfahren der Traverse wird das Fluid durch das Halbzeug gepresst. Es entsteht ein radialer Volumenstrom. Die kontinuierliche Messung der Änderung des Fluiddrucks beim Schließen der Kavität und der damit steigende FVG ermöglicht die Bestimmung der ebenen Permeabilität. Damit einhergehend kann simultan das Kompaktierungsverhalten bewertet werden. [139-140]

2.3.2.3 Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens

Zur Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens von Textilien hat sich in Anlehnung an DIN 53883 [141] die Kompaktierungsprüfung mittels Druckstempel, geführt von einer universellen Prüfmaschine (UPM), in z-Richtung etabliert. Hierbei wird ein Probekörper zwischen zwei planparallelen Platten eingebracht. Beim Schließen der so entstandenen Kavität wirkt eine Kompaktierungskraft auf den Prüfstempel der UPM. Die notwendige Schließkraft wird über einen Kraftaufnehmer detektiert. Zusätzlich wird der Verfahrensweg mittels z. B. inkrementeller Wegaufnehmer aufgezeichnet. Die so erhaltenen Kraft-Weg-Verläufe werden mit Kenntnis der Probengeometrie, deren Einwaage und der Prüfstempelgröße in Spannungs-FVG-Diagramme überführt und ausgewertet, wie sie bereits in Kap. 2.2.3 vorgestellt wurden.

Die bekannten Kompaktierungsprüfungen unterteilen sich in zwei Gruppen, abhängig vom Benetzungszustand des Halbzeugs und dem Prüfzyklus:

- Verwendung eines trockenen oder bereits benetzten, getränkten Halbzeugs
- statischer oder dynamischer Prüfzyklus

Beispiele für trockene Anwendungen finden sich bei [83, 142] und Muster für Prüfungen getränkter Proben bei [83, 140, 143]. Nach Walbran ist die Korrelation zwischen „trockener“ und „nasser“ Kompaktierungsprüfung gegeben. Damit ist die Prüfung der „trockenen“ Kompaktierung zur Charakterisierung eines textilen Halbzeugs hinreichend. [83]

Der statische Versuch grenzt sich vom dynamischen Prüfzyklus durch gezielte „Haltephasen“ ab, bei dem die Kavität zwischen Druckplatte und Druckstempel mehrere Sekunden bis hin zu wenigen Minuten konstant gehalten wird, um das Rücksprung- oder Relaxationsverhalten des Halbzeugs zu erfassen.

Eine weitere Sonderform der Kompaktierungsprüfung (und auch der Permeationsprüfung) stellen die Systeme zur Versuchsdurchführung mit einem definiert verscherten Probenkörper dar. Diese Prüftechnologien zielen darauf ab, das Materialverhalten in diesem drapierten Zustand zu charakterisieren. Diese Prüfungen sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. [83, 144-145]

2.3.2.4 Bauteilbewertung

Die Bewertung der Bauteilgüte der fertigen Komponente beruht auf der Detektion von Imperfektionen oder Fehlstellen im Laminat, die eine oberflächlich vollständige Füllung mit der Matrix voraussetzt. Grundsätzlich sind die Prüfverfahren in zerstörungsfreie und zerstörende Methoden untergliedert. Die bekannteste zerstörende Prüfung ist die Schnittbeurteilung, bei der eine Materialprobe aus dem Werkstück entnommen, präpariert und in der Regel lichtmikroskopisch untersucht wird. Bei adäquater Präparation und entsprechender Auflösung sind Fehlstellen im Laminat bis hin zu einzelnen Filamenten gut zu erkennen. Die Aussagegüte ist die bestmögliche. Nachteilig ist der mit der Probenpräparation verbundene hohe Aufwand und bedingt durch die Probenentnahme die Zerstörung des Bauteils.

Dem stehen die sog. zerstörungsfreien Prüfmethoden (ZFP) gegenüber. Diese können grundsätzlich nach ihrem physikalischen Wirkprinzip eingeteilt werden: [33, 125, 146]

- radiografische Verfahren (Computertomografie, Röntgenstrahlen u. a.)
- elektrische Verfahren (Wirbelstrom)
- optische Prüfung (visuell u. a.)
- thermografische Verfahren (aktive u. passive Thermografie)
- akustische Verfahren (Resonanzanalyse, Ultraschallprüfung u. a.)

Die ZFP bestehen neben der Möglichkeit, ein Bauteil ohne Beschädigung prüfen zu können, vor allem auch durch die Prüfgeschwindigkeit. Nachteilig ist, dass die Quantifizierung der detektierten Fehlstelle ein hohes Maß an Erfahrung seitens des Prüfers verlangt. Dieser muss z. B. bei der Ultraschallprüfung in der Lage sein, das Messsignal richtig zu deuten. Da der Ultraschallscan nur Informationen über Ort, Ausprägung und Form der Fehlstelle angibt, ist ein exzellentes Materialverständnis notwendig, um zwischen Poren oder Delaminationen zu unterscheiden. Die endgültige Bestätigung kann dann wiederum nur über eine (zerstörende) Schnittbewertung erfolgen.

2.3.3 Fazit: Stand der Technik

Bei der Recherche zeigen sich mehrere Defizite:

Gerade in Bezug auf die Bestimmung oder die Berechnung der Permeabilität (nicht nur, aber vor allem auch) existieren keine Berechnungsvorschriften oder standardisierte Prüfverfahren. In der Folge sind die ermittelten Erkenntnisse schwer untereinander zu vergleichen. Die Notwendigkeit eines „Permeability Benchmark“ wurde zwar erkannt und wird in zahlreichen Untersuchungen verfolgt, angefangen von Best-Practice-Ansätzen bis hin zu Normkörpern mit definierter Permeabilität als Prüfnorm zur Kalibrierung der Versuchsaufbauten. Eine Normprüfung zur Bestimmung der Permeabilität ist bis heute jedoch nicht bekannt. [67, 76, 128-129, 147-150]

Neben der mangelnden Vergleichbarkeit ist eine hohe Streuung bei den erzielten Ergebnissen bekannt. Bei Geweben werden Variationen von $\pm 29\%$ [151] und bei NCF von zu 48 % in der ersten Hauptrichtung (K_1) und bis zu 16 % in der ebenen Nebenrichtung (K_2) aufgezeigt [89]. Als Hauptgrund hierfür werden neben nicht fähigen Prüfvorrichtungen vor allem die inhomogene Struktur des Eingangsmaterials Textil angegeben. [76, 67]

Daneben sind weitere Effekte ursächlich für die Variation in der Permeabilitätsmessung: [149, 152]

- herstellungsprozessbedingte Variation und Probenpräparation
- Zusammenspiel von Mikro- und Makrofluss bzw. gesättigtem und ungesättigtem Fluidfluss
- Nestingeffekte der Einzellagen
- nicht homogenes Scherverhalten, Umform- und Kompressionsverhalten

Als dritter Punkt ist gerade in Bezug auf die vorliegende Arbeit anzuführen: Viele der Untersuchungen beruhen auf der Verwendung von Glas-NCF anstelle von CF-NCF. Überdies stehen häufig Gewebe, oft Geflechte oder vernähte Textilien, selten Gelege im Fokus der Forschung, und wenn, liegt der Schwerpunkt auf reinen MD-Gelegen (Multidirektionalgelegen) anstelle der für diese Arbeit relevanten UD-NCF-Lagen.

Darüber hinaus wurden die formulierten Zusammenhänge und Erkenntnisse mit Versuchsaufbauten im Labor- oder Technikumsmaßstab verifiziert ($\ll 100$ bar), deren Injektionsdrücke nicht den hier relevanten Hochdruckbereich abdecken.

Alle diese Punkte verdeutlichen, dass die Gültigkeit bzgl. der Wirkweise der Einflussgrößen auf Permeabilität und auch der Kompaktierung (gemäß Tab. 2-4) in einem Serienhochdruckprozess verifiziert werden muss. Erst dann kann durch die bewusste Manipulation der aufgeführten Stellhebel das Druckniveau in der Werkzeugkavität gesenkt und die Imprägnierung des Faserbetts optimiert werden.

Die Zuordnung der identifizierten Produkteigenschaften, Stellgrößen und jeweiligen Prüfmethode zu den einzelnen Prozessschritten ist im Anhang in Abb. A-16 veranschaulicht.

3 Materialien und Methoden

Dieses Kapitel stellt die Versuchsumgebung vor. Im ersten Teil (Kap. 3.1) werden die unterschiedlichen verwendeten Gelegetypen spezifiziert. Der zweite Abschnitt (Kap. 3.2) beschreibt die Versuchsmethoden zur Bewertung der Permeabilität, Kompaktierung und Injektionsfähigkeit sowie deren Weiterentwicklung. Daraus leitet sich eine Qualifizierungslogik zur gestaffelten Untersuchung der Einflussparameter auf unterschiedlichen Analyseebenen (Labor-, Technikums- und Serienprozessebene) ab, die in den folgenden Kapiteln Anwendung findet.

3.1 Verwendete Materialien

3.1.1 C-Faser, CF-NCF und Stack

Grundlage für die untersuchten Gelege bilden zwei PAN-basierte C-Fasern (50 K) unterschiedlicher Hersteller. Die CF-1 ist dabei die 50K ACF der Fa. SGL ACF [153]. Die zweite Variante CF-2 stellt die Zoltek™ PX 35 dar [154]. Tab. 3-1 stellt die beiden Typen gegenüber.

Tab. 3-1: Verwendete C-Fasern.

Nr.	Handelsname	Anzahl Filamente	Precursor-Hersteller	C-Faser-Hersteller	Titer [g/m]	Dichte [kg/m ³]
CF-1	50K ACF	50 K	MRC/MSP	SGL-ACF	3,45	1,80
CF-2	ZOLTEK PX35	50 K	Zoltek	Zoltek	3,68	1,81

Die entsprechenden detaillierten Datenblätter finden sich im Anhang, siehe Abb. A-1 und Abb. A-2.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit finden weiterhin grundsätzlich neun CF-NCF entsprechend Tab. 3-2 (umseitig) Verwendung. Die fortlaufende Nummerierung (NCF-1 bis NCF-9) unterscheidet dabei Grammaturn (Flächengewicht in 150, 300 und 600 [g/m²]) und CF-Orientierung (0°, ±45°- und 90°-Richtung).

Hergestellt werden diese Textilien mit der in Kap. 2.1.1 vorgestellten textilen Architektur und Anlagentechnologie. Dabei wird auf der linken Wareenseite (Gelegeoberseite) ein Pulverbinder auf Epoxid- und Bisphenol-A-Basis der Fa. Huntsman (Handelsname LT 3366) appliziert. Das entsprechende Datenblatt ist im Anhang hinterlegt, siehe Abb. A-5. Für die vorliegenden Untersuchungen ist die eingesetzte Bindermenge mit 12,5 ±2,5 g/m² (Ausgangsbasis) bzw. 10 ±2 g/m² (für die modifizierten Materialien) festge-

legt. Diese Differenz beeinflusst das Injektionsverhalten gemäß Kap. 5.1.1 Abb. 5-6 nicht.

Tab. 3-2 stellt die grundsätzliche Einteilung der eingesetzten Textilien dar. Im Zuge der Untersuchungen werden einzelne NCF der untenstehenden Tabelle in ihrer Konstruktion variiert und modifiziert. Die Orientierung und die Grammaturn bleiben jedoch unverändert.

Tab. 3-2: Einteilung der verwendeten CF-NCF.

Nr.	Orientierung C-Faser	Grammaturn [g/m ²]	Abk.	Aufbau Fadenlagen
NCF-1	0°	150	0_150	UD
NCF-2	0°	300	0_300	UD
NCF-3	+45°	150	+45_150	UD
NCF-4	-45°	150	-45_150	UD
NCF-5	+45°	300	+45_300	UD
NCF-6	-45°	300	-45_300	UD
NCF-7	90°	150	90_150	UD
NCF-8	90°	300	90_300	UD
NCF-9	0°	600	0_600	UD

Tab. 3-3 (umseitig) bildet die detaillierte Architektur der variierten Textilien ab. Diese spezifiziert die verwendete C-Faser, die Bindungsart, die Legung (abhängig von der eingesetzten Legebarre (GB)), die Feinheit (Stichbreite) und die Stichlänge des vorliegenden Geleges. Demnach stellt z. B. NCF-2.1 ein 0° 300 g/m²-Material mit der 50 K SGL ACF-Faser, Franse-Teilschussbindung der Feinheit E 3,5 und Stichlänge 7,26 mm dar.

Im Verlauf der folgenden Analysen kann abhängig vom jeweiligen Untersuchungsziel das eingesetzte Gelege ausgehend von Tab. 3-3 weiter detailliert werden. Dies geschieht dann direkt im entsprechenden Kapitel.

Zur eindeutigen Beschreibung der Bindung eignen sich sog. Legungspläne, -bilder oder Maschenbilder, deren Notation teilweise herstelllerspezifisch¹⁴ ist. [156-160]

In der nachfolgend dargestellten

Tab. 3-4 werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bindungen hinreichend beschrieben.

¹⁴ Die Notation der hier verwendeten Legungspläne und -bilder lehnt sich an die Praxis der Fa. Liba an [155].

Tab. 3-3: Verwendete UD-CF-NCF-Varianten.

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Legung	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]
NCF-1: 0° 150 g/m²					
NCF-1.1	CF-1	offene Franse Teilschuss	GB1: 10/01// GB2: 00/11//	E 5	3,33
NCF-2: 0° 300 g/m²					
NCF-2.1	CF-1	offene Franse Teilschuss	GB1: 10/01// GB2: 00/11//	E 5	3,33
NCF-2.2 ¹⁵	CF-1	offene Franse Teilschuss	GB1: 10/01// GB2: 00/11//	E 5	3,33
NCF-2.3	CF-2	geschl. Trikot	GB1: 10/12//	E 5	3,60
NCF-2.4	CF-1	geschl. Trikot	GB1: 10/12//	E 5	2,50
NCF-3: +45° 150 g/m² und NCF-4: -45° 150 g/m²					
NCF-3.1 / NCF-4.1	CF-1	geschl. Doppel-Trikot gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 3,5	7,26
NCF-3.2 / NCF-4.2	CF-1	geschl. Doppel-Trikot gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 5	5,08
NCF-5: +45° 300 g/m² und NCF-6: -45° 300 g/m²					
NCF-5.1 / NCF-6.1	CF-1	geschl. Doppel-Trikot gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 3,5	7,26
NCF-5.2 / NCF-6.2	CF-1	geschl. Doppel-Trikot gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 5	5,08
NCF-7: 90° 150 g/m²					
NCF-7.1	CF-1	geschl. Doppel-Trikot, gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 3,5	7,26
NCF-8: 90° 300 g/m²					
NCF-8.1	CF-1	geschl. Doppel-Trikot, gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 3,5	7,26
NCF-8.2	CF-1	geschl. Doppel-Trikot, gegenlegig	GB1: 10/12// GB2: 12/10//	E 5	5,08
NCF-9: 0° 600 g/m²					
NCF-9.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	GB1: 10/01// GB2: 00/11//	E 5	3,33
NCF-9.2	CF-1	versetzte Franse	GB1: 10/01/12/21//	E 5	2,50
NCF-9.3	CF-1	geschl. Trikot	GB1: 10/12//	E 5	2,50
NCF-9.4 ¹⁶	CF-1	geschl. Trikot	GB1: 10/12//	E 5	2,50
NCF-9.5	CF-1	versetzte Franse	GB1: 10/01/12/21//	E 7	2,50

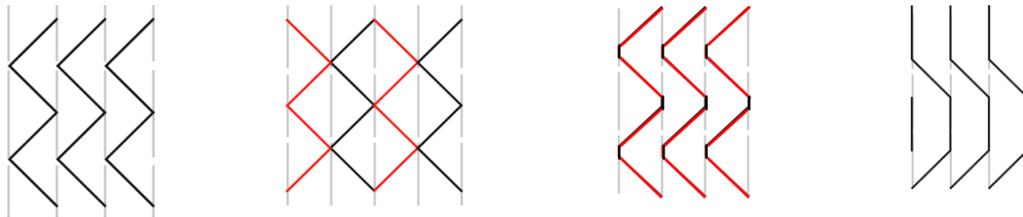
¹⁵ Veränderte Kettfadenspannung ggü. NCF-2.1 und damit verändertes Gassenbild.¹⁶ Veränderte Kettfadenspannung ggü. NCF-9.3 und damit verändertes Gassenbild.

Tab. 3-4: Schematische Darstellung der eingesetzten CF-NCF in Anlehnung an [161].

Trikot	Trikot, gegenlegig	Franse-Teilschuss	Versetzte Franse
Legungsplan			
GB1: 10/12// geschlossen	GB1: 10/12// geschl. GB2: 12/10// geschl.	GB1: 10/01// offen GB2: 00/11// Teils.	GB1: 10/01/12/21// offen
Legungsbild			

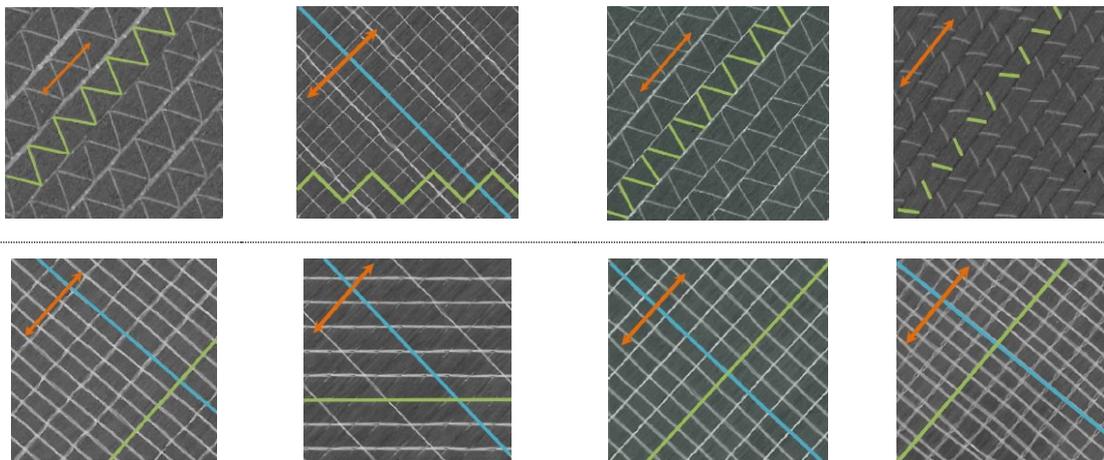
GB = Legebarre, R = Rapport (Wiederholung), MR = Maschenreihe

Schematische Darstellung Fadenlauf



Unterlegung (Oberseite): GB 1 „schwarz“, GB 2 „rot“ dargestellt; Überlegung (Unterseite): „grau“ dargestellt.

Abbildung (linke gefolgt von rechter Wareseite)



Carbonfaserrichtung „rot“, Wirkfaden „grün“ und Querschussfaden „blau“ hervorgehoben.

Darüber hinaus wird zur Spezifikation der verwendeten Gelegestapel (MD-Stacks) eine weitere Nomenklatur eingeführt. Gemäß Tab. 3-5 kann der eingesetzte Materialaufbau eines beispielhaften, sechslagigen Stacks (vgl. Bsp. 1) wie folgt beschrieben werden; unter Angabe der Orientierung und Grammatur (+45°, -45°, 0°, 0°, -45°, +45°, je 300 g/m²) oder unter Verwendung des Gelegetyps explizit (NCF-5.1/NCF-6.1/NCF-2.1/NCF-2.1/NCF-6.1/NCF-5.1). Vorausgesetzt, dass die detaillierte Gelegebezeichnung aus dem Kontext der Untersuchung ersichtlich ist, kann die Beschreibung entsprechend verkürzt werden: (5,6,2,2,6,5). Ist weiterhin der gewählte Aufbau symmetrisch oder wiederholt sich eine Lagensequenz, lässt sich auch (5,6,2|_s) oder 0°/90°|₄ schreiben, siehe Tab. 3-5, Bsp. 1 und Bsp. 2.

Tab. 3-5: Notation exemplarisch verwendeter MD-Stacks.

Bsp.	Beschreibung	Orientierung / Grammatur	Gelegetyp	Materialtyp	Abk.
1	Sechslagiger, multidirektionaler (triaxialer) Aufbau	+45°, -45°, 0°, 0°, -45°, +45°; alle 300 g/m ²	NCF-5.1/NCF-6.1/ NCF-2.1/NCF-2.1/ NCF-6.1/NCF-5.1	5,6,2,2,6,5	5,6,2 _s (s = symmetrisch)
2	achtlagiger, multidirektionaler (biaxialer) Aufbau	0°, 90°, 0°, 90°, 0°, 90°, 0°, 90°; alle 300 g/m ²	NCF-2.1/NCF-2.1/ NCF-2.1/NCF-2.1/ NCF-2.1/NCF-2.1 NCF-2.1/NCF-2.1	2,2,2,2,2,2,2,2	0°/90° ₄ (4 = Anzahl der Wiederholung)

Ist für die Untersuchungen die Position der „doppelten“ Binderlage¹⁷ relevant zeigt „/“ z. B. in der Notation der Materialtypen (5,6,2//2,6,5) die Lage an.

3.1.2 Harzsystem

Im Kontext dieser Arbeit wird ein Epoxidharzsystem basierend auf der Harzkomponente XB3585 (Epoxid- und Bisphenol-A-Basis) und Härterkomponente XB3458 (Amin- und Bisphenol-A-Basis) der Fa. Huntsman verwendet. Das Datenblatt ist im Anhang in Abb. A-4 abgedruckt.

Um den definierten Vorgaben aus Kap. 2 (Tab. 2-2) hinsichtlich Vernetzungsgrad und Glasübergangstemperatur T_g zu entsprechen, wird für die vorliegenden Untersuchungen

¹⁷ Der auf dem UD-NCF befindliche Binder wirkt als Klebstoff. Um beim Preformen ein Anhaften an der Ober- oder Unterseite der Werkzeugwandung zu verhindern, wird der MD-Stack in der Art aufgebaut, dass die jeweiligen bebinderten Seiten der einzelnen NCF zur Stackinnenseite orientiert sind. Folglich treffen im Kern des Lagenaufbaus zwei bebinderte Gelegeoberseiten aufeinander. Es kommt „Binderseite“ auf „Binderseite“ zum Liegen.

ein Mischungsverhältnis der Matrixkomponenten v_i (Harz/Härter) von 100 zu 19 Gewichtsteilen und eine Verarbeitungstemperatur T_{fluid} von 100 °C gewählt. Die eingesetzten RTM-Werkzeuge werden dementsprechend ebenfalls auf T_{mold} 100 °C temperiert. Infolgedessen stellt sich die zeitliche Änderung der Viskosität μ_{fluid} des eingesetzten Harzsystems wie in Abb. 3-1 aufgetragen ein:

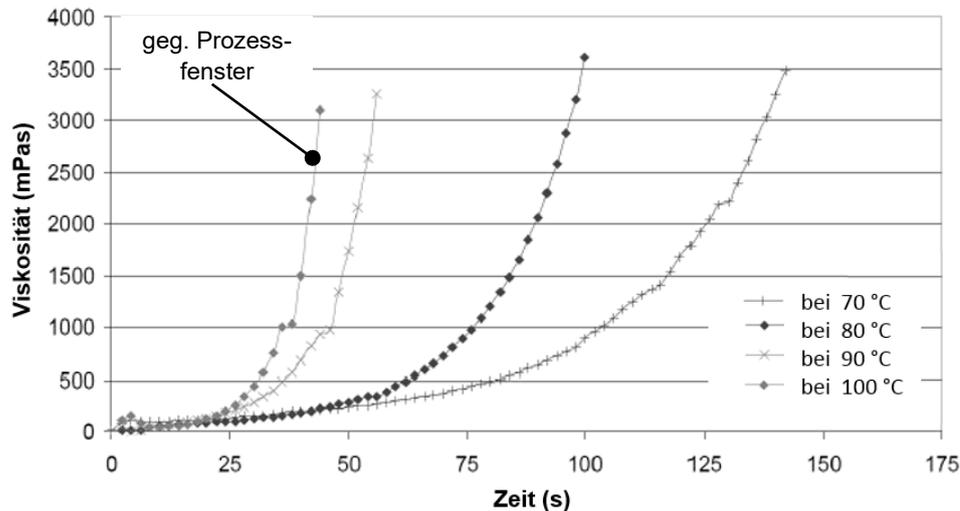


Abb. 3-1: Viskositätsentwicklung Harz-/Härterssystem XB3585/XB3458 [162].

Abb. 3-1 zeigt die temperaturabhängige Viskositätsentwicklung des eingesetzten Epoxidsystems für die Verarbeitungstemperaturen 70 °C, 80 °C, 90 °C und 100 °C (v. r. n. l.). Mit steigender Temperatur reduziert sich das Verarbeitungsfenster durch die Zunahme der Viskosität in einer kürzeren Zeitspanne. Das resultierende Prozessfenster ist hervorgehoben.

Weiterhin wird die Entformung der fertigen CFK-Komponenten durch den Zusatz von externem Trennmittel auf fluorierter Kohlenwasserstoff-Basis (Teflonwachs) und internem Trennmittel auf hauptsächlich Fettsäure-Basis sichergestellt.

3.2 Eingesetzte Prüfmethoden

Grundlage für die Analyse der gewählten CF-NCF bilden eine im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelte optische Analysemethode mittels Flachbettscanner und ein Permeabilitätsprüfverfahren. Die eingesetzte Methode zur Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens lehnt sich an die bekannten Verfahren an, siehe Abschnitt 2.3.2. Weiterhin finden zur Beurteilung der Injektionsfähigkeit ein zweidimensionales Plattenwerkzeug und ein serienäquivalentes Versuchswerkzeug Verwendung. Aus dieser gestaffelten Bewertungsmöglichkeit wird abschließend eine Qualifizierungslogik für die folgenden Untersuchungen abgeleitet.

3.2.1 Versuchsaufbauten

3.2.1.1 Fließkanalprüfung

Der Imprägnierprozess von NCF ist direkt abhängig von der Geometrie der sog. Engineered Gaps, siehe Kap. 2.2.2 Gleichung (2-15). Zur Bestimmung der Fließkanalbreite und -länge, die als Gassendurchgängigkeit oder Fließkanaldurchgängigkeit bezeichnet wird, wird eine auf digitaler Bildverarbeitung basierende Analysemethode mittels MatLab®-Algorithmus entwickelt. Den Prüfaufbau stellt Abb. 3-2 dar. [163]

Als Basis für die Bildaufnahme dient ein Großbildscanner (Typ: WideTEK 25™) der Fa. Image Access [164]. Der Sichtbereich liegt mit $450 \times 635 \text{ mm}^2$ auf dem Niveau des in Kap. 3.2.2.1 verwendeten Plattenwerkzeugs ($300 \times 700 \text{ mm}^2$). Um eine reproduzierbare Bildaufnahme zu gewährleisten und Relaxationseffekte im NCF zu vermeiden, wird der zu bewertende Gelegeausschnitt mittels einer Glasplatte definierter Form und Größe fixiert. Der sich auf der Textilprobe einstellende Flächendruck beträgt $0,3 \text{ kPa}$. Die notwendige Durchleuchtung des Probekörpers wird mit einer Durchlichteinheit realisiert. Leuchtstoffröhren mit definierter Lichtleistung, abgedeckt durch einen Diffusor, garantieren eine homogene Ausleuchtung. [168]

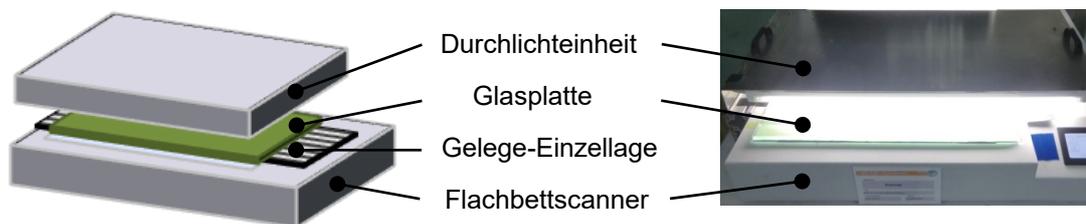


Abb. 3-2: Versuchsaufbau NCF-Scanner [165].

Die Bildaufnahme erfolgt mit einer Auflösung von 800 dpi (entspricht $32 \mu\text{m}/\text{Pixel}$) unter der Verwendung von Graustufenbildern im PNG-Format (verlustfreie Datenkompression [166]). Der eigentliche Berechnungsalgorithmus wird in MatLab® ausgeführt. Dieser Algorithmus gliedert sich wie folgt:

- Preprocessing:
Das Preprocessing unterteilt sich in die Initialisierung der Speicherstruktur, Drehung des Quellbildes und Auswahl des zu untersuchenden Bildausschnitts.
- Processing:
Das eigentliche Processing durchläuft wiederum folgende Hauptschritte:
 - Aufteilung in einzelne Berechnungssegmente:
Die Auswertung graphischer Dateien ist arbeitsspeicherintensiv. Durch die Aufteilung des Quellbildes in einzelne Berechnungselemente kann der Algorithmus auf Computern mit einem internen RAM von 4 GB aus-

geführt werden. Darüber hinaus ermöglicht es die Erstellung einer Übersichtskarte der Zielwerte der einzelnen Bildsegmente im Postprocessing.

- Tresholding des Graustufenbildes mit OTSU-Algorithmus:
Die Schwellwertbildung zur Transformation in den Binärbildbereich erfolgt dynamisch für jedes Bildsegment auf Basis des OTSU-Algorithmus [167, 200]. Nach dieser Operation liegt ein Binärbild mit Fließkanälen, Wirk- und Glasfäden vor.
- Fourier-Transformation:
Das Binärbild wird mithilfe einer zweidimensionalen Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Spektralraum überführt. Aufgrund der Periodizität des Materials ergeben sich Intensitätsmaxima für Fließkanäle, Wirk- und Glasfäden.
- Erstellung Digitalfilter und Tiefpassfilter:
Die Frequenzpeaks können aufgrund des Phasenwinkels den Einzelkomponenten zugeordnet werden. Es wird ein digitaler Nockenfilter abhängig vom Phasenwinkel der Intensitätsmaxima (diese entsprechen den Fließkanälen oder Hilfsfäden) in Kombination mit einem „Pass“-Filter (Typ: „Butterworth“) aufgebaut.
- Filterung im Bildraum und Rücktransformation:
Die Filterung eliminiert die Intensitätsmaxima der Wirk- und Hilfsfäden und isoliert die Fließkanäle. Im Anschluss erfolgt die Rücktransformation. Das Ergebnis ist ein Binärbild, welches nur die Fließkanäle beinhaltet.
- Vermessung des Binärbildes:
Die Berechnung der Fließkanalbreite b_{FK} erfolgt über diskrete Balkenelemente dynamischer Länge l_{FK} . Diese werden in die optisch erkannten Fließkanäle eingepasst (bis zur nächstfolgenden Unterbrechung) und entsprechend ihrer lateralen Ausdehnung gewichtet. Dieser Ansatz konvergiert zur analytischen Lösung und ist bedeutend weniger rechenintensiv als ein eindimensionaler Finite-Elemente-Ansatz.
- Postprocessing Tresholding:
Beim Postprocessing erfolgt die graphische Aufarbeitung der Berechnungsergebnisse in Form eines Boxplots und/oder Gauß-Plots. Weiterhin wird eine Übersichtskarte mit unterschiedlichen Fließkanalgrößenbereichen, abhängig von der Benutzerwahl, generiert. Die Einzelergebnisse werden in eine XLS-Datei geschrieben und zurückgegeben.

Die oben aufgeführten einzelnen Berechnungsschritte des Algorithmus verdeutlicht Abb. 3-3 in Anlehnung an Marquart [168].

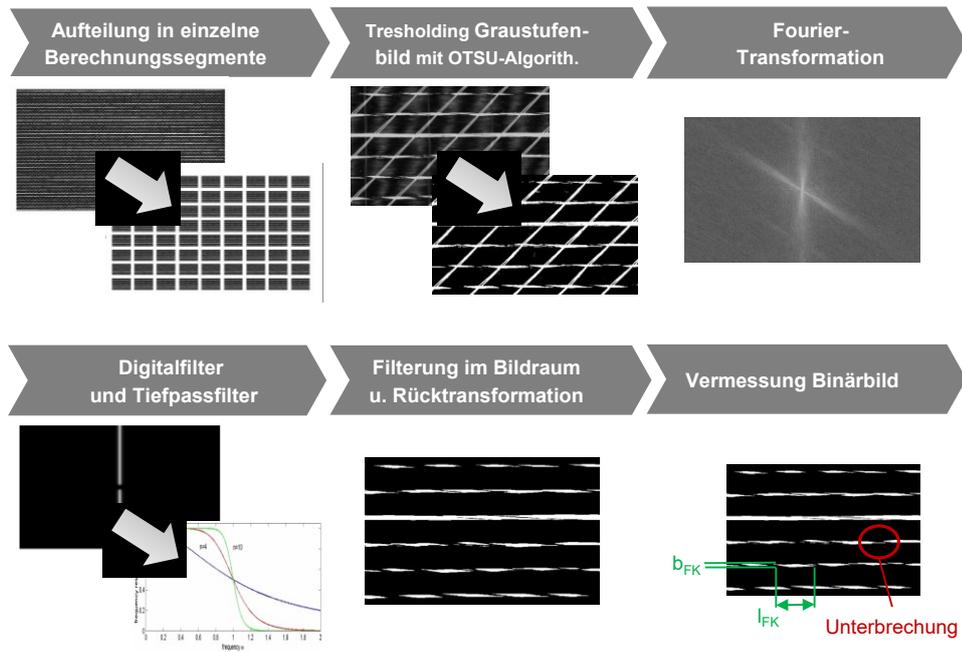


Abb. 3-3: Schema des NCF-Scanner-Algorithmus in Anlehnung an Marquart [168].

Das abschließende Post-Processing zur Ergebnisdarstellung ist in Abb. 3-4 dargestellt. (1) zeigt exemplarisch die ermittelte Fließkanalbreite in [mm], Gassendurchgängigkeit in [%]¹⁸ und deren Streuung eines geprüften Geleauschnitts in der Boxplotdarstellung. Die Fehlerbildkarte des Probekörpers ist in (2) visualisiert. Die Fließkanalbereiche mit einer Breitenausdehnung $< 0,1$ mm und $> 0,8$ mm sind hier exemplarisch „rot“ hervorgehoben.

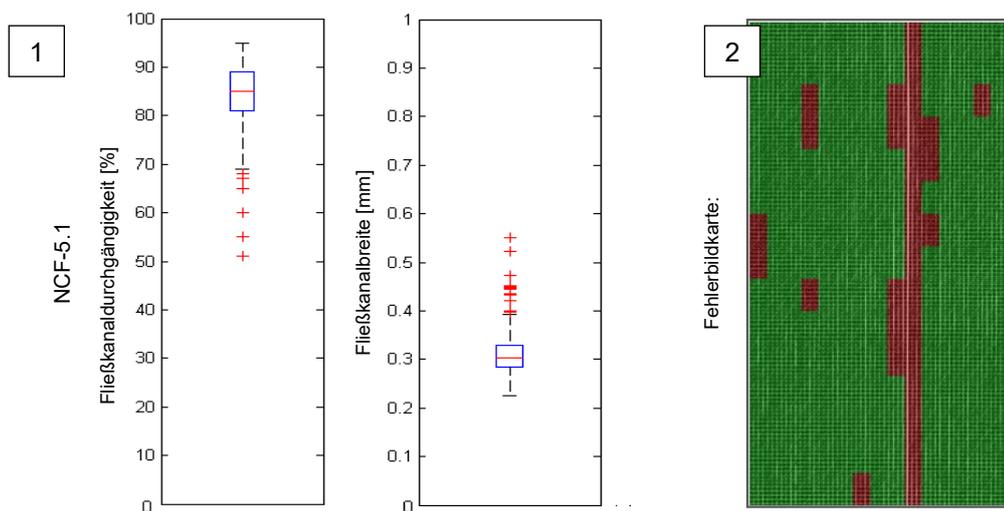


Abb. 3-4: Ergebnisdarstellung NCF-Scanner-Analyse.

¹⁸ Die prozentuale Angabe der FKD errechnet sich aus dem Verhältnis der theoretischen max. Länge eines Fließkanals (d.h. der Länge der Probe) und der tatsächlich detektierten Summe aller Fließkanallängen.

3.2.1.2 Permeationsprüfung

Die Basis für diese Arbeit bilden Permeationsuntersuchungen am Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC, München), am Institut für Verbundwerkstoffe (IVW, Kaiserslautern) [138, 96] entsprechend Abb. 2-20 im vorhergehenden Kap. 2.3.2 und der eigens entwickelte H_2O -Permeationsprüfstand. Das Prüfprinzip des zuletzt genannten Prüfstands basiert auf dem Gesetz von Darcy bei konstantem Druck mit radialer Fließgeometrie im gesättigten Zustand. Durch unterschiedliche Einlegeplatten lassen sich radial-ebene und linear-transversale Permeationsmessungen an Verstärkungstextilien durchführen. Als Testfluid dient destilliertes Wasser bei konstantem Druck (0,1 bar), dargestellt über eine Wassersäule mit definierter und geregelter Höhe. Die Messung erfolgt nach vollständiger Benetzung der Prüfkörpers. [169]

Abb. 3-5 skizziert die Prüfkörper und die unterschiedlichen Einsätze zur Bestimmung der transversalen K_3 -Permeation, einer ebenen Durchschnittspermeabilität K_{12} und einer gerichteten Permeabilität in Haupt- und Nebenrichtung K_1 bzw. K_2 .

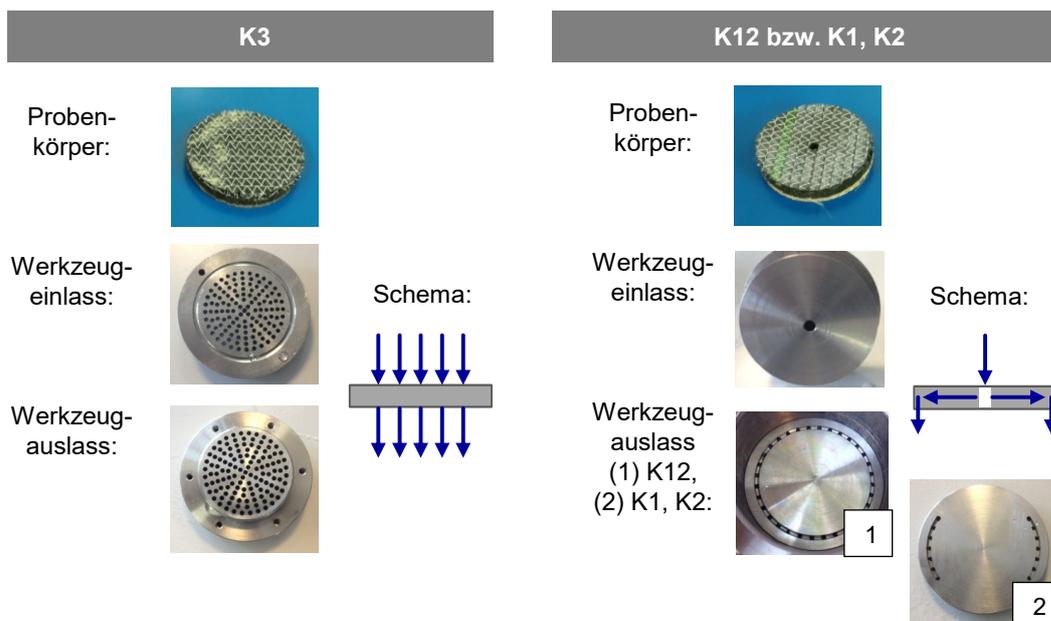


Abb. 3-5: Unterschiedliche Permeationsprüfköpfe.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3-6 dargestellt:

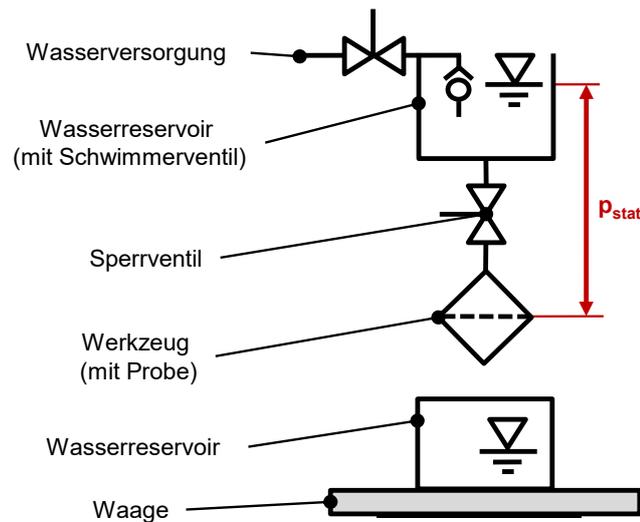


Abb. 3-6: Versuchsaufbau H₂O-Permeationprüfung [165].

Bei der Versuchsdurchführung wird der Volumenstrom des Fluids durch die textile Probe gemessen. Ermittelt wird dieser aus der Fluidmasse, die nach Öffnen des Sperrventils durch das Werkzeug und die Probe vom oberen in das untere Wasserreservoir geflossen ist und der dafür benötigten Zeit. Bei bekannter Geometrie von Probe und Kavität, Viskosität des Fluids, Umgebungstemperatur und bekannten Druckverhältnissen lässt sich die Permeabilität nach Darcy berechnen.

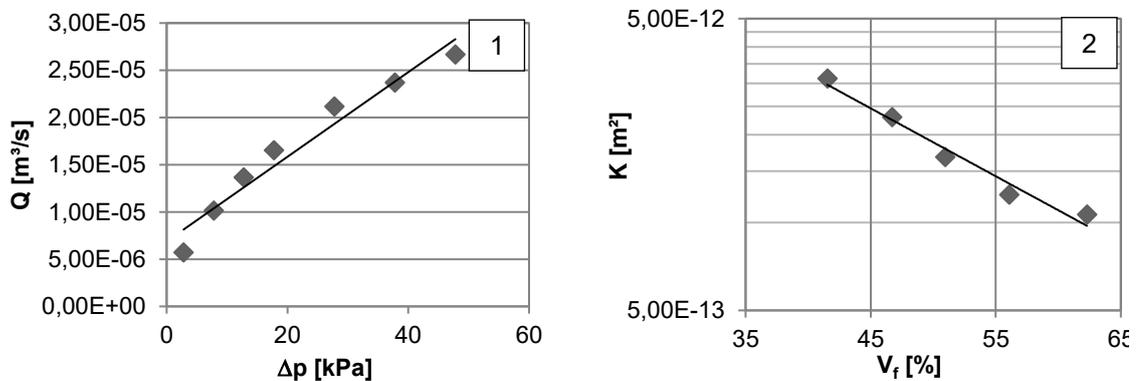


Abb. 3-7: Verifikation Gesetz von Darcy für H₂O-Permeabilitätsprüfstand.

Zum Nachweis der Gesetzmäßigkeit von Darcy (Gleichung (2-7)) für den vorgestellten Versuchsaufbau werden Verifikationsmessungen durchgeführt (NCF-2.1). Variiert werden hierbei die Höhe der Wassersäule und damit der angelegte Druck p auf der einen Seite und auf der anderen Seite die Kavitätshöhe und somit der erzielte FVG V_f . Den ersten Fall zeigt Abb. 3-7 (1), aufgetragen über dem Volumenstrom, und den zweiten Fall Abb. 3-7 (2) über der Permeabilität. In beiden Fällen ist der von Darcy (entsprechend Gleichung (2-12)) postulierte Zusammenhang erfüllt; Die Proportionalität von

Volumenstrom und Druckabfall ($Q_{fluid} \sim \Delta p$) sowie von Permeabilität und FVG bei logarithmischer Auftragung ($\log K \sim V_f$) sind gegeben.

Damit gilt für die durchschnittliche ebene Permeabilität K_{12} bei einem definierten Faservolumengehalt V_f nach [139]:

$$K_{12} = K_{rr} = \frac{Q_{fluid} \cdot \mu_{fluid} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi \cdot t_{sample} \cdot (p_{mould} - p_{\infty})} \quad (3-1)$$

mit:	K_{rr}	radiale Permeabilität bei einem definierten FVG [m ²]
	Q_{fluid}, μ_{fluid}	Volumenstrom [m ³ /s] und dyn. Viskosität [Pas]
	t_{sample}	Dicke der Probe [m]
	d_o, d_i	durchströmter äußerer u. innerer Durchmesser [m]
	p_{mould}, p_{∞}	Druck in der Kavität u. Umgebungsdruck [Pa]

wobei für den Volumenstrom gilt:

$$Q_{fluid} = \frac{V_{fluid}}{t_{flow}} \quad (3-2)$$

mit:	V_{fluid}	Volumen des durchgeflossenen Fluids [m ³]
	t_{flow}	die für den Durchfluss benötigte Zeit [s]

und sich die dynamische Viskosität wie folgt berechnet [170]:

$$\ln\left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_0}\right) = a + b \frac{T_0}{T_{\infty}} + c \left(\frac{T_0}{T_{\infty}}\right)^2 \quad (3-3)$$

mit:	μ_{∞}, μ_0	Viskosität bei Umgebungstemperatur u. bei $T_0 = 273$ K
	T_{∞}, T_0	Umgebungstemperatur und $T_0 = 273$ K
	a, b, c	temperaturabhängige Parameter

Die temperaturabhängige Dichte von Wasser folgt aus [171]:

$$\rho_{H_2O} = \frac{999,8 + 17 \cdot 10^{-3} \cdot T - 8 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1,1 \cdot 10^{-7} \cdot T^4}{1 + 0,0169 \cdot T} \quad (3-4)$$

Analog kann die Permeabilität in transversaler Richtung K_{33} berechnet werden:

$$K_{33} = K_{zz} = K_3 = \frac{Q_{fluid} \cdot \mu_{fluid} \cdot t_{sample}}{A_{sample} \cdot (p_{mould} - p_{\infty})} \quad (3-5)$$

mit: K_{33}, K_{zz}, K_3 transversale Permeabilität bei einem def. FVG [m^2]

Q_{fluid}, μ_{fluid} Volumenstrom [m^3/s] und dyn. Viskosität [Pas]

t_{sample}, A_{sample} Dicke und durchströmte Fläche der Probe

p_{mould}, p_{∞} Druck in der Kavität u. Umgebungsdruck [Pa]

Die Ergebnisdarstellung erfolgt mittels Gleichung (3-6) wie in Abb. 3-8 (1) visualisiert wahlweise als Permeabilität K_x über dem FVG V_f oder als Permeabilität $K_{x,tar}$ über dem angestrebten Ziel-FVG $V_{f,tar}$. Ebenso ist die Darstellung von K_x Abb. 3-8 (2) in Abhängigkeit von der Kavitätshöhe t üblich.

$$K_{x,tar} = K_x \cdot e^{B_x(V_f - V_{f,tar})} \quad (3-6)$$

mit: $K_x, K_{x,tar}$ gemessene Permeabilität bei Kavitätshöhe t und errechnete Permeabilität beim Ziel-FVG

$V_f, V_{f,tar}$ real erzielter FVG und angestrebter Ziel-FVG

B_x B-Parameter: Steigung der Exponentialfunktion, gleichbedeutend mit dem Abfall der Permeabilität über dem FVG

Wird die Differenz $V_f - V_{f,tar}$ zu Null, ergibt sich:

$$K_{x,tar} = K_x \quad (3-7)$$

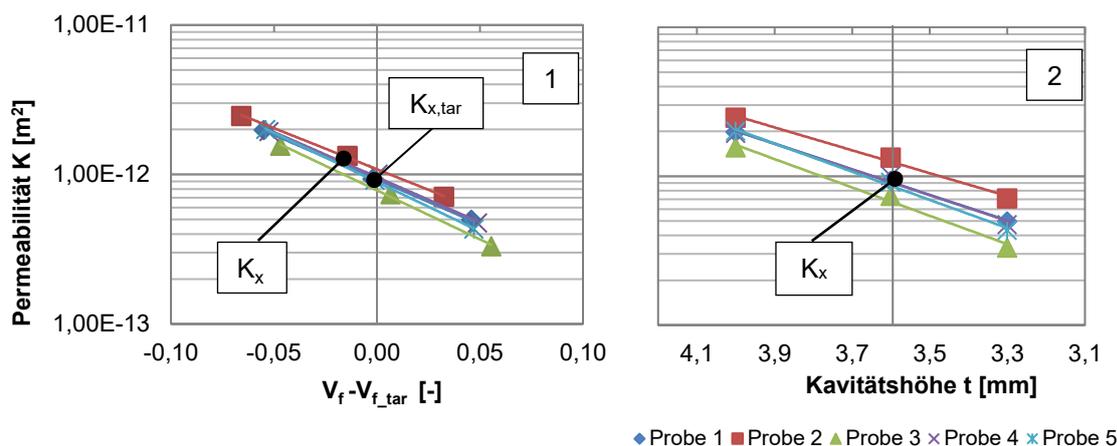


Abb. 3-8: Ergebnisdarstellung H₂O-Permeationsprüfung.

3.2.1.3 Kompaktierungsprüfung

Zur Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten CF-NCF wird ein Versuchsaufbau in Anlehnung an DIN 53883 [141] genutzt. Die Prüfung erfolgt durch Verfahren eines Druckstempels, geführt von einer universellen Zug-Prüfmaschine in transversaler Richtung (Fa. Zwick GmbH & Ko KG, Ulm, Typ: 250 kN Allround mit 1000 mm Arbeitsbreite). Die textile Probe wird hierbei zwischen zwei planparallele Platten (Druckstempel und Druckplatte) eingebracht, siehe Abb. 3-9. Der Probenkörper (100 x 100 mm) ist größer als der Prüfstempel selbst gewählt ($\varnothing = 60$ mm), um Randeffekte auszuschließen.

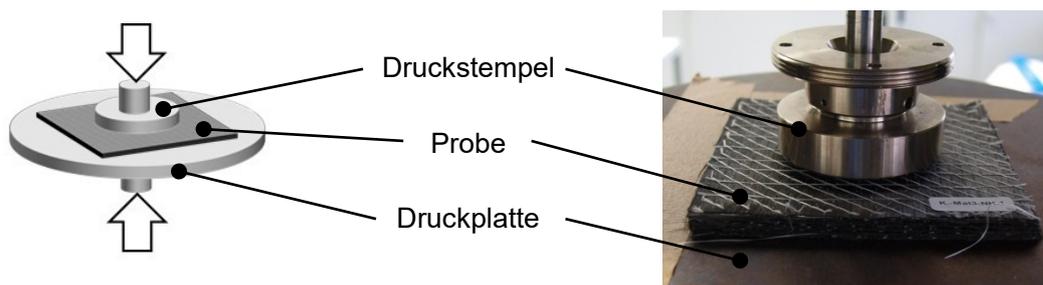


Abb. 3-9: Versuchsaufbau Kompaktierungsprüfung.

Die Prüfung selbst erfolgt über ein lineares Weg-gesteuertes Profil. Aufgezeichnet wird die zum Zusammendrücken der Probe notwendige Kraft F abhängig vom Weg x . Mit bekannter Stempelgeometrie und Probenmasse werden die erhaltenen Kraft-Weg-Verläufe in Kompaktierungsspannungen σ_{comp} über die Zeit t , die Probendicke oder über den Faservolumengehalt V_f aufgetragen. Bedingt durch das viskoelastische Verhal-

ten eines C-Faser-Textils muss der Prüfzyklus mit einer definierten Geschwindigkeit durchlaufen werden. Diese ist abhängig vom jeweiligen Materialtyp und Lagenaufbau festgelegt. Andernfalls sind die erhaltenen Werte nicht vergleichbar, siehe Kap. 2.2.3. [172]

Abb. 3-10 zeigt einen repräsentativen Verlauf der Kompaktierungsspannung zweier unterschiedlicher Proben über der Zeit (oben) und dem FVG (unten).

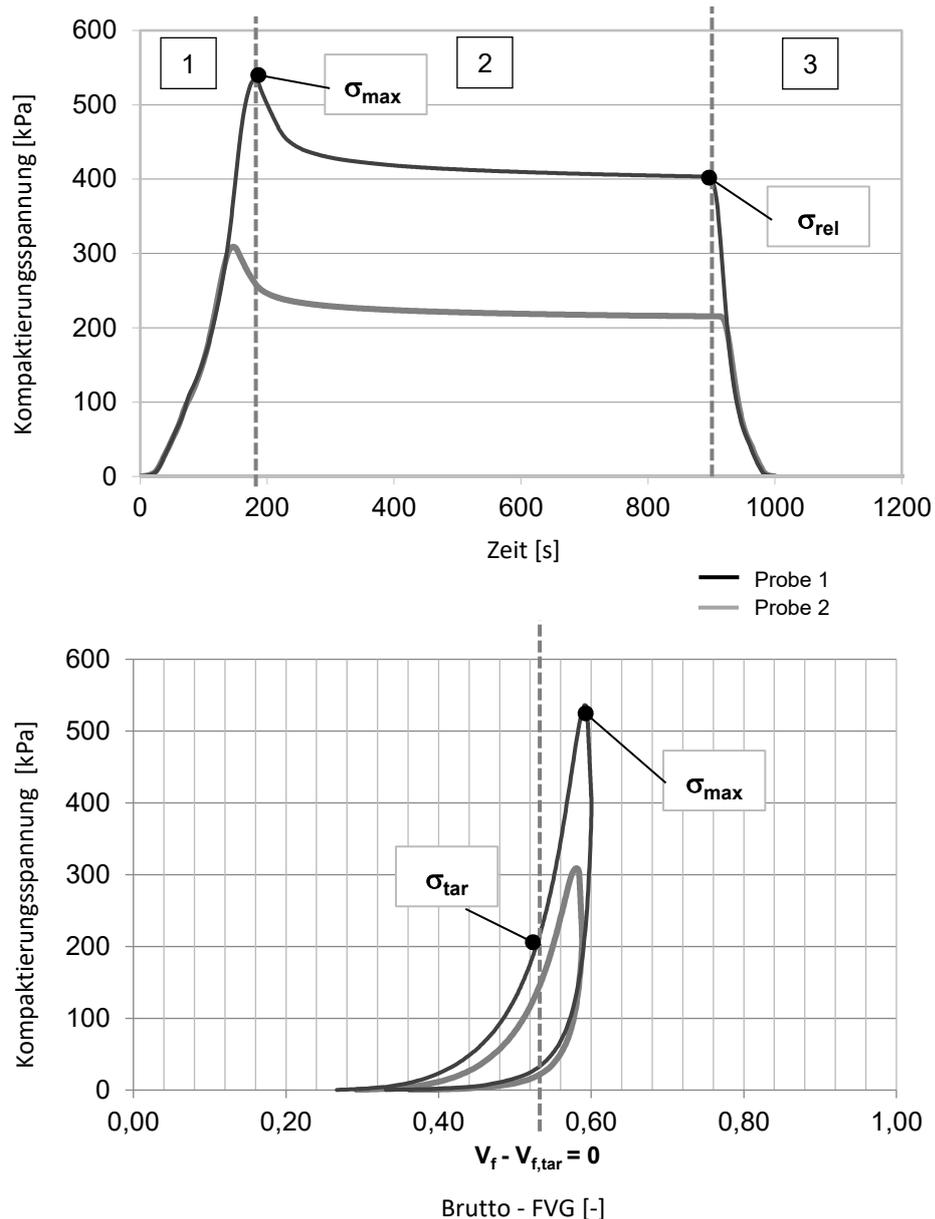


Abb. 3-10: Ergebnisdarstellung der Kompaktierungsprüfung über der Zeit (oben) und dem FVG (unten).

Der Versuchsablauf gliedert sich in drei Phasen: In der Belastungsphase (1) wird das Halbzeug über den Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ hinaus bis zur maximalen Kompaktierungsspannung σ_{max} belastet. Danach anschließend folgt die Relaxationsphase (2). Hier

wird der Prüfstempel für einen diskreten Zeitraum (60 s) bei maximalen V_f gehalten. Der sich einstellende Kraftabfall wird als Relaxation bezeichnet und liefert die Relaxationsspannung σ_{rel} . Am Ende des Prüfzyklus wird die Kavität in der sog. Entlastungsphase (3) geöffnet.

Als Ergebnis lässt sich die Kompaktierungsspannung σ_{tar} beim Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ (vgl. Abb. 3-10 (unten)) entsprechend Gleichung (2-7) berechnen.

$$\sigma_{tar} = \sigma_{comp} \cdot e^{B_{comp}(V_f - V_{f,tar})} \quad (3-8)$$

mit:	$\sigma_{comp}, \sigma_{tar}$	gemessene Druckspannung und Druckspannung beim Ziel-FVG
	$V_f, V_{f,tar}$	real erzielter FVG und angestrebter Ziel-FVG
	B_{comp}	B-Parameter: Steigung der Exponentialfunktion, gleichbedeutend mit der Änderung der Kompaktierungsspannung über dem FVG

Der Druckspannungsverlauf wird analog zur Permeationsprüfung mit einer Exponentialfunktion beschrieben. Der B-Parameter B_{comp} beschreibt dabei die Änderung der Kompaktierungsspannung σ über dem FVG. Weiterhin ist die sog. Nenndicke d_{130kPa} [mm] der textilen Probe bei einer definierten Kompaktierungsspannung σ_{130kPa} (hier: 130 kPa) ein Resultat dieser Prüfung. [173-174]

3.2.2 Imprägnierwerkzeuge

Zur Beurteilung der Injektionsfähigkeit der CF-NCF stehen zwei unterschiedliche RTM-Prüfstände zur Verfügung: der ebene, rechteckige Fließkanal im Technikumsmaßstab (bis max. 30 bar Injektionsdruck, das sog. Plattenwerkzeug) und das dreidimensionale, serienäquivalente Versuchswerkzeug „Bodenelement“, konzipiert für den Hochdruckbetrieb (bis max. 100 bar Forminnendruck infolge des Injektionsdrucks und 150 bar beim Schließen des Werkzeugs). Diese beiden Imprägnierwerkzeuge werden im Weiteren detailliert.

3.2.2.1 2D-Hochdruckinjektion: Plattenwerkzeug (2D-HD-RTM)

Das im Hochdruckbereich eingesetzte Plattenwerkzeug (PW) ist in Abb. 3-11 dargestellt. Geteilt in Werkzeugoberseite (WZG-OT) und Werkzeugunterseite (WZG-UT) stellt dieses PW eine Kavitätsfläche von 750 x 300 mm² zur Verfügung. Die Höhe der Kavität (und einhergehend der FVG) ist von 1,8 – 2,2 mm mittels Werkzeugeinsätzen

(sog. Wechselrahmen) unterschiedlicher Dicke variierbar. Injiziert wird über einen Linienanguss entlang der temperierten Kavität hin zur Entlüftung. Die eingebrachten Drucksensoren (drei Stück in Reihe) detektieren dabei den auftretenden Formindendruck. Weiterhin ist in der vorliegenden Abbildung eine nur teilweise imprägnierte Komponente im Formnest dargestellt. Der benetzte Bereich und die Fließfront sind deutlich zu erkennen und visualisieren damit die Injektionsrichtung.

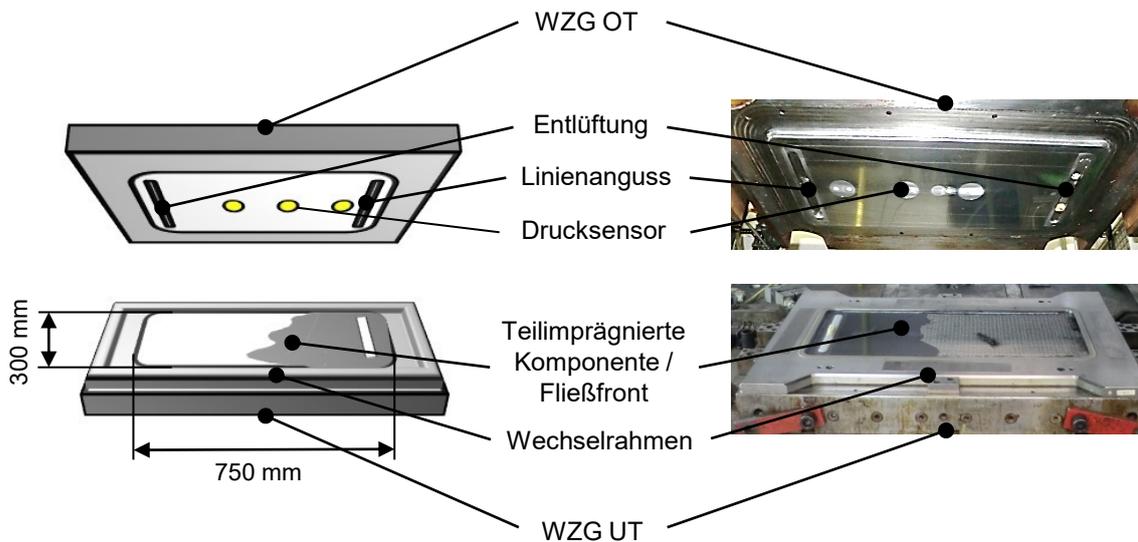


Abb. 3-11: Werkzeugober- und -unterteil des Plattenwerkzeugs.

Untersucht werden ausschließlich sog. Monomaterialaufbauten, d. h. Stacks, die aus nur einem Gelegetyp hergestellt werden. Die Faserorientierung der Einzelgelegetlagen wird hierbei entlang der Injektionsrichtung, also vom Anguss zur Entlüftung, ausgerichtet. Zur Versuchsdurchführung der 2D-HD-RTM-Experimente wird das PW auf einer Presse der Joos Maschinenfabrik GmbH & Co KG, Pfalzgrafenweiler installiert, die eine Presskraft von 1500 kN zur Verfügung stellt. Die RTM-Presse ist Teil einer ebenen Prozesskette bestehend aus Heizpresse, Abkühlschleife, Beschnittstanze und der bereits angesprochenen RTM-Presse, siehe Abb. 3-12. Diese Prozesskette gliedert sich in Anlehnung an den Serienprozess in folgende Einzelschritte:

- Aufheizen des Stacks:
Der jeweilige CF-Lagenaufbau (Stack) wird bei definiertem FVG und einer spezifizierten Zeitdauer (30 s) und Heiztemperatur (215 °C) erwärmt. Dies garantiert einen definierten Wärmeeintrag, der den Pulverbinder im Textil aufschmilzt.
- Pressen und Beschneiden des Preforms:
Das Preformen entspricht im ebenen Zustand einem Kaltpressprozess (ebenfalls bei definiertem FVG und diskreter Zeitdauer). Durch das Abkühlen erstarrt der Pulverbinder und verfestigt den trockenen Stack zum Preform.

- Injektion der Komponente:**
 Der Preform wird in das ebene PW eingelegt und die Kavität bis zum Zielfaservolumengehalt geschlossen (Die Pressensteuerung ermöglicht unterschiedliche Weg-gesteuerte Profile). Nach Evakuierung der Kavität (0,1 bar Absolutdruck) mittels an die Werkzeugentlüftung angeschlossenen Vakuumpumpen startet die Injektion des Harzsystems (XB3585/XB3458) über den Stranganguss. Eine 2K-Injektionsanlage der Fa. Dekumed GmbH & Co KG, Bernau (Typ: U300 2K RTV) stellt dabei ein konstantes Austragsvolumen und einen Injektionsdruck von bis zu 30 bar bereit. Das Werkzeug und das Harz werden auf 100 °C temperiert. Weiterhin wird die Entformung der imprägnierten CFK-Komponente durch den Einsatz von externem Trennmittel auf fluorierter Kohlenwasserstoffbasis (manuell mittels Sprühens appliziertes Teflonwachs) sichergestellt.

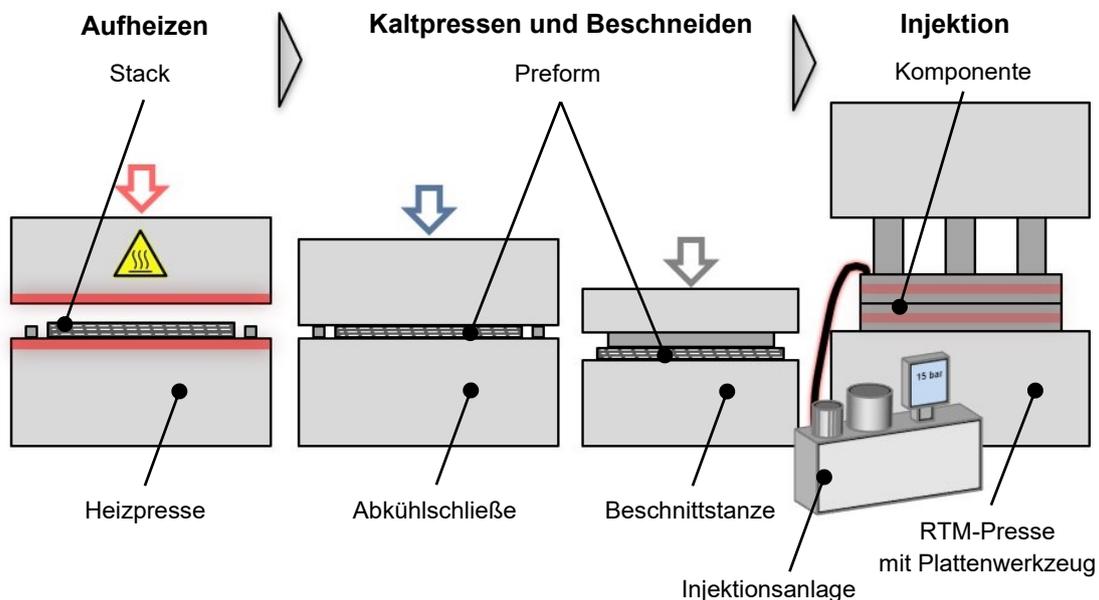


Abb. 3-12: Versuchsaufbau 2D-RTM-Prozesskette in Anlehnung an [165].

Als Resultat der ebenen Imprägnierungsversuche lassen sich einerseits der sich einstellende Forminnendruck und andererseits das erzielte Füllbild festhalten. Die Druckbegrenzung bei 15 bar Kavitätinnendruck liefert hierbei bewusst nur partiell imprägnierte Preforms und erlaubt nach erfolgter Injektion die Analyse der Fließfront. Druckprofil und Fließfrontverlauf geben bei konstanten Prozessparametern Aufschluss über das Imprägnierverhalten der eingesetzten Verstärkungstextilien, da die Füllung des Bauteils je nach Typ der verwendeten CF-NCF unterschiedlich ausgeprägt ist.

3.2.2.2 3D-Hochdruckinjektion: Bodenwerkzeug (3D-HD-RTM)

In Abgrenzung zu der zuvor beschriebenen ebenen Prozesskette bildet die dreidimensionale Hochdruck-RTM-Versuchsumgebung (3D-HD-RTM) einen serienäquivalenten

Hochdruckinjektionsprozess eines mehrfach gekrümmten Schalenbauteils ab. Die verwendete Bauteilgeometrie entspricht in Form und Dimension einem Bodenelement des BMW i3¹⁹, siehe Abb. 2-11 im vorangegangenen Kap. 2.1.4.

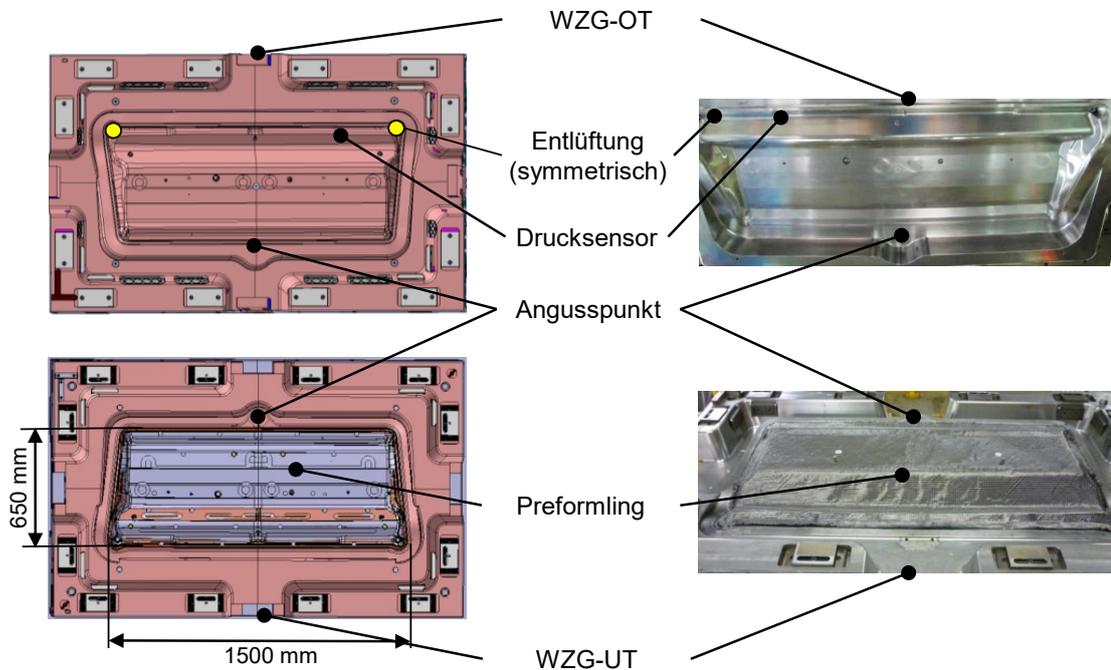


Abb. 3-13: Werkzeugober- und -unterteil des Bodenwerkzeugs.

Abb. 3-13 stellt das Formnest des geöffneten Bodenwerkzeugs im Werkzeugober- (WZG-OT) und im Werkzeugunter- (WZG-UT) teil dar. Das geschlossene Werkzeug ist im Anhang A Abb. A-15 abgebildet. Weiterhin sind der Angusspunkt, die Position der Werkzeugentlüftung und des Forminnendrucksensors in der Kavität gekennzeichnet. Die projizierte Kavitätsfläche umfasst hierbei ca. 650 x 1500 mm². Im WZG-UT ist in der untenstehenden Abbildung exemplarisch ein Preform eingelegt.

Als Versuchsmaterialien kommen im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Plattenwerkzeug (Kap. 3.2.2.1) sog. Multimaterialaufbauten zum Einsatz, d. h. achsensymmetrische MD-Stacks aus unterschiedlichen Gelegetypen gemäß Kap. 2.1.2.

Die einzelnen Prozessschritte zur Versuchsdurchführung am Bodenwerkzeug entsprechen dem in Kap. 2.1 vorgestellten Ablauf. D. h. die notwendigen CF-Lagenaufbauten werden über die vollautomatisierten Stackanlagen konfektioniert und die Umformung mit einem der Bauteilgeometrie entsprechenden zweiseitigen Preformwerkzeug (vgl. Kap. 2.1.3) realisiert, bevor die Tränkung mit der Matrix im HD-RTM-Verfahren erfolgt (vgl. Kap. 2.1.4).

¹⁹ im Serienbetrieb wird das Bodenelement im Nasspressverfahren hergestellt. Das hier verwendete RTM-Werkzeug ist ein Versuchswerkzeug.

Abb. 3-14 zeigt die Aufsicht (1) einer vollständig imprägnierten Komponente und die zugehörige Kavität im WZG-UT (2). In beiden Abbildungen ist der Angusspunkt hervorgehoben. Darüber hinaus ist in der Komponentendarstellung (1) der resultierende Injektionsweg der Matrix anhand einer schematischen Fließfrontausbreitung skizziert. Im WZG-UT (2) sind weiterhin zwei unterschiedliche linienförmige Angusskanäle gekennzeichnet: ein „kurzer“ Angusskanal (a) sowie ein „verlängerter“ Kanal (b).

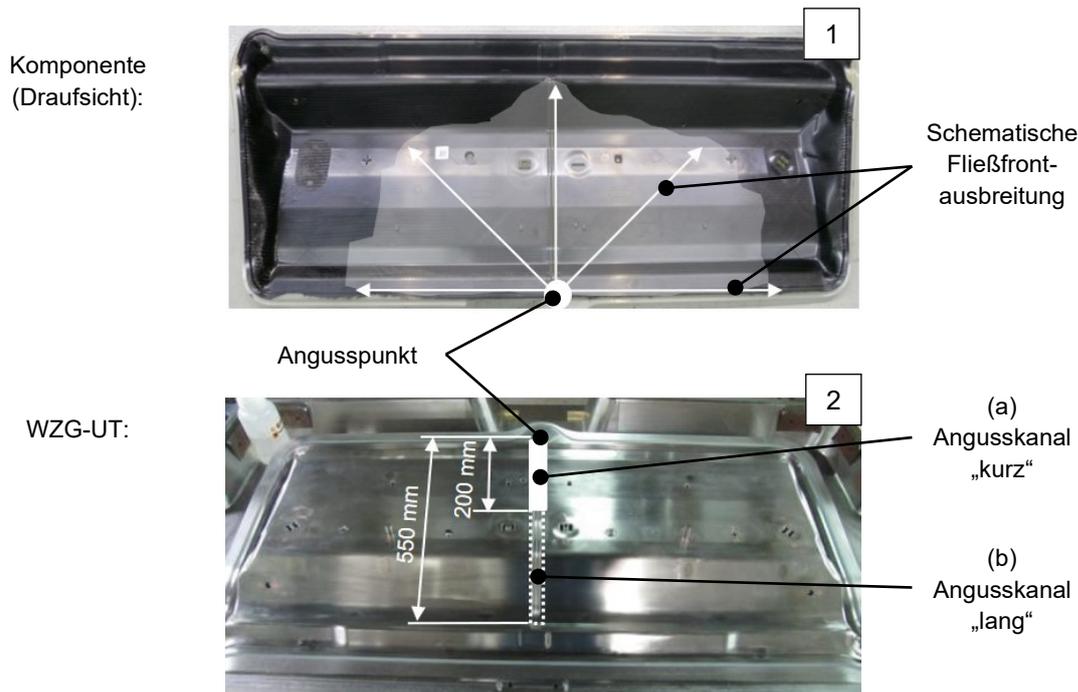


Abb. 3-14: Injektionsstrategie für das Bodenwerkzeugs.

Zur Analyse des Füllverhaltens wird im Rahmen der Injektionsversuche dieser Arbeit der linienförmige „kurze“ Anguss (a) eingesetzt. In der Folge verlängert sich bei der Imprägnierung der Injektionsweg der Matrix durch das Halbzeug hindurch. Die vollständige Bauteilfüllung wird damit bewusst erschwert. Im Gegenzug ermöglicht dieser „verkürzte Anguss“ die optische Begutachtung der Matrixausbreitung nach erfolgter Injektion anhand der nur teilweise gefüllten Komponenten.

Neben diesen Füllstudien (Begutachtung des Injektionsergebnisses am fertigen Bauteil) wird die Analyse der Forminnendruckverläufe der jeweiligen Imprägnierversuche zur Beurteilung der Injektionseignung des Preforms herangezogen. Die Aufzeichnung der zeitlichen Forminnendruckänderungen analog zum zweidimensionalen Plattenwerkzeug über kapazitative Sensoren ermöglicht die Korrelation des Kavitätsinnendruckverlaufs zum jeweiligen erzielten Injektionsergebnis, wie in Kap. 2.2 bereits veranschaulicht.

3.2.3 Fazit: Qualifizierungslogik

Aus der Kombination der im vorangegangenen Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2 vorgestellten Versuchsmethoden und den im Kap. 2.3.2 diskutierten Prüftechnologien leitet sich die Logik für die Qualifizierung der verwendeten CF-NCF ab. Kern der Qualifizierungslogik bildet der Dreisprung aus optischer Gelegeanalyse, gefolgt von der Permeabilitäts- und Kompaktierungsuntersuchung und der anschließenden Verifikation im Injektionsprozess im ebenen oder serienäquivalenten dreidimensionalen Fall. Abb. 3-15 bringt diese Logik in den Kontext der einzelnen Prozessschritte und der jeweiligen Analyseebenen:

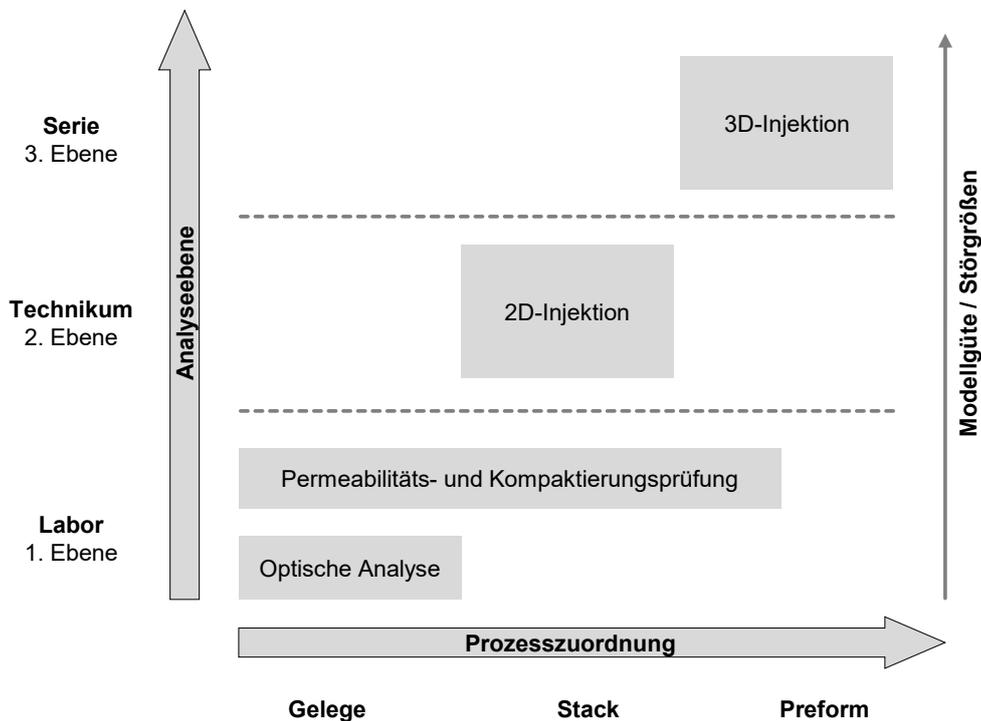


Abb. 3-15: Qualifizierungslogik zur Untersuchung des Eigenschaftsprofils von CF-NCF in Anlehnung an [175].

Die aufgeführten Analyseebenen – Labor-, Technikums- und Serienebene – spiegeln auf der einen Seite die zugrundeliegende Modellgüte des eingesetzten Versuchsaufbaus wider. Diese steigt vom Labor-, über den Technikumsmaßstab bis zur Abbildung der Serienbedingung an. Auf der anderen Seite bieten diese Analyseebenen die Möglichkeit, den jeweiligen Untersuchungsgegenstand von etwaigen Störgrößen oder Effektüberlagerungen zu isolieren. Dies gelingt durch die Vereinfachung der Versuchsumgebung vom Serienmaßstab hin zum modellhaften Laborversuch. Es ist ersichtlich, dass die Laborebene zur Identifikation einer Stellgröße unter idealen Prozessbedingungen besonders geeignet ist. Der tatsächliche Nachweis der Relevanz kann aber erst auf der Serienebene bestätigt werden.

Mit der oben generierten Qualifizierungslogik werden in den folgenden Kapiteln die identifizierten Wirkmechanismen (d.h. die relevanten Produkteigenschaften und die korrespondierenden Stellgrößen gemäß Tab. 2-4) systematisch untersucht und sukzessive verifiziert. Die Einteilung der dabei eingesetzten Injektionsversuche beruht im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf dem in Tab. 3-6 festgelegten Schema. Labor-, Technikums- und Serienmaßstab unterscheiden sich hinsichtlich Druckbereich (Forminnendruck infolge Injektionsdruck: ≤ 5 bar, ≤ 30 bar und ≤ 100 bar) und Injektionsstrategie (mit konstantem Druckniveau ($p = const.$) oder mit konstantem Austragsvolumen ($Q = const.$)).

Tab. 3-6: Einteilung der Analyseebenen in Abhängigkeit von der Injektionsstrategie.

Ebene	Forminnendruck	Druckbereich²⁰	Injektionsstrategie
Labor	$p_{\max} \leq 5$ bar	Niederdruck (ND)	$p = const.$
Technikum	$p_{\max} \leq 30$ bar	Hochdruck (HD)	$Q = const.$
Serie	$p_{\max} \leq 100$ bar	Hochdruck (HD)	$Q = const.$

²⁰ Die Einteilung von Niederdruck und Hochdruckbereich ist in der Literatur uneinheitlich. Abhängig von der Prozessführung im RTM-Prozess sowie dem Betrachtungsraum und -zeitpunkt (Mischkopf oder Formnest; Injektions- oder Nachdruckphase) ergeben sich unterschiedliche Definitionen. [176-178]

In der vorliegenden Arbeit wird die Definition nach obiger Tabelle Tab. 3-6 abhängig vom Forminnendruck der Kavität infolge des Injektionsdrucks angewandt.

4 Analyse der eingesetzten Halbzeuge

Abschnitt 4 befasst sich mit der Untersuchung und Modifikation der eingesetzten Halbzeuge: Es werden sowohl die unidirektionalen Einzelgelegelagen (UD-NCF) im Kap. 4.1 sowie der multidirektionale Gelegelagenstapel (MD-Stack) im Kap. 4.2 analysiert. Die identifizierten Einflussgrößen und Stellgrößen auf die Imprägnierung werden dabei mit der im vorangegangenen Abschnitt entwickelten Qualifizierungslogik (Labor-, Technikums-, und Serienprozessebene) bewertet und quantifiziert. Im Fokus stehen die Parameter Grammatik, Wirkfadenspannung, Bindungstyp, Stichanzahl des CF-NCF sowie Lagenanzahl und -folge im Gelegestapel. Die Kerneergebnisse werden im jeweiligen Fazit Kap. 4.1.2 für UD-NCF und Kap. 4.2.3 für MD-Stack dargestellt. Das Ergebnis sind hinsichtlich ihrer Architektur modifizierte Textilien.

4.1 Bewertung der textilen Architektur (UD-NCF)

4.1.1 Analyse der Fließkanalgeometrie

In den vorangegangenen Kapiteln wurde als wichtige Zielgröße für die vollständige Imprägnierung eines NCF mit der Matrix neben dessen Strukturstabilität vor allem die Permeabilität des Textils identifiziert. Gemäß Tab. 2-4 (Kap. 2.3.1) sind bekannte Einflussparameter Art und Konstruktion des Halbzeugs, im Speziellen die Grammatik der Verstärkungstextilien (also das Flächengewicht), die Fadenspannung des Wirkgarns, die Stichlänge und -breite und die Bindungsart. Die Verbindung dieser einzelnen Stellgrößen gelingt mit den sog. „Engineered Gaps“, den Fließkanälen (FK) in der textilen Fläche.

Bei der Herstellung von NCF werden durch das Verwirken der textilen Flächen einzelne Rovings abgebunden. In der Folge entstehen Zwischenräume – die Fließkanäle (FK) – im Gewirke. Entlang der FK kann das Harz infolge des bei der Injektion angelegten Druckgradienten strömen und – überlagert durch die Kapillarkwirkung – in den Roving eindringen, entsprechend der in Kap. 2.2.2 (vgl. Abb. 2-16) vorgestellten mesoskopischen Betrachtungsweise der Imprägniermechanismen. Demnach müssen die geometrische Form und ebenso die Anzahl der Fließkanäle einen wesentlichen Beitrag zur makroskopischen Permeabilität einer textilen Fläche leisten, was in diesem Kapitel eingehend untersucht wird.

Als Ausgangsbasis veranschaulicht Abb. 4-1 die Geometrie von Fließkanälen in einer Prinzipskizze. Diese zeichnen sich durch deren Länge l_{FK} , Höhe h_{FK} und Breite b_{FK} aus.

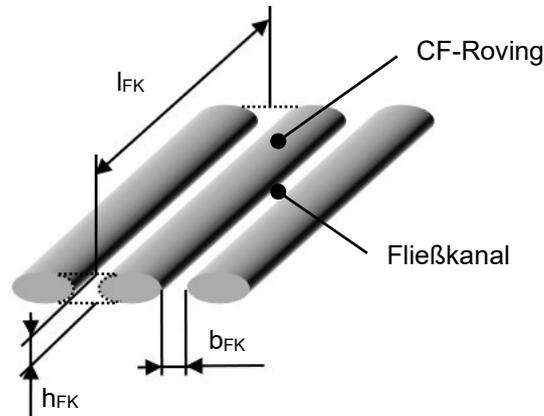


Abb. 4-1: Geometrische Darstellung des Fließkanals im CF-NCF.

Die Betrachtung des Gelegehalbzeugs entlang der generativen Faserverbundherstellung, zeigt, dass sich die Engineered Gaps eines CF-NCF ausgehend vom trockenen, ebenen Gelege weiterverfolgen lassen. Diese sind im Preform genauso zu identifizieren wie im späteren Bauteil. Abb. 4-2 zeigt dabei einen repräsentativen, realen Querschnitt durch einen sechslagigen Preform, visualisiert mittels CT (Computertomografie). Der Betrachtungsausschnitt stellt die dritte Lage im Kern des Halbzeugs, in diesem Fall NCF-2.1, dar [179]. Es sind Glasfäden, CF-Rovings sowie die dazwischenliegenden Fließkanäle der Länge l_{FK} zu erkennen.

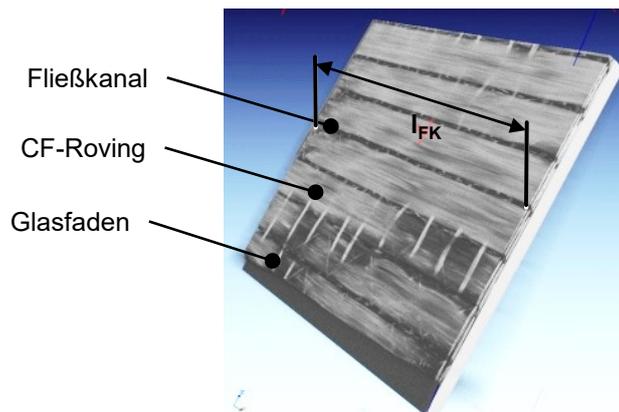


Abb. 4-2: CT-Aufnahme eines Preforms in Anlehnung an [179].

Eine Schnittansicht in Abb. 4-3 durch ein beispielhaftes Laminat (siebenlagiger Aufbau: 3,9,4,2,2,2,4,9,3), aufgenommen mittels Auflichtmikroskopie, bestätigt, dass die Fließkanäle auch nach der Hochdruckinjektion existent und gut erkennbar sind. Ein Fließkanal ist hier repräsentativ hinsichtlich seiner geometrischen Ausprägung (h_{FK} und b_{FK}) hervorgehoben.

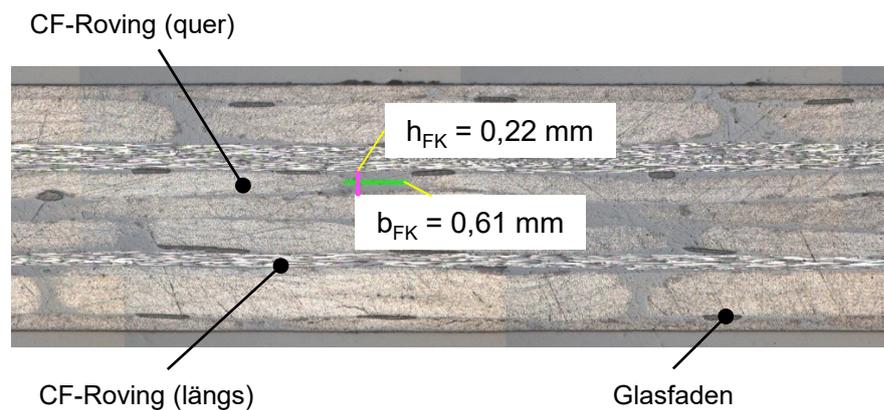


Abb. 4-3: Schliffbild eines ebenen Laminats.

Bei der weiteren Begutachtung der einzelnen zur Verfügung stehenden Gelegetypen wird schnell deutlich, dass sich die Ausprägung der Fließkanäle, abhängig von Grammat, gewählter Herstellparameter, C-Faserorientierung und Bindungsart u. a. in ihrer Form unterscheiden. Bereits in Abb. 4-3 sind unterschiedliche Fließkanalquerschnitte zu erkennen.

Die geometrische Ausprägung der Gaps muss dabei mit den eingangs aufgeführten Stellhebeln wie folgt korrelieren:

- $h_{FK} \leftrightarrow$ Grammat oder Flächengewicht des Geleges
- $b_{FK} \leftrightarrow$ Fadenspannung des eingesetzten Wirkfadens
- $l_{FK} \leftrightarrow$ Länge der Warenbahn
- geometrische Form \leftrightarrow Bindungsart
- Fließkanalanzahl \leftrightarrow Nadelteilung (Feinheit)

Diese Hypothesen werden nachfolgend genauer untersucht.

4.1.1.1 Einfluss Gelegetramatur (Fließkanalhöhe)

Es ist offensichtlich, dass sich die Höhe h_{FK} eines Gaps mit der Grammat der betrachteten Gelegetvariante ändert. Mit steigender Anzahl von Faserfilamenten, die pro Nadelteilung (Feinheit) zu einem Roving verwirkt werden, nimmt die „Dicke“ des Geleges transversal zu und damit ebenfalls die Höhe h_{FK} des Fließkanals. Je höher also das nominale Flächengewicht des Geleges ist, desto größer ist auch die vertikale Ausprägung des Fließkanals. Der resultierende größere Strömungsquerschnitt wiederum muss sich in einer höheren Permeabilität bemerkbar machen.

Für den entsprechenden Verifikationsversuch werden Gelege unterschiedlicher Grammaturn mit identischer textiler Konstruktion untersucht. Tab. 4-1 stellt die verwendeten Typen zusammen:

Tab. 4-1: Verwendete CF-NCF zur Analyse der textilen Grammaturn.

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]	Dicke bei 130 kPa [mm]
NCF-1.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33	0,20
NCF-2.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33	0,35
NCF-9.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33	0,65

Daneben wird für die oben gezeigten Varianten die Nenndicke bei einer definierten Kompaktierungsspannung (hier 130 kPa) gemessen, entsprechend der in Kap. 3.2.1.3 beschriebenen Kompaktierungsprüfung [174]. Diese repräsentiert die Fließkanalhöhe h_{FK} .

Bei Verdoppelung der Grammaturn ist eine Verdoppelung der Materialdicke zu erwarten. Der Erwartungswert läge damit auf Basis der Nenndicke von 0,2 mm bei NCF-1.1, bei 0,4 mm für NCF-2.1 und 0,8 mm für NCF-9.1. Dieser Effekt stellt sich aber nicht ein. So erreicht NCF-2.1 eine Dicke von 0,35 mm und NCF-9.1 0,65 mm, siehe Tab. 4-1. Grund hierfür ist der mit zunehmender CF-Grammaturn fallende Fremdmaterialanteil. D. h. im Verhältnis zum Flächengewicht der C-Faser verringert sich das Flächengewicht von Nähgarn, Glasvorlegung und Binder. Somit stellt sich eine „schwere“ Grammaturn (z. B. 600 g/m²) bezogen auf ihren Netto-C-Faseranteil „dünner“ dar als ein entsprechendes Gelege mit geringerem C-Faserflächengewicht (z. B. 300 g/m²). In der Folge ist die Materialdicke sowie das Kompaktierungsverhalten auch bei identischer textiler Konstruktion nicht aus dem Flächengewicht einer korrespondierenden Grammaturn interpolierbar.

Alle drei Materialtypen werden auf ihre Permeation in erster (K_1) und zweiter Haupt- richtung (K_2) hin untersucht²¹. Die gewonnenen Ergebnisse zeigt Abb. 4-4. Es werden die unterschiedlichen Grammaturn mit identischer Franse-Teilschuss-Bindung bzgl. K_1 - und K_2 -Permeabilität abhängig von Netto- und Brutto-Faservolumengehalt verglichen:

²¹ Der eingesetzte Versuchsaufbau des Instituts für Verbundwerkstoffe (IVW, Kaiserslautern) ist in Kap. 2.3.2.2 Abb. 2-20 beschrieben.

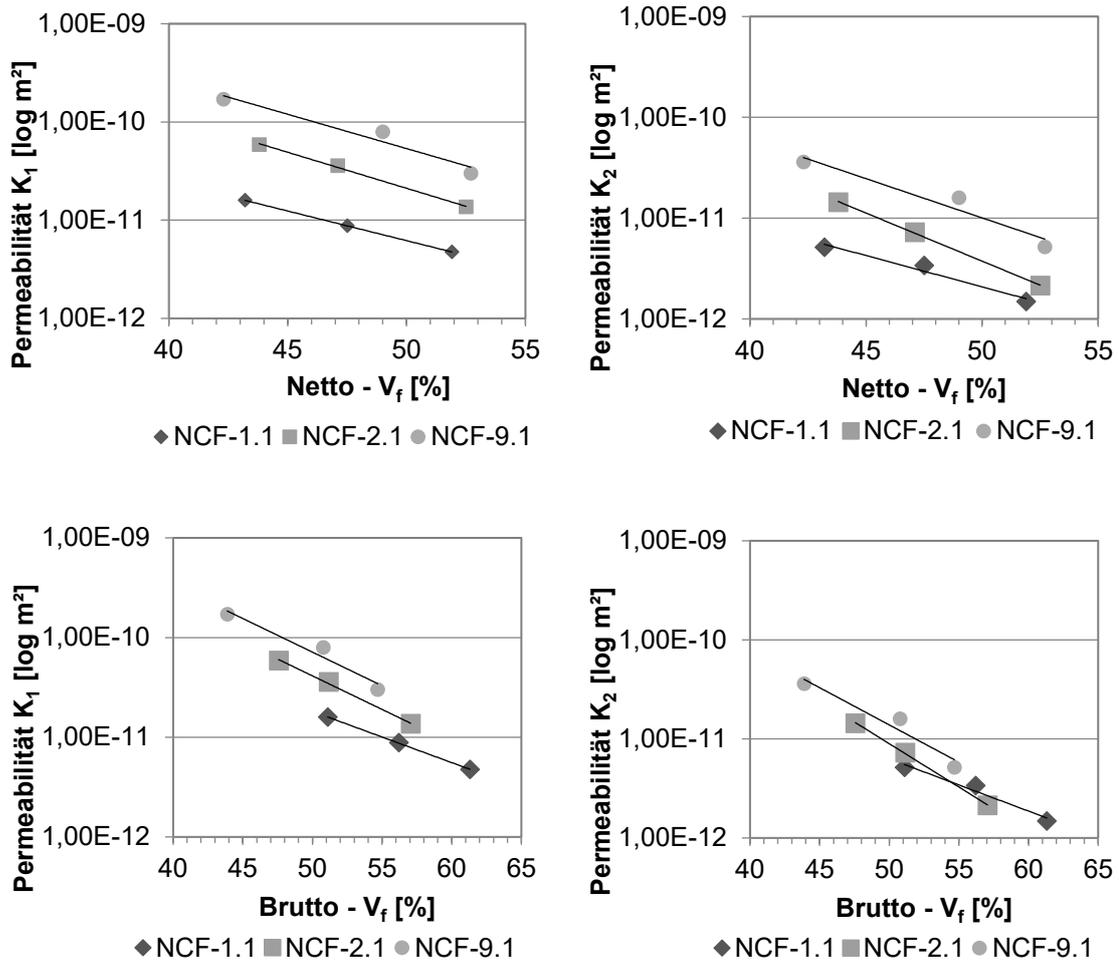


Abb. 4-4: Ergebnisdarstellung Permeabilitätsprüfung in Abhängigkeit der CF- Grammatur.

Zu beachten ist der logarithmische Auftrag über dem Netto- bzw. Brutto-FVG. Im ersten Fall wird der Gewichtsanteil der Fremdmaterialien (Glas, Garn und Binder) bewusst rechnerisch eliminiert und ausschließlich der CF-Anteil im FVG berücksichtigt, um das Verhalten der aus funktionaler Sicht dominierenden C-Faser zu charakterisieren. Bei der RTM-Injektion muss aber das Halbzeug gesamthaft inklusive der Fremdmaterialien imprägniert werden. Daher ist aus produktionstechnischer Sicht die Verwendung des Brutto-FVG zielführend. Infolgedessen beziehen sich sämtliche Faservolumengehaltangaben in Verlauf dieser Arbeit, wenn nicht explizit anders ausgewiesen, immer auf den Brutto-FVG.

Die dargestellten Ergebnisse bestätigen die Eingangsthese. In beiden Fällen steigt die Permeabilität in der Ebene mit zunehmendem Flächengewicht. Der Effekt wird jedoch vom steigenden Fremdmaterialanteil überlagert. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der Permeabilität in Abhängigkeit vom Brutto-FVG (Abb. 4-4 unten). In der Folge verringert sich die Differenz der Durchlässigkeiten der unterschiedlichen Grammaturen. Diese Differenz bleibt aber dennoch erhalten und ist deutlich messbar.

Entsprechende Injektionsversuche im Technikumsmaßstab (2D-RTM: Plattenwerkzeug, Druckbegrenzung bei 15 bar Forminnendruck) sollen die Korrelation vom Laborversuch zum Technikumsversuch bestätigen. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abb. 4-5 veranschaulicht. Basis sind je Materialtyp fünf Injektionsversuche:

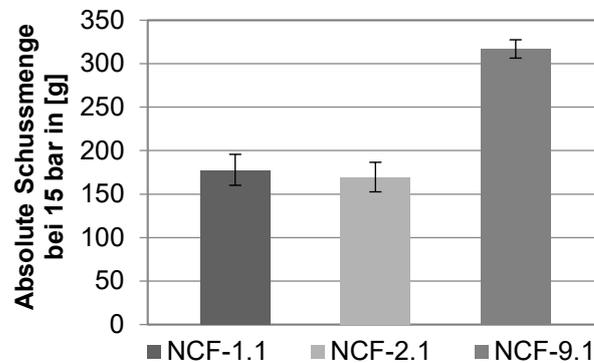


Abb. 4-5: 2D-RTM-Injektionsergebnis in Abhängigkeit der CF-NCF-Grammatur.

Im Vergleich zu den zuvor aufgezeigten Permeabilitätsprüfungen weicht NCF-1.1 (150 g/m^2) vom Erwartungshorizont ab. Ursächlich dafür ist der gewählte Lagenaufbau. Die 150 g/m^2 -Grammatur wird mit zehn, 300 g/m^2 (NCF-2.1) mit sechs und die 600 g/m^2 -Variante (NCF-9.1) mit drei Lagen aufgebaut, um eine vergleichbare Plattendicke von 2,2 mm zu erzielen. Somit erreicht die „leichteste“ Grammatur (150 g/m^2) hier nur ca. 45 % Brutto-FVG, wohingegen die beiden „schweren“ Grammaturen (300 g/m^2 und 600 g/m^2) jeweils bei 51 % Brutto-FVG liegen. Dementsprechend stehen die ermittelten ebenen Permeabilitäten bei den genannten Faservolumengehältern in Korrelation zum erzielten Injektionsergebnis. Eine schwere Grammatur und eine große Fließkanalhöhe h_{FK} begünstigen demnach die ebene Injektion.

Abb. 4-6 stellt zur Verdeutlichung exemplarische Schlibfbilder durch die einzelnen Plattenlaminare dar:

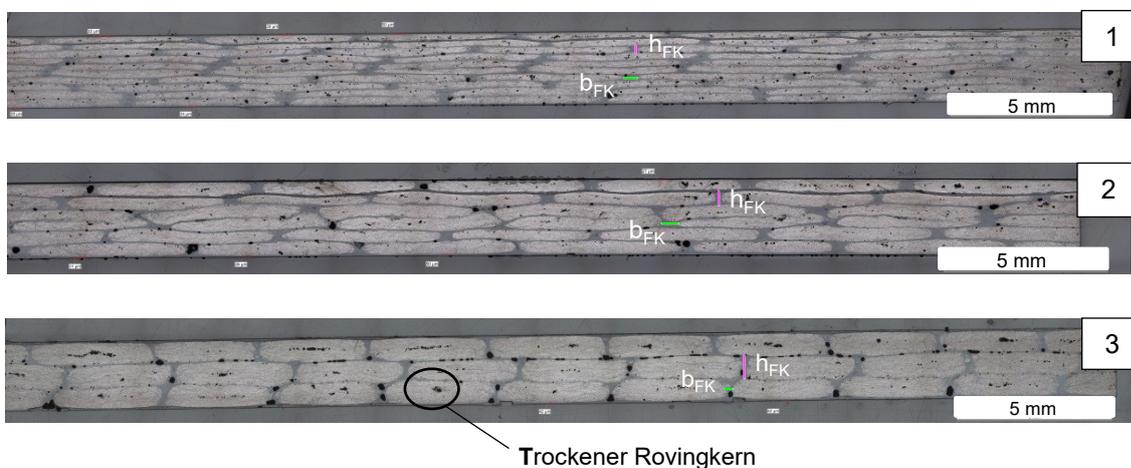


Abb. 4-6: Schlibfbilder ebener Laminare gleicher Wanddicke.

Zehnlageriger 150 g/m^2 -Aufbau (1), sechslageriger 300 g/m^2 -Aufbau (2) und dreilagiger 600 g/m^2 -Aufbau (3).

Ein zehnlagiger 150 g/m²-Aufbau (NCF-1.1, Brutto-FVG: 45 %) ist unter (1) abgebildet, ein sechslagiger 300 g/m²-Aufbau (NCF-2.1, Brutto-FVG: 51 %) unter (2) und abschließend ein dreilagiger 600 g/m²-Aufbau (NCF-9.1, Brutto-FVG: 51 %) unter (3). Die einzelnen Gelelagen und die geometrische Ausprägung der Fließkanäle (h_{FK} sowie b_{FK}) zwischen den Rovings sind deutlich zu erkennen.

Bei genauer Analyse der obigen Schliffbilder zeigt sich ein weiterer Effekt. Mit zunehmender Grammaturnimmt zwar die Makropermeabilität zu, aber in gleichem Maße wächst das Risiko von trockenen Bereichen im Kern der Faserbündel aufgrund des größer werdenden Rovingquerschnitts. In Abb. 4-6 (3) ist ein solcher Bereich hervorgehoben. Eine entsprechende Abstellmaßnahme wird in Kap. 4.1.1.4 diskutiert.

4.1.1.2 Einfluss Wirkfadenspannung (Fließkanalbreite und -länge)

Nachdem die Höhe eines Fließkanals h_{FK} als Einflussgröße auf die Imprägniereigenschaften bestätigt werden konnte, müssen konsequenterweise die Fließkanalbreite b_{FK} (FKB) und -länge l_{FK} gemäß Abb. 4-1 Kap. 4.1.1 untersucht werden. Hierbei ist die Fließkanallänge zur Länge der betrachteten Warenbahn entlang der C-Faser-Orientierung äquivalent und daher nur durch die spätere Bauteilgeometrie begrenzt.

Im vorangegangenen Kap. 4.1.1.1 konnte bei der Bestimmung der Fließkanalhöhe h_{FK} dargestellt werden, dass diese nicht linear aus der Grammaturn des jeweiligen CF-NCF interpolierbar ist. Folglich muss auch die Fließkanalbreite b_{FK} mit dem Flächengewicht variieren. Zu erwarten ist, dass sich die Fließkanalbreite unter Druckbeaufschlagung in Dickenrichtung zur Ausgangsbreite im unkompaktierten Zustand reduziert. Die entsprechenden Verifikationsexperimente werden anhand unterschiedlicher Kompaktierungszustände in einem Glasplattenwerkzeug durchgeführt, siehe Abb. 4-7 [168].

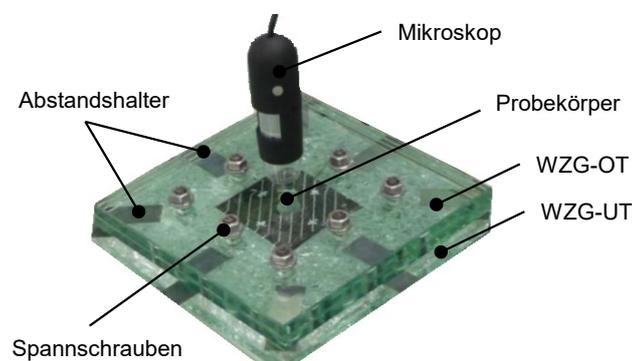


Abb. 4-7: Versuchsaufbau Glasplattenwerkzeug.

Der Probekörper wird hierbei zwischen zwei transparenten Werkzeughälften (Werkzeugoberteil (WZG-OT), Werkzeugunterteil (WZG-UT), beide Acrylglas) eingebracht und definiert komprimiert. Die Krafteinleitung erfolgt über Spanschrauben. Der FVG wird mittels Abstandshalter sichergestellt. Ein Auflichtmikroskop detektiert die Änderung der Fließkanalbreite abhängig vom jeweiligen Kompaktierungszustand.

Versuchsmaterialien sind die bereits bekannten Varianten NCF-1.1, NCF-2.1 und NCF-9.1. Die ermittelten Ergebnisse, normiert auf die Ausgangsbreite (1) im nicht kompaktierten Zustand, sind in der folgenden Abb. 4-8 dargestellt. Dabei ist abhängig von der geprüften Grammaturn die Fließkanalbreite im Kompaktierungszustand (2) (links, FVG = 43 % bzw. 38 %) und (3) (rechts, FVG = 58 % bzw. 49 %) veranschaulicht:

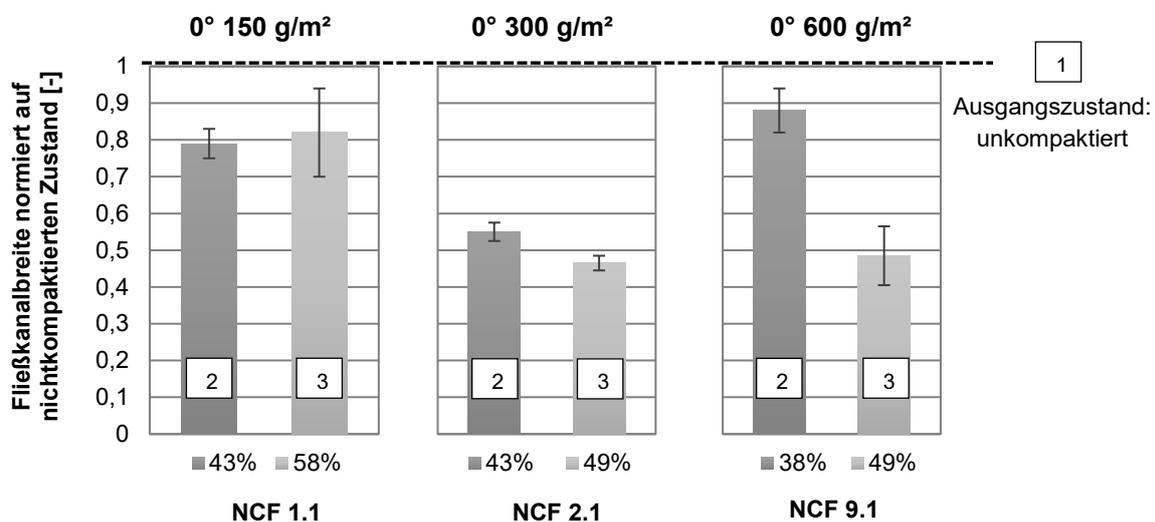


Abb. 4-8: Einfluss des Faservolumengehalts auf die Fließkanalbreite in Abhängigkeit der Grammaturn in Anlehnung an [168].

Die eingangs aufgestellte Annahme wird bestätigt. Beim Verpressen des Faserhalbzeugs auf den für die spätere Komponente notwendigen FVG verringern sich die Fließkanalbreiten. Die geprüften Varianten, mit Ausnahme der leichten 150 g/m² Grammaturn, verringern unter Last ihre Fließkanalbreite (im obigen Diagramm verdeutlicht durch die Erhöhung des FVG von 43 % auf 58 %). Es stellt sich eine Abhängigkeit von der gewählten Grammaturn ein, wobei sich die Breitenverminderung umgekehrt proportional zum Flächengewicht verhält. Die Betrachtung der auftretenden Kompaktierungsspannungen σ_{tar} bei einem beispielhaften Ziel-FVG von 53 % bestätigt den haptischen Eindruck. Die 600 g/m²-Textilien (NCF-9.1) sind „leichter“ zu verdichten als die 300 g/m²-Gelege (NCF-2.1) und diese wiederum leichter als die 150 g/m²-Varianten (NCF-1.1), siehe Abb. 4-9. Die erzielte Kompaktierungsspannung σ_{tar} bei 53 % FVG variiert in diesem Fall linear über dem Flächengewicht der untersuchten Gelege.

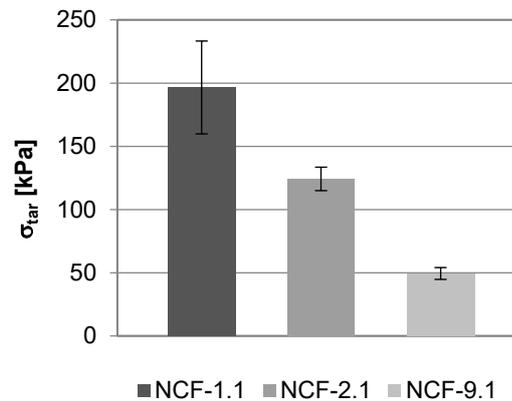


Abb. 4-9: Einfluss der Gelegegrammatur auf das Kompaktierungsverhalten.
Kompaktierungsspannung σ_{tar} bei einem Ziel-FVG V_f von 53 %.

Diese Untersuchung liefert auch die Erklärung für das gegensätzliche Verhalten des 0° 150 g/m^2 -Textils bei der Fließkanalbreitenbewertung in Abhängigkeit des Kompaktierungszustand. Die Verdichtung dieses Textils ist im unbelasteten Zustand bereits so deutlich ausgeprägt, dass schon ab einem FVG von ca. 43 % eine weitere Kompaktierung keine nennenswerten Unterschiede in der Fließkanalbreite erzeugt.

Die unterschiedlichen Grammaturn der $\pm 45^\circ$ - und 90° -Gelege verhalten sich analog (ohne Abbildung). Innerhalb der Einzelgrammaturn bleibt das Verhältnis der Fließkanalbreiten sogar unabhängig vom gewählten Bindungstyp erhalten. [168]

Bei der mikroskopischen Betrachtung der 0° - und $\pm 45^\circ$ -NCF wird allerdings ein weiterer Effekt deutlich: Die Gelege weisen lokale Inhomogenitäten entlang der Fließkanäle auf. Einzelfasern oder ganze Rovings kreuzen den Kanal. Diese ändern den resultierenden Strömungsquerschnitt von vollständig geöffnet bis hin zu lokal und wiederkehrend verschlossen. Abb. 4-10 veranschaulicht diese Beobachtung an einem 0° -Gelege (1) und einem $\pm 45^\circ$ -Gelege (2). Hervorgehoben sind neben der Stichlänge, Stichbreite und Fließkanalbreite jeweils drei unterschiedliche Fließkanäle. Auch wenn das Textil makroskopisch betrachtet homogen erscheint, zeigen sich hier auf mesoskopischer Ebene, lokale Inhomogenitäten im Verlauf der Fließkanäle. Diese sind entsprechend „gelb“ hervorgehoben.

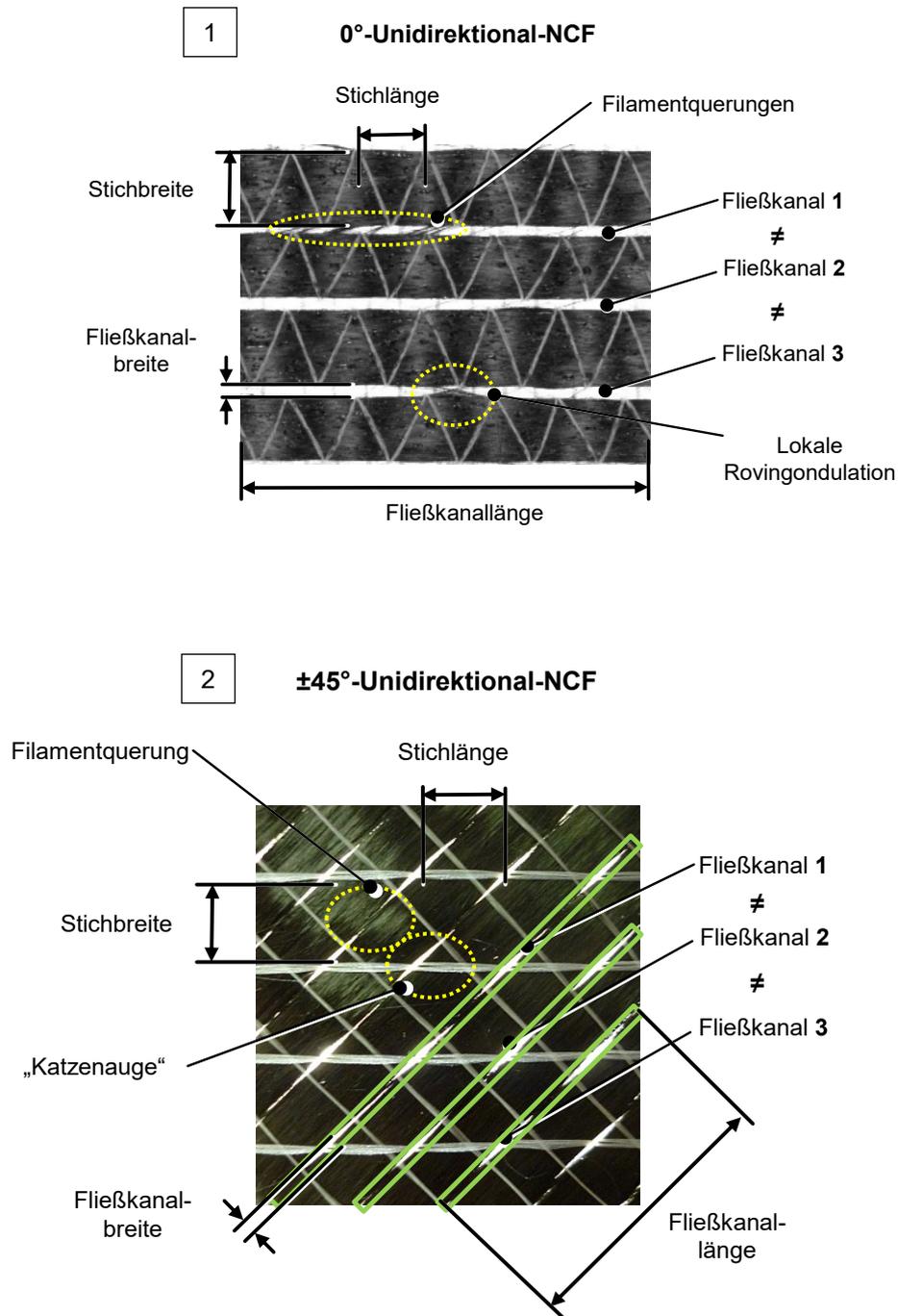


Abb. 4-10: Variabilität in der Fließkanalausprägung, 0°-Gelege (1) und ±45°-Gelege (2).

0°- und ±45°-Gelege unterscheiden sich dabei deutlich in Form dieser „Störungen“. Durchqueren bei den 0°-Orientierungen nur einzelne Filamente das Gap, verschließen bei den ±45°-Gelegen, bedingt durch das Verwirken in 45°-Richtung, ganze Rovings den Fließkanal. Es stellen sich sog. „Katzenaugen“ ein. D. h. der Fließkanal ist in seiner Ausprägung vollständig unterbrochen, siehe Abb. 4-10 (2). Dieser Effekt wird mit der Kenngröße „Fließkanal- oder Gassendurchgängigkeit“ (FKD) beschrieben. Die FKD bezeichnet das Verhältnis von zusammenhängender, freier Fließkanallänge zur betrach-

teten theoretischen Warenbahnlänge und gibt diesen Wert in Prozent wieder. Ist beispielsweise auf einer Gelegebahn von einem Meter Länge der Fließkanal nur auf 80 cm frei von Filament- oder Rovingquerungen, ergibt sich eine FKD von 80 %. Diese Störungen im Fließkanalverlauf setzen die Permeabilität herab und reduzieren die Injektionseignung.

Um den Einfluss beider Parameter b_{FK} (FKB) und FKD zu verifizieren und zu quantifizieren, werden entsprechende Versuchsmaterialien auf Basis des NCF-9.1 hergestellt. Durch die gezielte Variation der Wirkparameter (in diesem Fall Kettfadenspannung und Bindungsart) können die Fließkanalbreiten bewusst manipuliert werden. Tab. 4-2 zeigt die variierten Parameter. Der Einfluss der Gaphöhe h_{FK} unterschiedlicher Grammaturen wird durch die Verwendung nur einer Flächengewichtsvariante ausgeschlossen.

Tab. 4-2: Verwendete CF-NCF zur Analyse von Fließkanalbreite und -durchgängigkeit (1).

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]	Besonderheit
NCF-9.2	CF-1	versetzte Franse	E 5	2,5	Kettfadenspg.: minimal
NCF-9.3	CF-1	geschl. Trikot	E 5	2,5	Kettfadenspg.: minimal
NCF-9.4	CF-1	geschl. Trikot	E 5	2,5	Kettfadenspg.: maximal

Nach der Herstellung werden die einzelnen Materialvarianten mittels NCF-Scanner vermessen und pro Versuchsaufbau jeweils vier Zuschnitte und drei Wiederholprüfungen präpariert. Abb. 4-11 gibt das erzielte Ergebnis wieder. Die vier Lagen sind dabei als Einzelprobe (Probe 1, 2 und 3) zusammengefasst, d. h. der angegebene Wert stellt den gemessenen Mittelwert (inklusive Standardabweichung) dar.

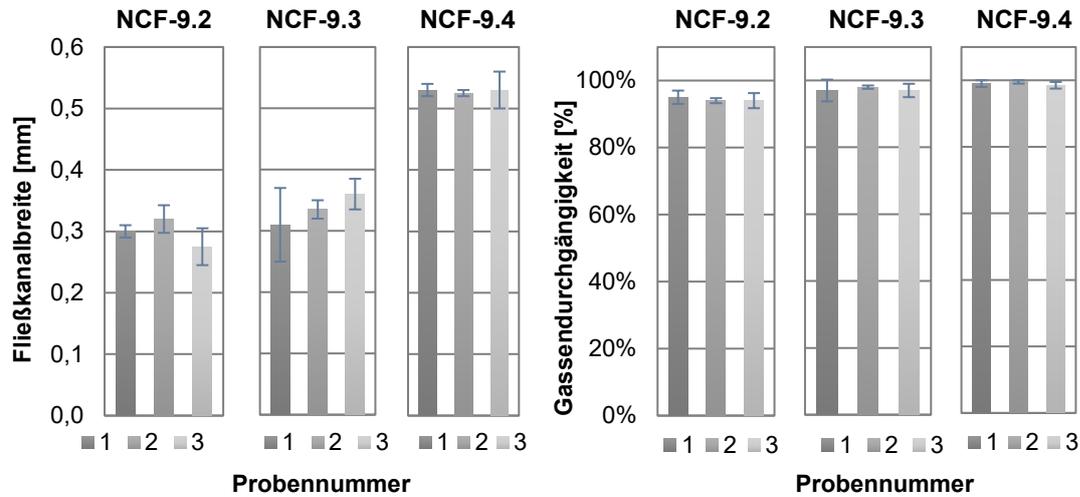


Abb. 4-11: Fließkanalbreite und Gassendurchgängigkeit, NCF-9.2, NCF-9.3 und NCF-9.4 in Anlehnung an [168]

Die Gassendurchgängigkeiten (FKD) sind mit 94 % bis 99 % auf konstant hohem Niveau, sodass deren Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse mit Einbeziehung der Standardabweichung ausgeschlossen werden kann. Die Fließkanalbreiten hingegen variieren im Mittel von 0,27 mm bis 0,53 mm.

Alle drei Varianten werden auf ihre Permeabilität geprüft²². Die Besonderheit der eingesetzten Versuchsumgebung liegt in der Möglichkeit, sowohl die gesättigte wie auch die ungesättigte Permeabilität zu ermitteln und damit den Einfluss der Erstbenetzungsphase zu quantifizieren. Darüber hinaus können zur experimentellen Bestimmung von K_1 und K_2 dieselben Gelegezuschritte, welche zuvor bei der optischen Vermessung Anwendung fanden, zu entsprechenden Probenkörpern präpariert werden. Abb. 4-12 gibt das Ergebnis wieder:

²² Der eingesetzte Versuchsaufbau des Lehrstuhls für Carbon Composites (LCC, München) ist in Kap. 2.3.2.2 Abb. 2-20 beschrieben.

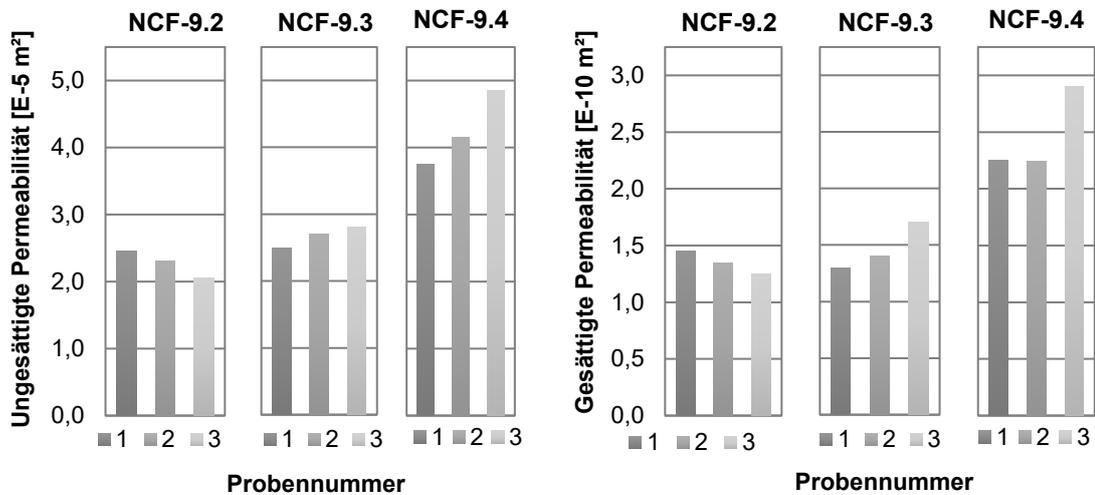


Abb. 4-12: Einfluss von Fließkanalbreite und Gassendurchgängigkeit auf die (un-)gesättigte Permeabilität K_1 , NCF-9.2, NCF-9.3 und NCF-9.4 in Anlehnung an [168].

Die gemessene Permeabilität der eingesetzten Gelege NCF-9.2, NCF-9.3 und NCF-9.4 folgt sowohl im ungesättigten Fall (Abb. 4-12, links) wie auch im gesättigten Fall (Abb. 4-12, rechts) dabei der zuvor ermittelten Fließkanalbreite entsprechend Abb. 4-11. Die Untersuchungen von Rieber, Verleye oder Lundström bestätigen die gewonnenen Resultate gemäß Kap. 2.3.1 Tab. 2-4 [97], [96], [89]. Damit wird die FKB als direkte Einflussgröße auf die Permeabilität auch bei UD-Gelegen im Labormaßstab bestätigt.

Die Relevanz der oben vorgestellten Analysen konnte für einen RTM-Hochdruckprozess bislang nicht nachgewiesen werden. Aus diesem Grund werden zwei weitere Versuchsreihen nachgeschaltet. Zunächst werden im ebenen Plattenwerkzeug (15 bar) gezielt FKB und FKD variiert und nachgelagert erfolgt dies im 3D-Versuchswerkzeug (100 bar).

Für die Bestätigung im 2D-RTM werden Probenkörper analog dem zuvor für die Permeabilitätsmessung angewandten Verfahren hergestellt. Als Grundlage dienen NCF-2.1 und NCF-5.1 bzw. NCF-6.1, also jeweils ein 300 g/m²-Aufbau- der 0°- und 45°-C-Faserorientierung. Beide Varianten werden jeweils entlang der C-Faserorientierung aus Gelegerollen unterschiedlicher Produktionslose entnommen und die entsprechenden Zuschnitte hinsichtlich ihrer FKB und FKD vermessen, sortiert und zu UD-Stacks aus Gelegen gleichen Typs und identischer C-Faserorientierung aufgebaut (Mono-Materialaufbau). Dabei werden wie bei der vorherigen Permeationsmessung bewusst Aufbauten mit besonders hohen und geringen FKB und FKD hergestellt.

Tab. 4-3 zeigt den erzielten Korridor der jeweiligen Einzelgelege:

Tab. 4-3: Verwendete CF-NCF zur Analyse von Fließkanalbreite und -durchgängigkeit (2).

Nr.	Fließkanalbreite [mm]	Fließkanal-durchgängigkeit [%]	Lagenanzahl pro Stack	Anzahl Stacks
NCF-2.1	0,31-0,54	95-100	6	14
NCF-5.1 und NCF-6.1	0,30-0,53	52-75	6	22

Die getrennte Präparation von NCF-2.1- und NCF-5.1/NCF-6.1-Aufbauten erlaubt die separate Betrachtung der FKD. Zeigt diese bei den 0°-Textilien kaum Varianz (95-100 %), weist die FKD hingegen bei den ±45°-Gelegen eine Spannweite von 52-75 % auf.

Im Anschluss an das Verpressen der Stacks zu Preforms erfolgt die Injektion. Nach Erreichen eines Injektionsdrucks von 30 bar wird die Imprägnierung beendet. Die erhaltenen Platten werden beschnitten, gewogen und vermessen. Als Zielgröße für die folgende Bewertung dient die sog. Füllrate. Diese gibt die Güte der Bauteilfüllung an und errechnet sich aus dem Verhältnis von Kavitätvolumen und der Summe aus Fasereinwaage und injiziertem Harzvolumen. Entsprechend ist eine Versuchsplatte mit einem Füllgrad von 100 % vollständig gefüllt. Mit bekannter Einwaage, Bauteilgeometrie und injiziertem Harzvolumen kann weiterhin der FVG bestimmt werden.

Die Anzahl der durchgeführten Versuche (14 Stützstellen bei den UD- und 22 Stützstellen bei den MD-Stacks) erlaubt aber die statistische Auswertung mittels Regressionsrechnung, um den Einfluss auf die Zielgröße zu quantifizieren. Eine direkte Gegenüberstellung der erzielten Injektionsergebnisse erscheint nicht zielführend, da FKB und FKD deutlich miteinander interagieren, siehe Abb. A-17 und Abb. A-18 im Anhang. Wird weiterhin berücksichtigt, dass die Lamine in den Dicken im Zehntelmillimeterbereich schwanken und dadurch eine Varianz im Faservolumengehalt folgt, ist die Interaktion von drei Parametern auf den Füllgrad gleichzeitig auszuwerten. Ein lineares Regressionsmodell liefert für beide Faserorientierungen Modellgüten (R^2) größer 90 %. Die Regression lässt die Isolation der Einzeleffekte zu und ermöglicht die Betrachtung deren Einflusses auf den Füllgrad unabhängig voneinander, wie Abb. 4-13 veranschaulicht.

Bei den 0°-Versuchen zeigt sich eine direkte Abhängigkeit der Füllrate von der FKB (1). Mit steigender Breite der Fließkanäle nimmt die Plattenfüllung zu. Ein weiterer Beitragsleister ist die FKD. Deren Effekt fällt aufgrund der geringen Varianz der Probekörper geringer aus, bleibt aber messbar (2). Die Abhängigkeit vom FVG entspricht dem bekannten Verhalten. Mit steigendem FVG nimmt die injizierte Harzmenge ab (3). Insgesamt gesehen stellt sich die höchste Füllrate bei der größten FKB, der höchsten FKD und dem geringsten FVG ein und bestätigt die Vorüberlegungen.

Die Ergebnisse der $\pm 45^\circ$ -Varianten zeigen den identischen Verlauf in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Eine Zunahme der FKB (4) und der FKD (5) bedingt eine ausgeprägte Laminatfüllung. Demgegenüber fällt die Füllrate mit steigendem FVG ab (6). Im Gegensatz zur 0° -Variante nimmt die Wirkung der FKD jedoch zu, siehe (2) und (5). Ebenfalls ist der Beitrag des FVG signifikanter ausgeprägt, siehe (3) und (6).

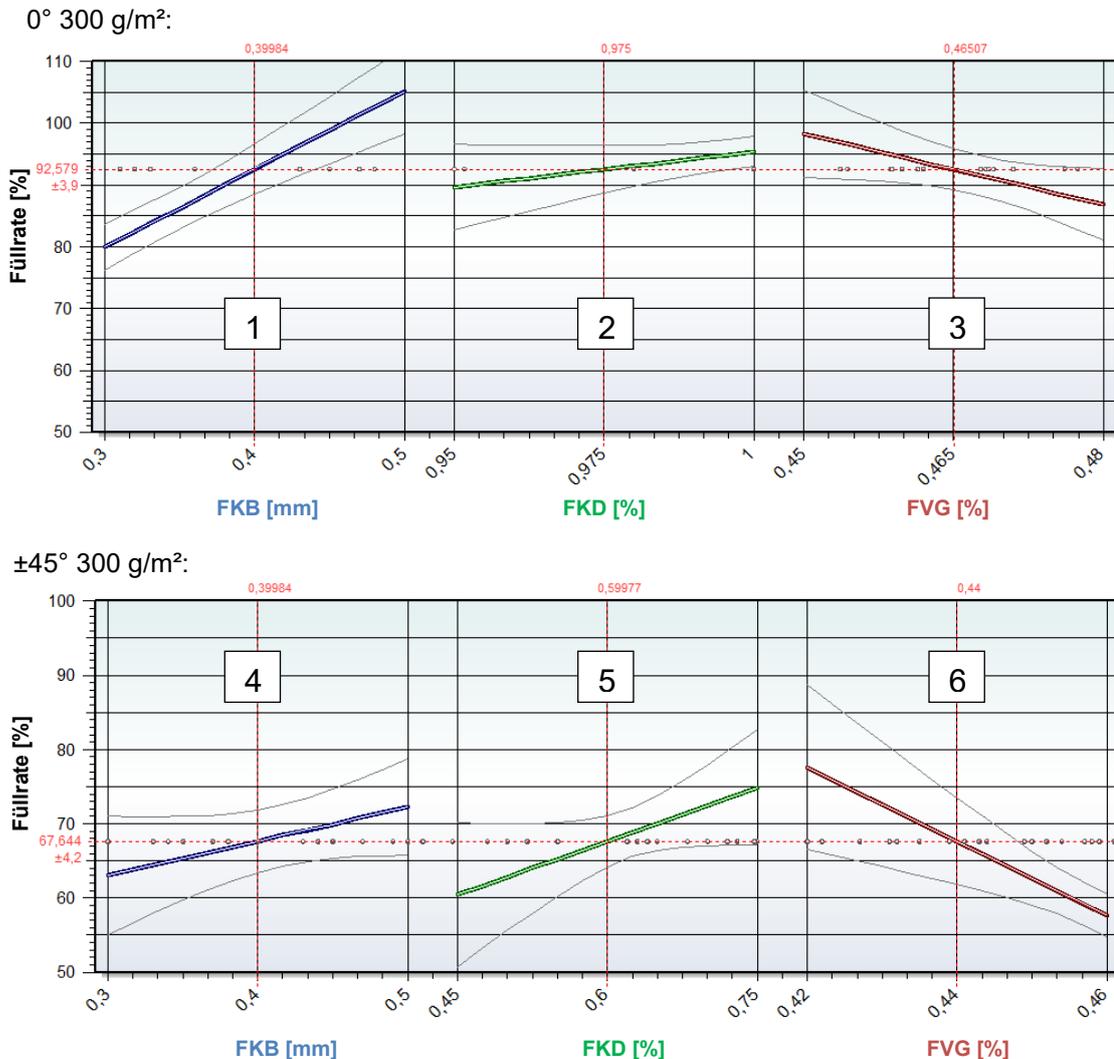


Abb. 4-13: Zielgröße Füllrate in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt.

Die Einzeleffekte für 0° 300 g/m²-Materialien sind (oben) und die für $\pm 45^\circ$ 300 g/m²-Materialien sind (unten) dargestellt.

Darüber hinaus zeigt sich ein signifikanter Unterschied im Füllungs-niveau. Ist bei den NCF-2.1-NCF etwa eine Füllrate zwischen 80 % und 100 % beobachtbar, stagnieren die NCF-5.1- und NCF-6.1-Textilien zwischen 55 % und 80 %. Grund dafür ist die geringe FKD verglichen mit den 0° -Gelegen. Bei diesen ist sogar rechnerisch eine Füllrate von 105 % möglich. Dies erscheint zunächst widersprüchlich. Es wurde allerdings auch in Realität bis zu 105 %-Matrixvolumen injiziert und das überschüssige Harz über die Werkzeugdichtung in die Überlaufkavität gedrückt.

Die Untersuchungen belegen den Einfluss der Fließkanalbreiten (FKB) und der Fließkanaldurchgängigkeiten (FKD) im ebenen Fall. Konsequenterweise muss der Übertrag in eine 3D-Geometrie bei Hochdruckinjektion erfolgen:

Es wird eine Versuchsreihe am Versuchswerkzeug Boden (3D-HD-RTM) initiiert. Um den Einfluss der FKB herauszuarbeiten, werden zwei Gelegetypen identischer Architektur mit unterschiedlicher Gassenbreite untersucht. Die Ausgangsbasis NCF-2.1 weist einen Mittelwert von 0,31 mm und die Modifikation NCF-2.2 eine mittlere FKB von 0,40 mm auf. Abb. 4-14 (links) stellt die gemessenen FKB der beiden Materialvarianten dar. Als Lagenaufbau wird ein sieben-lagiger 1500 g/m²-Aufbau gewählt (3,4,2,2,2,4,3), um den Effekt der 0°-Lagen (dreimal 300 g/m² im Kern des Aufbaus) gegenüber den ±45°-Materialien (viermal 150° g/m²) zu maximieren. Die Materialtypen NCF-3.1 und NCF-4.1 in den Außenlagen bleiben dabei unverändert. Den Versuchsumfang der Ausgangsbasis (NCF-2.1) bilden 20 injizierte Komponenten. Demgegenüber stehen sechs modifizierte Bauteile mit besonders hoher FKB (NCF-2.2) in den Mittellagen. Abb. 4-14 (rechts) zeigt die damit resultierenden Forminnendruckverläufe der entsprechenden Versuchsbauteile. Neben der gesamthaften Mittelwertsdrukckurve der Ausgangsbasis NCF-2.1 („grau“) mit geringer FKB ist der Streubereich der Grundgesamtheit der 20 untersuchten Bauteile „gepunktet“ aufgetragen. Der gemittelte Druckanstieg der Komponenten mit modifizierter, hoher FKB auf Grundlage von NCF 2-2 ist „schwarz“ dargestellt.

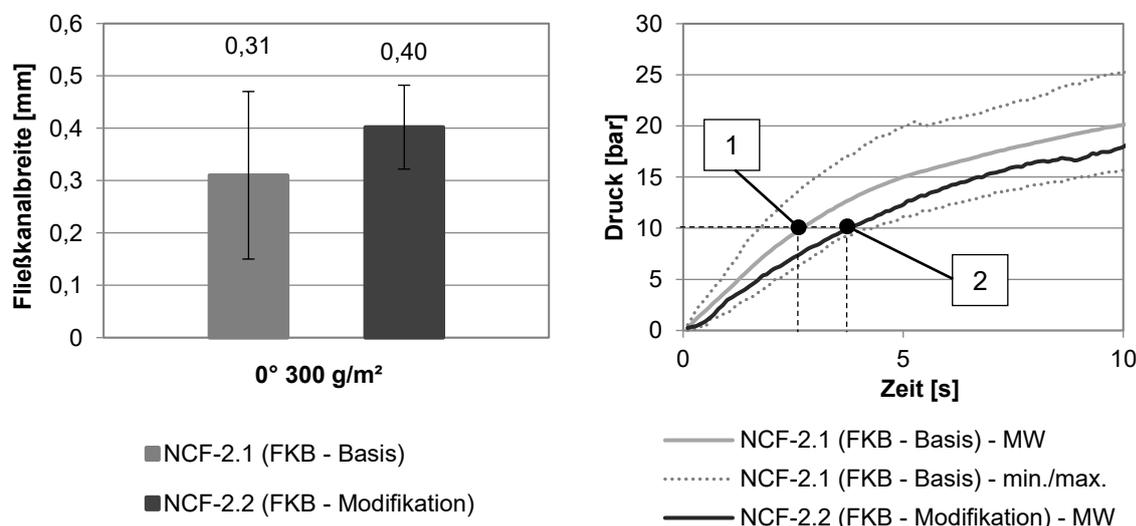


Abb. 4-14: Einfluss der Fließkanalbreite auf den Druckverlauf bei der HD-RTM-Injektion (Lagenaufbau: 3,4,2,2,2,4,3).

Es ist festzuhalten, dass die Druckkurven der Materialien mit hoher Fließkanalbreite (NCF-2-2) im unteren, gesamthaften Streubereich der Ausgangsbasis verlaufen. Somit ist der Effekt der Fließkanalbreite auch im Hochdruckbereich mess- und nachweisbar. Im Umkehrschluss ist demnach auch die Permeabilität, gemessen am textilen Halbzeug, als Indikator für die Hochdruckinjektion geeignet.

Die Gegenüberstellung der gemittelten Forminnendrucke der Ausgangsbasis (1) und der modifizierten Materialien (2) bei 10 bar liefert eine Druckminderung von 38 %, siehe Abb. 4-14 (rechts).

Es lässt sich also ableiten, dass die Gelegeherstellung, um einen geringen Injektionsdruck zu erreichen, mit möglichst hoher Fließkanalbreite erfolgen muss. Die Produktion der Versuchsmaterialien (NCF-2.2) hat gezeigt, dass die bewusste Manipulation der Fließkanalbreiten bei Materialien dieser Grammatik und Architektur jedoch nur in einem schmalen, robusten Produktionsfenster von ca. $\pm 0,15$ mm erfolgen kann. Eine zusätzliche Erhöhung der Fließkanalbreite (Stellgröße ist die Kettfadenspannung) über den hier untersuchten Bereich hinaus ist mit Hinblick auf einen robusten Herstellungsprozess nicht möglich. Kettfadenrisse und damit verbunden Anlagenstillstandszeiten nehmen bei einer weiteren Steigerung zu. Um die Injektionsergebnisse weiter zu verbessern, ist daher eine grundsätzliche Änderung der Architektur, im Speziellen der Bindungsart (Fließkanalform) oder der Nadelteilung (Fließkanalanzahl), notwendig. Beide Parameter werden nachfolgend untersucht.

4.1.1.3 Modifikation 0°-NCF: Bindungsart (Fließkanalform)

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Fließkanalbreite (FKB) und die Fließkanaldurchgängigkeit (FKD) als Einflussfaktoren auf die Imprägniereigenschaften von CF-NCF herausgearbeitet. Die $\pm 45^\circ$ -Textilien mit der gegenliegenden Trikotbindung blieben dabei bezogen auf das Füllverhalten im ebenen Injektionsfall aufgrund der geringen FKD hinter den 0°-NCF zurück. Diese Textilien ($\pm 45^\circ$) konnten aber dennoch eine Füllrate von bis zu 80 % erreichen. In der Folge stellt sich die Frage, wie sich diese Bindungsart bei einer hohen FKD verhält. Die Gassendurchgängigkeit der $\pm 45^\circ$ -Textilien ist aber auch auf Basis entsprechender Produktionsversuche nicht weiter zu steigern. Demgegenüber kann aber die Trikotbindung auf die 0°-Textilien angewandt werden.

Der Vergleich der Gelege NCF-2.1 (Franse-Teilschuss-Bindung) und NCF-2.3 (Trikotbindung) zeigt bereits bei mikroskopischer Betrachtung erste Unterschiede (vgl. Abb. 4-15):

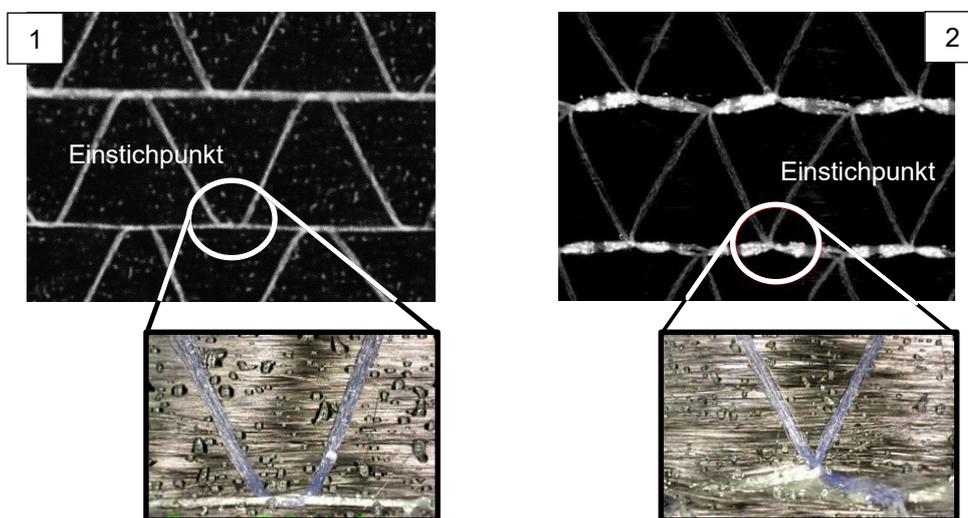


Abb. 4-15: Mikroskopaufnahme zweier CF-NCF, Franse-Teilschuss-Bindung (1) und Trikotbindung (2).

Die „straffe“ Trikotbindung (2) schnürt die Einzel-Rovings im Gelege ein und verursacht gegenüber der „lockeren“ Franse-Teilschuss-Bindung (1) ein onduliertes, wellenförmiges Fließkanalprofil²³. Daneben zeigen erste Untersuchungen vergleichbare FKB und, wie angenommen, bei beiden Bindungen eine FKD von bis zu 100 %.

Ein Grundsatzversuch in der ebenen HD-Versuchsumgebung soll als Indikator für mögliche bindungsartinduzierte Effekte dienen. Die verwendeten Gelegetypen sind in Tab. 4-4 aufgeführt:

²³ Die Begriffe „straff“ und „locker“ beziehen auf die beim Verwirken angelegte Fadenspannung. Eine hohe Fadenspannung bedingt eine ausgeprägte Bündelung der Rovings ggü. einer geringen Fadenspannung.

Tab. 4-4: Verwendete CF-NCF zur Analyse der Bindungsart.

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]
NCF-2.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33
NCF-2.3	CF-2	geschl. Trikot	E 5	3,6

Abb. 4-16 zeigt das erzielte Injektionsergebnis zweier sechslagiger 0° 300 g/m^2 -Aufbauten unterschiedlicher Bindungsarten und vergleichbarer FKB und FKD. Der Injektionsdruck wurde mit 15 bar („Teilschuss“) begrenzt, um eine Teilimprägnierung zu erreichen und anschließend eine Füllstudie durchführen zu können. Die Trikotbindung (NCF-2.3) ist links und die bekannte Franse-Teilschuss-Bindung (NCF-2.1) ist rechts dargestellt:

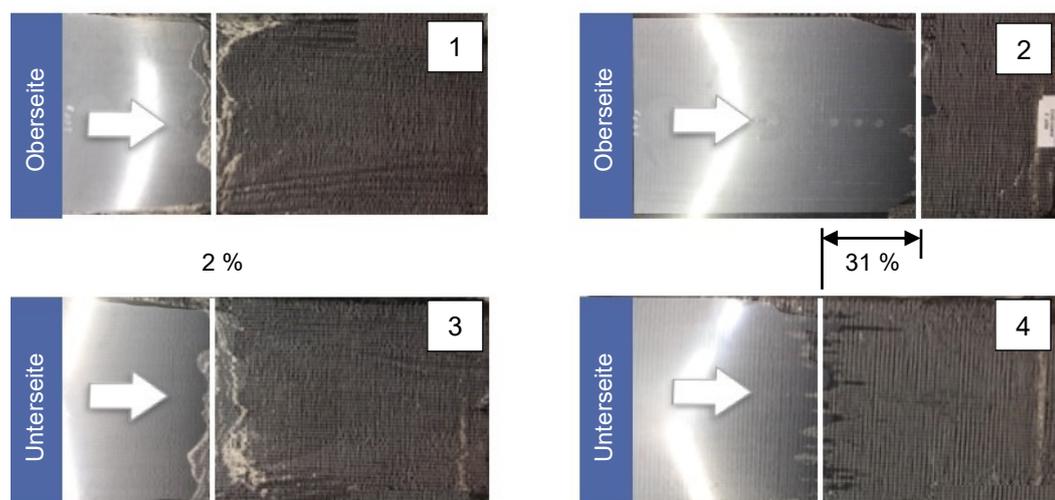


Abb. 4-16: Vergleich des Fließfrontfortschritts von Oberseite zu Unterseite zweier sechslagiger 0° 300 g/m^2 -Aufbauten nach der Injektion im 2D-RTM (15 bar).

Links: Trikotbindung (NCF-2.3), rechts: Franse-Teilschuss-Bindung (NCF-2.1).

Der Vergleich der Füllraten beider Lamine fällt zugunsten der Franse-Teilschuss-Bindung aus. Das Injektionsvolumen übersteigt das der Trikotbindung um ca. 25 % (ohne Abbildung). Die Relation der beidseitigen Ausprägung der Fließfront, d. h. (1) und (3) bzw. (2) und (4), liefert einen signifikanten Unterschied. Der Fließfrontfortschritt bezogen auf Ober- und Unterseite des FVB variiert deutlich unter den gewählten Gelegen.

Bei der Franse-Teilschuss-Bindung (NCF-2.1, rechts) stellt sich eine Differenz der Fließfronten von 31 % ein, siehe. Abb. 4-16 (2) und (4). Dem gegenüber steht die Trikotarchitektur (NCF-2.3, links) mit 2 % Differenz, siehe Abb. 4-16 (1) und (3). Offen-

sichtlich bietet NCF-2.3 eine höhere Durchlässigkeit in z-Richtung. Diese Feststellung weicht von der in der Literatur vorherrschenden Meinung ab [63], [67], [107], wonach die transversale Permeabilität bei FVB mit Wandstärken kleiner 5 mm vernachlässigt werden kann. Beim obigen Beispiel handelt es sich um Aufbauten mit einer nominellen Wandstärke von 2,2 mm. Vor diesem Hintergrund müssen die Wirkmechanismen, die zu diesem Effekt führen, eingehend untersucht werden. Möglicherweise ist die homogene Fließfrontausprägung, resultierend aus einer erhöhten K_3 -Permeation, ursächlich für diese Beobachtung. Die daraus abgeleitete und zu beweisende These attestiert der Trikotbindung eine höhere K_3 -Permeation im Vergleich zur Franse-Teilschuss-Bindung und weiterhin einen messbaren Einfluss auch bei dünnwandigen Laminaten.

Im ersten Schritt werden zur Bestätigung der Hypothese beide Gelege NCF-2.1 und NCF-2.3 auf ihre K_3 -Permeabilität hin untersucht. Der H_2O -Permeationsprüfstand erlaubt diese Versuchsanordnung durch den beidseitigen Einsatz von perphorierten Messplatten (vgl. 3.2.1.2, Abb. 3-5). Basis für die Messung ist ein fünfflagiger UD-Aufbau beider Gelegetypen.²⁴ Die Versuchsdurchführung erfolgt bei einem Brutto-FVG von 53 % (dies entspricht dem sog. Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$) mit jeweils zehn Wiederholmessungen. Abb. 4-17 stellt die gewonnenen Ergebnisse der gesättigten Permeabilität K_3 in z-Richtung dar:

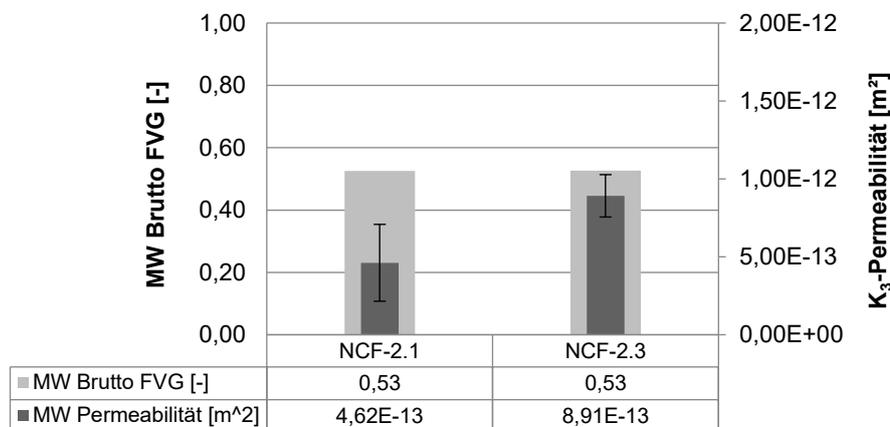


Abb. 4-17: Vergleich von NCF-2.1 (Franse-Teilschuss-Bindung) und NCF-2.3 (Trikotbindung) hinsichtlich K_3 -Permeabilität: fünfflagiger UD-Aufbau.

Trotz logarithmischer Auftragung ist die Differenz unter Einbeziehung der Standardabweichung signifikant. Die Trikotbindung (NCF-2.1) weist gegenüber der Fransebindung (NCF-2.3) eine Steigerung der Durchlässigkeit in Dickenrichtung von 4,6 E-13 m² auf 8,9 E-13 m² auf und entspricht damit nahezu einer Verdoppelung entspricht.

²⁴ Die Proben sind „aktiviert“, d. h. der verwendete Stack wird vor der Probenpräparation mit Temperatur beaufschlagt und verpresst, um den Binder aufzuschmelzen und eine entsprechende Lagenhaftung sicherzustellen.

Die erhöhte Permeation lässt sich mit der eingangs vorgestellten Ondulation der Fließkanalgeometrie erklären. Das wellenförmige Fließkanalprofil der Trikotbindung bildet demnach Durchstoßpunkte an den Einstichstellen aus, die den Harzfluss begünstigen, siehe Abb. 4-15.

Um dieser Erkenntnis in den weiteren Untersuchungen Rechnung zu tragen, muss die Injektionsbewertung im ebenen, zweidimensionalen Fall angepasst werden:

Aus dem Quotienten des Fließfrontfortschritts von Plattenoberseite und -unterseite wird wie folgt das Fließfrontverhältnis FV_{OU} definiert (4-1):

$$FV_{OU} = \frac{FF_{Oben}}{FF_{Unten}} \quad (4-1)$$

mit: FF_{Oben} Fließfrontfortschritt der Oberseite:
Mittelwert aus fünf Messwerten, Distanz Anguss zu Fließfront auf der Oberseite

FF_{Unten} Fließfrontfortschritt der Unterseite:
Mittelwert aus fünf Messwerten, Distanz Anguss zu Fließfront auf der Unterseite

FV_{OU} wird prozentual angegeben, wobei das Verhältnis „1“ einer Differenz von 0 % bezogen auf den Fließfrontfortschritt der Ober- zur Unterseite entspricht. Beide Fließfronten sind identisch ausgeprägt. Damit ist FV_{OU} ein Indikator für die K_3 -Permeation.

Das keilförmige Imprägnierverhalten, siehe Abb. 4-18 (links), macht einen weiteren Bewertungsfaktor notwendig. Wie in Abb. 4-18 (rechts) beispielhaft dargestellt, kommt es mitunter zum Voreilen der Harzfront im Laminat. Die bloße Betrachtung des Schussgewichts oder des FV_{OU} erfasst diesen Effekt nicht und würde eine homogene Formfüllung suggerieren.

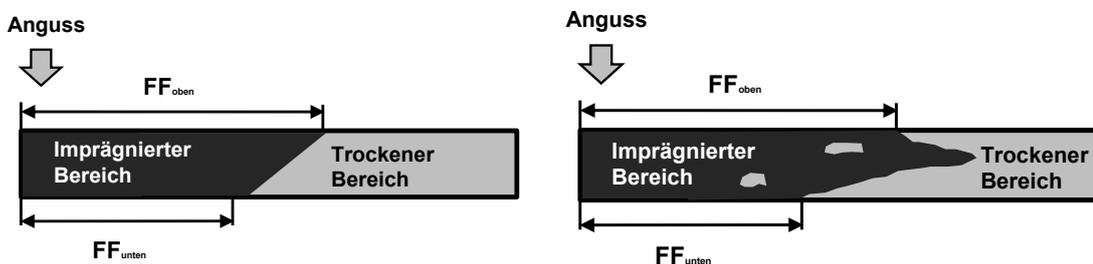


Abb. 4-18: Prinzip des Fließfrontfortschritts: homogene Füllung (links) und inhomogener Füllungsverlauf (rechts).

Die Qualität der Füllung, also das Vorhandensein von Lufteinschlüssen im benetzten Bereich, oder die Homogenität der Fließfront im Platteninneren kann in guter Näherung durch den Füllungsfaktor FF beschrieben werden:

$$FF = \frac{\text{absolute Schussmenge}}{\text{imprägniertes Volumen}} = \frac{m_{abs}}{\frac{FF_{Oben} + FF_{Unten}}{2} \cdot t \cdot b} \quad (4-2)$$

mit: m_{abs} Masse der injizierten Matrix
 t, b Dicke und Breite des untersuchten Laminats

Physikalisch betrachtet handelt es sich beim FF um die „Güte der Füllung“ und hat die Einheit $[kg/m^3]$. D. h. mit steigendem FF reduzieren sich das Harzvoreilen im Platteninneren und die Anzahl der eingeschlossenen Poren. Folglich wird eine höhere Laminatqualität erzielt.

Die Verifikation der oben eingeführten Parameter und der Transfer auf die 3D-Hochdruckanwendung erfolgt im kommenden Abschnitt. Ziel dabei ist es, ein FV_{OU} nahe „1“ als Indikator für eine hohe K_3 -Permeation und einen hohen FF als Anzeichen für eine hohe Füllqualität zu erreichen.

Optimierung 0°-Material

Zur Bestätigung des positiven Effekts einer homogenen Matrixfüllung auf die Imprägnierung wird eine Versuchsreihe aufbauend auf der in Kap. 3.2.3 eingeführten Qualifizierungslogik durchgeführt. Die untersuchten 0°-Gelege (Typ 2) werden sukzessive auf deren Fließkanalbreiten (FKB) sowie Permeabilität in der ebenen und der transversalen Richtung bewertet. Anschließend erfolgt die Analyse in der 2D-HD-RTM-Versuchsumgebung, gefolgt von der Bestätigung im 3D-HD-RTM. Das Ziel dabei ist, mit dem Stellhebel der K_3 -Permeabilität eine Reduktion des Druckniveaus im HD-RTM zu erzielen.

Basis für die Bewertung entlang der Prozesskette bilden die 0° 300 g/m²-Materialien gemäß Tab. 4-5 (umseitig).

NCF-2.1 (Franse-Teilschuss-Bindung, FKB: 0,46 mm) und NCF-2.3 (Trikot-Bindung, geringe FKB: 0,39 mm) bilden den Ausgangspunkt der Untersuchungen. NCF-2.4 ist eine modifizierte Variante, die gemäß der Eingangshypothese mit der Kombination aus Trikotbindung und erhöhter Fließkanalbreite (0,44 mm) das beste Imprägnierverhalten zeigen muss.

Tab. 4-5: Verwendete CF-NCF zur Analyse der 0°-Materialien.

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]	FKB [mm]
NCF-2.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33	0,46
NCF-2.3	CF-2	geschl. Trikot	E 5	3,60	0,39
NCF-2.4	CF-1	geschl. Trikot	E 5	2,50	0,44

Die aufgeführten Fließkanalbreiten stellen den Mittelwert aus dem im Laufe der Untersuchungen verwendeten Produktionschargen dar.

Permeabilitäts- und Kompaktierungsmessungen

Ausgangsbasis bildet die Permeabilitätsbestimmung der Materialien mittels H₂O-Permeabilitätsversuchsaufbau. Die Probenpräparation erfolgt zehnlagig mit 0°/90°-Legung. Es werden die K_{12} - und die K_3 -Permeabilität ermittelt. Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ ist 53 %. Abb. 4-19 stellt die gewonnenen Ergebnisse dar:

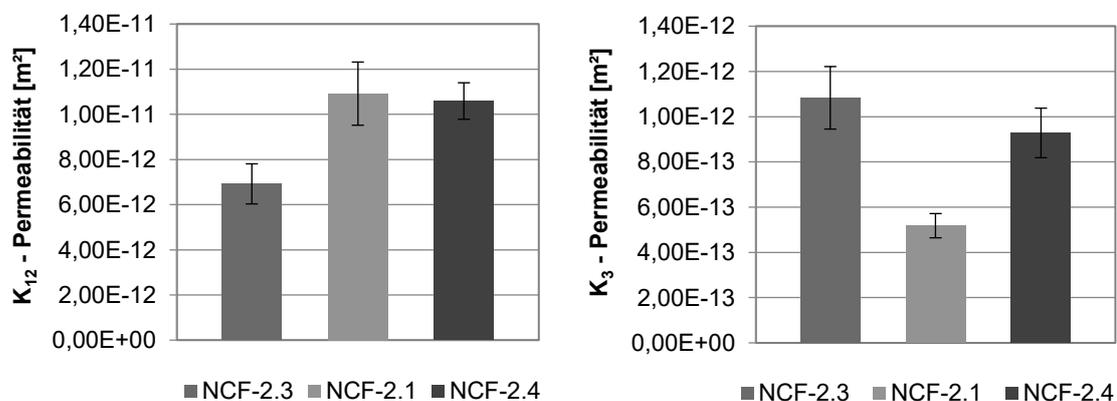


Abb. 4-19: Vergleich K_{12} - und K_3 -Permeation unterschiedlicher 0° 300 g/m²-Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ von 53 % (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4) in Anlehnung an Koch [175].

Die K_{12} -Werte der Gelegevarianten NCF-2.1 und NCF-2.4 liegen bei 1,09 E-11 m² und 1,06 E-11 m². Unter Berücksichtigung der Standardabweichung sind beide Werte identisch. D. h. mit einer Trikotbindung (NCF-2.4) und ähnlichen Fließkanalbreiten sind identische flächige Permeabilitäten verglichen zur Franse-Teilschuss-Bindung (NCF-2.1) erreichbar. NCF-2.3 fällt gegenüber den zuvor genannten Werten mit 6,92 E-12 m² um ca. 30 % ab. Mögliche Ursache ist die geringere Fließkanalbreite (-0,05 mm ggü.

NCF-2.4). Nichtsdestotrotz erzielt diese Variante in den bisherigen Plattenversuchen (2D-RTM) das geringere FV_{OU} , siehe Abb. 4-16 im vorangegangenen Abschnitt.

Durch die Betrachtung der K_3 -Permeation wird die zuvor aufgestellte These wiederholt bestätigt. Die Franse-Teilschuss-Variante (NCF-2.1) fällt mit $5,18 \text{ E-}13 \text{ m}^2$ ca. 50 % unter die Trikotvarianten NCF-2.3 mit $1,08 \text{ E-}12 \text{ m}^2$ und NCF-2.4 mit $9,28 \text{ E-}13 \text{ m}^2$. Unabhängig vom gewählten Fasertyp lässt sich eine hohe Durchlässigkeit in z-Richtung erreichen; Hauptbeitragsleister ist demnach die textile Architektur.

Um den in Kap. 4.1.1.2 beschriebenen Effekt der sich unter Last (infolge von Vorkompaktierung in der Werkzeugkavität oder hydrodynamischer Belastung durch das injizierte Fluid) ändernden Fließkanalbreiten auszuschließen, werden analog zur Permeabilitätsprüfung die Kompaktierungsspannungen σ_{tar} beim Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ von 53 % ermittelt. Es wird ebenfalls ein zehnlagiger Aufbau mit $0^\circ/90^\circ$ -Orientierung gewählt. Hierbei ergeben sich die in Abb. 4-20 gezeigten Werte:

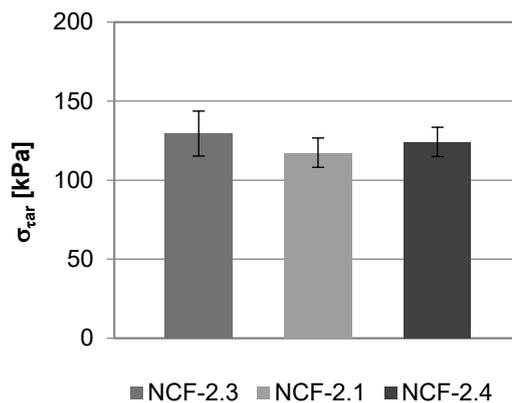


Abb. 4-20: Vergleich des Kompaktierungsverhaltens unterschiedlicher 0° 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ von 53 % (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4).

Die Kompaktierungsspannung σ_{tar} variiert im Bereich von $\pm 6 \text{ kPa}$ kaum messbar zwischen den unterschiedlichen Gelegen. Dies bestätigt auch den haptischen Eindruck. So ist die Trikotarchitektur trotz ihrer „straffen“ Bindung gegenüber der „lockeren“ Franse-Teilschuss-Bindung ebenso leicht zu verdichten. Demnach hat der gewählte Bindungstyp keinen signifikanten Einfluss auf das Kompressionsverhalten.

Die Trikotbindung garantiert also neben der erhöhten transversalen Permeation bei gleichbleibender ebener Permeabilität ebenfalls eine „Steifigkeit“ der textilen Fläche auf Niveau der Franse-Teilschuss-Konstruktion.

2D-RTM-Injektionsversuche im Technikumsmaßstab

Zur Bestätigung des Einflusses der K_3 -Permeabilität auf die Füllungsqualität im Injektionsprozess werden die Varianten NCF-2.1, NCF-2.3 und NCF-2.4 im 2D-HD-RTM untersucht. Die einzelnen Materialien werden sechslagig und bei 15 bar Druckbegrenzung injiziert. Es werden jeweils drei Wiederholversuche durchgeführt. Gegenstand der Analyse sind, wie in Abb. 4-21 dargestellt, die absolute Schussmenge, das Fließfrontverhältnis FV_{OU} und der Füllungsfaktor FF der jeweiligen Gelegevarianten:

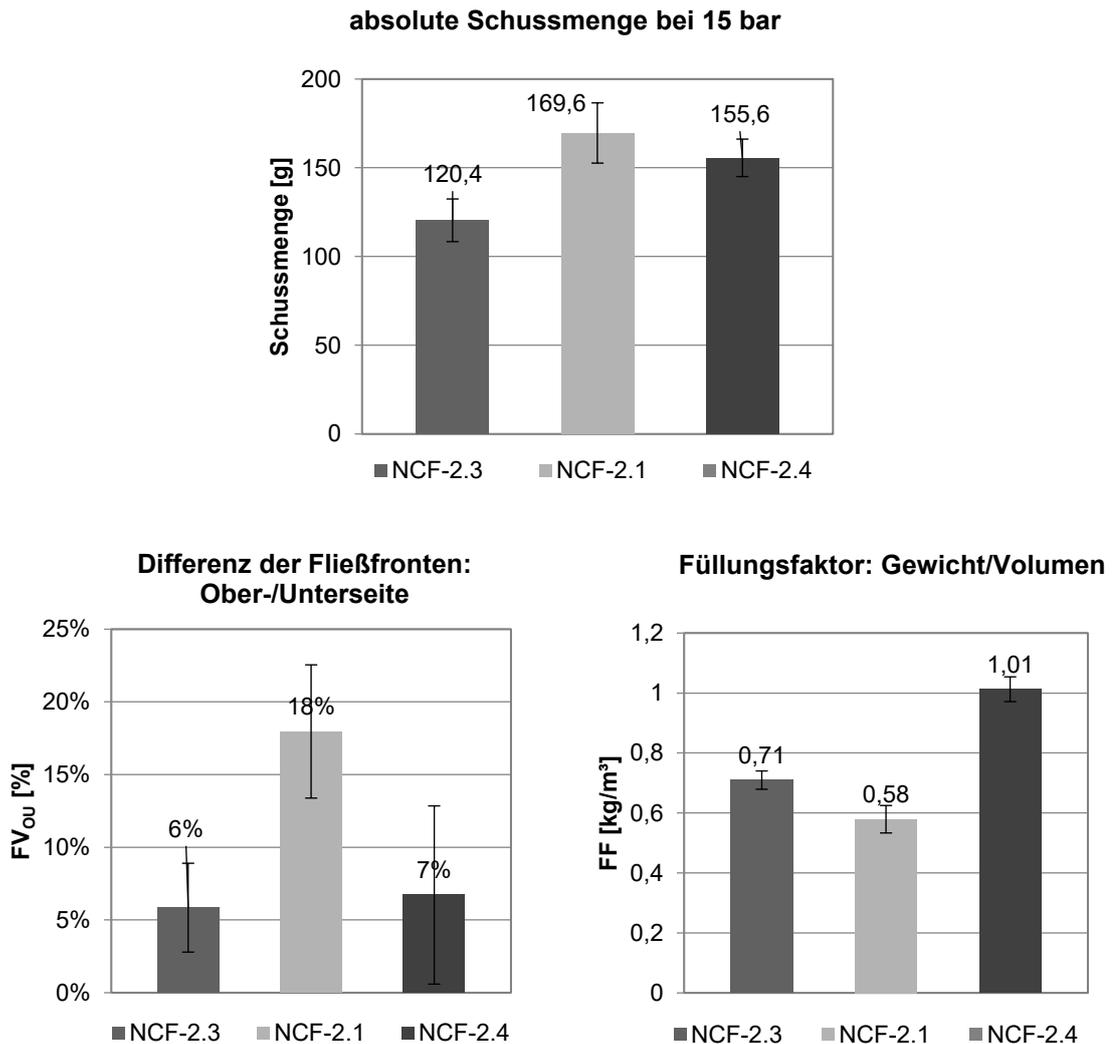
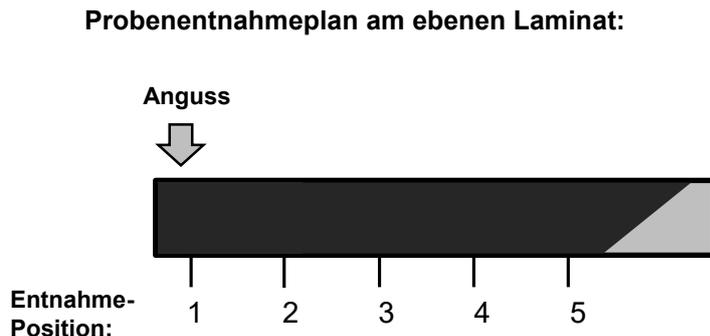


Abb. 4-21: Vergleich 2D-HD-RTM unterschiedlicher 0° 300 g/m²-Materialien (NCF-2.3, NCF-2.1 und NCF-2.4), absolute Schussmenge (oben), Fließfrontverhältnis (unten links) und Füllungsfaktor (unten rechts) in Anlehnung an Koch [175].

NCF-2.1 (Franse-Teilschuss) weist mit 169,6 g injizierter Matrixmenge die höchste Füllung auf und bestätigt den Erwartungswert. Ursächlich hierfür ist die zuvor ermittelte höchste Fließkanalbreite und die resultierende K_{12} -Permeabilität zwischen den untersuchten Materialien. Hinsichtlich Fließfrontverhältnis FV_{OU} (18 %) fällt NCF-2.1 jedoch wie erwartet hinter die Trikotvarianten (NCF-2.3 und NCF-2.4) zurück. Dies ist auf die geringe K_3 -Permeation der Franse-Teilschuss-Architektur ggü. der Trikotkon-

struktionen zurückzuführen, wie es bereits im Laborversuch ermittelt wurde, siehe Abb. 4-19. Der Füllungsfaktor FF der modifizierten Variante NCF-2.4 ($1,01 \text{ kg/m}^3$) verspricht im Vergleich zu NCF-2.3 ($0,71 \text{ kg/m}^3$) und NCF-2.1 ($0,58 \text{ kg/m}^3$) eine bessere Laminatqualität. Zur Bestätigung dieser These werden die Plattenlaminat NCF-2.1 und NCF-2.3 entsprechend dem in Abb. 4-22 dargestellten Prinzip mikroskopisch untersucht:



Kategorisierung von Poren bzw. Lufteinschlüssen im Laminat:

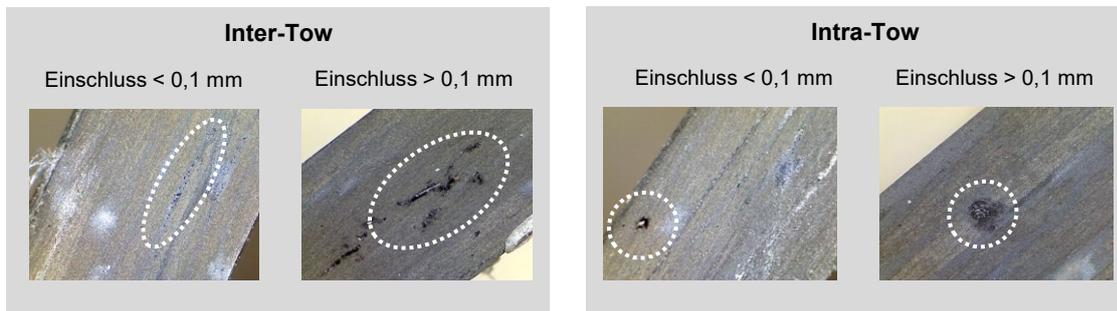


Abb. 4-22: Prinzip der Schliiffuntersuchung von ebenen Laminaten hinsichtlich Füllqualität.
Probenentnahmeposition im ebenen Laminat (oben) und Kategorisierung der ausgewerteten Poren.

Abb. 4-22 (oben) zeigt die Probenentnahmeposition im ebenen Laminat. Die Entnahme erfolgt orthogonal zur Injektionsrichtung an fünf äquidistanten Positionen entlang der Platte. In Abb. 4-22 (unten) ist die zur Bewertung der Laminatqualität angewandte Kategorisierung von Poren und Lufteinschlüssen visualisiert. Es wird dabei in Poren „innerhalb“ eines Rovings („intra“-Tow) und „zwischen“ zwei Rovings („inter“-Tow) unterschieden. Beide Klassen wiederum untergliedern sich in Fehlstellen mit einem Durchmesser $> 0,1 \text{ mm}$ und $< 0,1 \text{ mm}$. Bei der Analyse der vorliegenden Laminat auf Basis von NCF-2.1 und NCF-2.4 kann kein systematischer Unterschied hinsichtlich Auftretens der einzelnen Größenklassen oder der Kategorie des Auftretens „inter“ oder „intra“ festgestellt werden. Daher wird nachfolgend die Summe aller identifizierten Fehlstellen beider Laminattypen je Entnahmeposition ausgewertet, siehe Abb. 4-23.

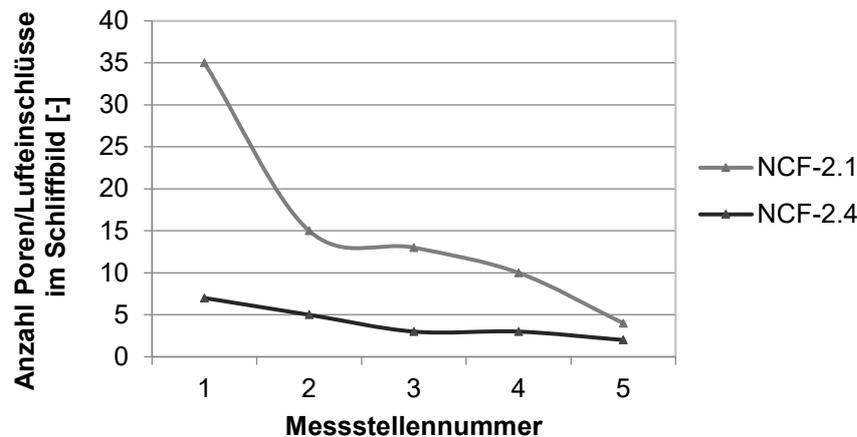


Abb. 4-23: Identifizierte Fehlstellen im ebenen Laminat, NCF-2.1 und NCF-2.4.

Die angegebenen Werte stellen dabei Mittelwerte aus je drei mikroskopierten Laminaen dar. Die modifizierte Trikot-Variante (NCF-2.4) zeigt, verglichen mit der Franse-Teilschuss-Variante (NCF-2.1), in jedem Messpunkt eine höhere Füllqualität und verifiziert damit den zuvor ermittelten Füllungsfaktor FF von $1,01 \text{ kg/m}^3$, siehe Abb. 4-21.

Gesamthaft lässt sich für den ebenen Fall ableiten, dass das modifizierte Gelege NCF-2.4 mit seiner Trikot-Architektur und der verhältnismäßig großen Fließkanalbreiten im Vergleich zu NCF-2.1 und NCF-2.3 hinsichtlich homogener Formfüllung das beste Injektionsergebnis liefert. Bezogen auf das injizierte Matrixvolumen bleibt NCF-2.4 aber hinter der Franse-Teilschuss-Bindung zurück. Welcher der beiden Mechanismen, homogene Formfüllung oder maximale Schussmenge, im serienäquivalenten 3D-HD-RTM-Prozess einen moderaten Forminnendruckanstieg und die damit verbundene Prozessstabilität garantiert, muss im Folgenden untersucht werden.

3D-RTM-Injektionsversuche im Serienmaßstab

Die Verifikation der Labor- und Technikumsuntersuchungen erfolgt im Hochdruckprozess am Bodenwerkzeug. Das Eingangsmaterial für die Versuche bildet ein siebenlagiger 1500 g/m^2 -Aufbau (3,4,2,2,2,4,3). Variiert werden die 0° -Gelege im Kern des Stacks: einerseits NCF-2.1 beim Referenz- (Franse-Teilschuss-Bindung) und andererseits NCF-2.4 (Trikotbindung) beim Bestätigungsversuch. Die 45° -Textilien in den Außenlagen werden nicht verändert. In beiden Fällen wird NCF-3.1 bzw. NCF-4.1 gewählt. Grundlage für die Franse-Teilschuss-Versuche (NCF-2.1) sind zwanzig, für die der Trikotbindung (NCF-2.4) zehn Wiederholversuche.

Abb. 4-24 zeigt den erzielten Druckverlauf. Links ist der arithmetisch gemittelte Druckverlauf des jeweiligen Versuchspunktes einschließlich des minimal und maximal aufgezeichneten Druckanstiegs (also der Spannweite der Druckprofile) dargestellt, rechts zur besseren Visualisierung nur das gemittelte Profil.

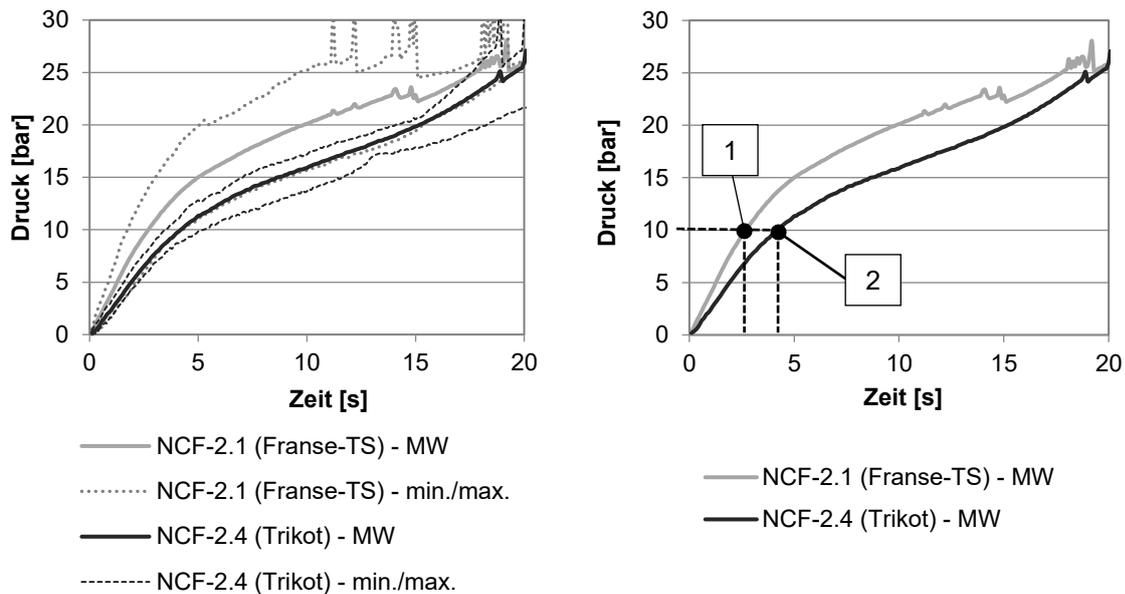


Abb. 4-24: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Franse-Teilschuss-Bindung und Trikotbindung am siebenlagigen Aufbau (3,4,2,2,2,4,3) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Beim Vergleich der Druckniveaus beider Varianten, z. B. bei 10 bar Forminnendruck in Abb. 4-24 (rechts), wird deutlich, dass dieses bei der Franse-Teilschuss-Bindung (1) bereits nach 2,8 s, bei der Trikotbindung (2) erst nach 4,1 s erreicht wird. Auf Grundlage der konstanten Harzaustragsleistung von 25 g/s stellt sich eine injizierte Fluidmenge von 70 g zu 104,8 g bei 10 bar Innendruck ein. Dies ergibt eine Verbesserung der Formfüllung um 49,6 %.

Es lässt sich dementsprechend folgern, dass gerade im 3D-Fall die K_3 -Permeabilität der verwendeten Textilien einen großen Einfluss auf die Imprägniereigenschaft nimmt und nicht vernachlässigt werden darf. D. h. im HD-RTM-Prozess auf Basis von UD-CF-NCF ist die Trikotbindung der Franse-Teilschuss-Bindung vorzuziehen. Diese Bindung generiert sowohl einen moderaten Forminnendruckanstieg und damit verbunden eine homogene, ausgeprägte Bauteilfüllung sowie eine porenfreie Laminatqualität.

4.1.1.4 Modifikation $\pm 45^\circ$ -NCF: Nadelteilung (Fließkanalanzahl)

Eine Änderung der textilen Konstruktion zur Optimierung der 45° -Materialien hinsichtlich ihrer K_3 -Permeation analog der zuvor behandelten 0° -Textilien ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend. Denn die textile Flächenbildung mit $\pm 45^\circ$ oder 90° zur Produktionsrichtung angeordneten CF-Fadenlagen erfordert eine identische Stichlänge und Stichbreite (oder ein entsprechendes Vielfaches). Andernfalls würde in der Wirkeinheit mit jedem n-ten Stich ein Fließkanal geöffnet und mit dem Folgenden (n+1) der zweiten Nadelbarre dieser wieder geschlossen werden. Folglich würde die Permeabilität des Textils reduziert werden. Die „gegenlegigen“ Bindungen gleicher Teilungen längs und quer, welche bereits bei den vorliegenden $\pm 45^\circ$ oder 90° -Gelegen eingesetzt werden, sind davon nicht betroffen und daher nicht zu verändern²⁵. Mit Blick auf die zu Beginn in Tab. 2-4 (in Kap. 2.3.1) vorgestellten Stellhebel zur Optimierung der Permeabilität verbleibt nach erfolgter Modifikationen der Fließkanalform bei den 0° -Textilien die Fließkanalanzahl als Parameter bei den $\pm 45^\circ$ -Materialien. Die Erwartungshaltung ist, dass sich mit steigender Fließkanalanzahl eine steigende Permeabilität in lateraler und transversaler Richtung sowie eine verbesserte Komponentenfüllung einstellen.

Optimierung der $\pm 45^\circ$ -Materialien

Die o. g. These soll im Weiteren mit den in Tab. 4-6 aufgeführten Materialvarianten untersucht werden. NCF-5.1 und NCF-5.2 unterscheiden sich bezüglich ihrer Feinheit (Nadelteilung quer zur Produktionsrichtung). Aufgrund der Notwendigkeit einer symmetrischen Bindung korrespondiert die Stichlänge entsprechend. Die ermittelten Fließkanalbreiten (FKB) sind ebenso wie die Fließkanaldurchgängigkeit (FKD) auf identischem Niveau. Das aus dem vorangegangenen Abschnitt bekannte NCF-2.1 (Franse-TS, 0° -Material) dient als Referenz für die Untersuchungen.

Tab. 4-6: Verwendete CF-NCF zur Analyse der 45° -Materialien.

Nr.	CF-Typ	Bindungsart	Feinheit [Stiche/Zoll]	Stichlänge [mm]	FKB [mm]
NCF-2.1	CF-1	offene Franse, Teilschuss	E 5	3,33	0,46
NCF-5.1	CF-1	geschl. Doppeltrikot, gegenlegig	E 3,5	7,26	0,34
NCF-5.2	CF-1	geschl. Doppeltrikot, gegenlegig	E 5	5,06	0,35

²⁵ Tuch- oder Satinbindungen wären ebenso denkbar, sind aber infolge des höheren Wirkfadenverbrauchs (Kosten) nicht Gegenstand des Lösungsraums.

In Tab. 4-6 sind nur die +45°-Varianten aufgeführt. Die ebenfalls untersuchten -45°-Gelege (NCF-6.1 und NCF-6.2) sind symmetrisch aufgebaut und werden daher nicht explizit erläutert. Die bereits in Kap. 4.1.1.3 angewandte Qualifizierungslogik und die entsprechenden Versuchsparameter werden weiter beibehalten.

Permeabilitäts- und Kompaktierungsmessungen

Die Permeabilitätsmessungen zeigen, abhängig von der gewählten Feinheit, signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Materialvarianten, siehe Abb. 4-25:

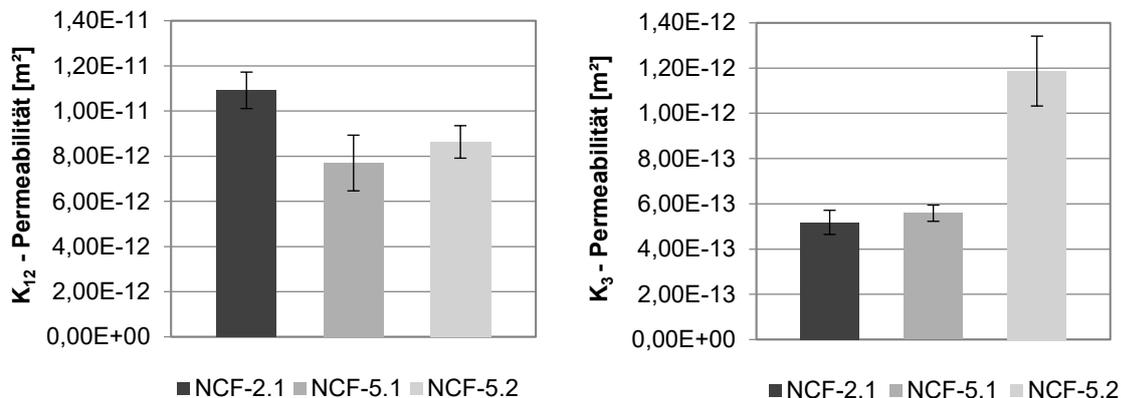


Abb. 4-25: Vergleich der K_{12} - und K_3 -Permeation unterschiedlicher +45° 300 g/m²-Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ von 53 % (NCF-5.1, NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0°-Referenz).

Im ebenen Fall zeigt sich bei den +45°-Textilien eine noch messbare Erhöhung der Permeabilität K_{12} beim Zielfaservolumengehalt von 53 % von 7,70E-12 m² (NCF-5.1) auf 8,63E-12 m² (NCF-5.2). Diese ist auf dem Niveau der Standardabweichung beider Messreihen und damit nicht signifikant. Beide +45°-Materialien bleiben unabhängig von der gewählten Feinheit hinter der 0°-Referenz NCF-2.1 zurück. Ursächlich ist neben dem Bindungstyp die geringere FKB gemäß Tab. 4-6. Deutlicher wird die Differenz der Varianten bei der Betrachtung der K_3 -Werte. Die transversale Permeabilität ändert sich im Wert von 5,59E-13 m² (NCF-5.1, E 3.5) auf 1,19E-12 m² (NCF-5.2, E 5) trotz vergleichbarer Fließkanalbreite. Dies entspricht einer Verdoppelung und übertrifft auch das Niveau des Referenzgeleges NCF-2.1 mit 5,18E-13 m².

Die Kompaktierungsspannung σ_{tar} beim Zielfaservolumengehalt reduziert sich von 149,9 kPa (Teilung E 3,5) auf 123,1 kPa (Teilung E 5). σ_{tar} von NCF-5.2 liegt damit auf dem Niveau der Franse-Teilschuss Konstruktion NCF-2.1. Inwieweit diese Reduktion das Füllverhalten beeinträchtigt und die Erhöhung des K_3 -Niveaus egalisiert, müssen die nachgelagerten Injektionsversuche zeigen.

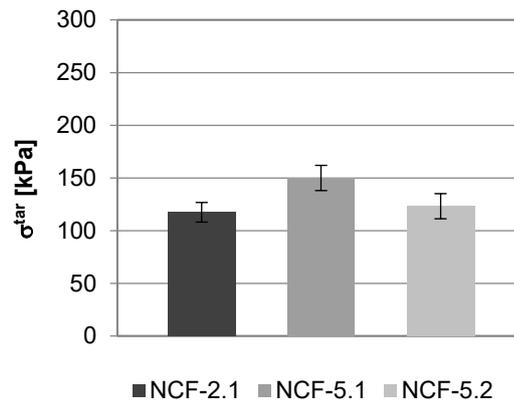


Abb. 4-26: Vergleich des Kompaktierungsverhaltens unterschiedlicher $+45^\circ$ 300 g/m^2 -Materialien bei einem Zielfaservolumengehalt $V_{f,\text{tar}}$ von 53 % (NCF-5.1, NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0° -Referenz).

2D-RTM-Injektionsversuche im Technikumsmaßstab

Die NCF-Varianten NCF-5.1 und NCF-5.2 werden in einem sechslagigen 0° -Aufbau im 2D-HD-RTM injiziert. Die Probenpräparation erfolgt dabei entlang der C-Faser-Orientierung, um die Imprägnierung entlang der Fließkanäle zu gewährleisten. Die gewonnenen Ergebnisse zeigt Abb. 4-27.

Der Füllungsfaktor FF ist bei beiden $+45^\circ$ -Varianten unter Einbeziehung der Standardabweichung auf vergleichbarem Niveau. Das Verhältnis der Fließfronten FV_{OU} zeigt eine Verbesserung bei der erhöhten Feinheit (NCF-5.2) und bestätigt somit die Wirksamkeit der erhöhten transversalen Permeation. Die gesamthaft erzielte Schussmenge zeigt ebenfalls eine Verbesserung von 142 g auf 155,8 g. Die modifizierte Variante übertrifft sowohl hinsichtlich Füllungsfaktor FF , wie auch bezogen auf das Fließfrontenverhältnis FV_{OU} , die Referenz NCF-2.1.

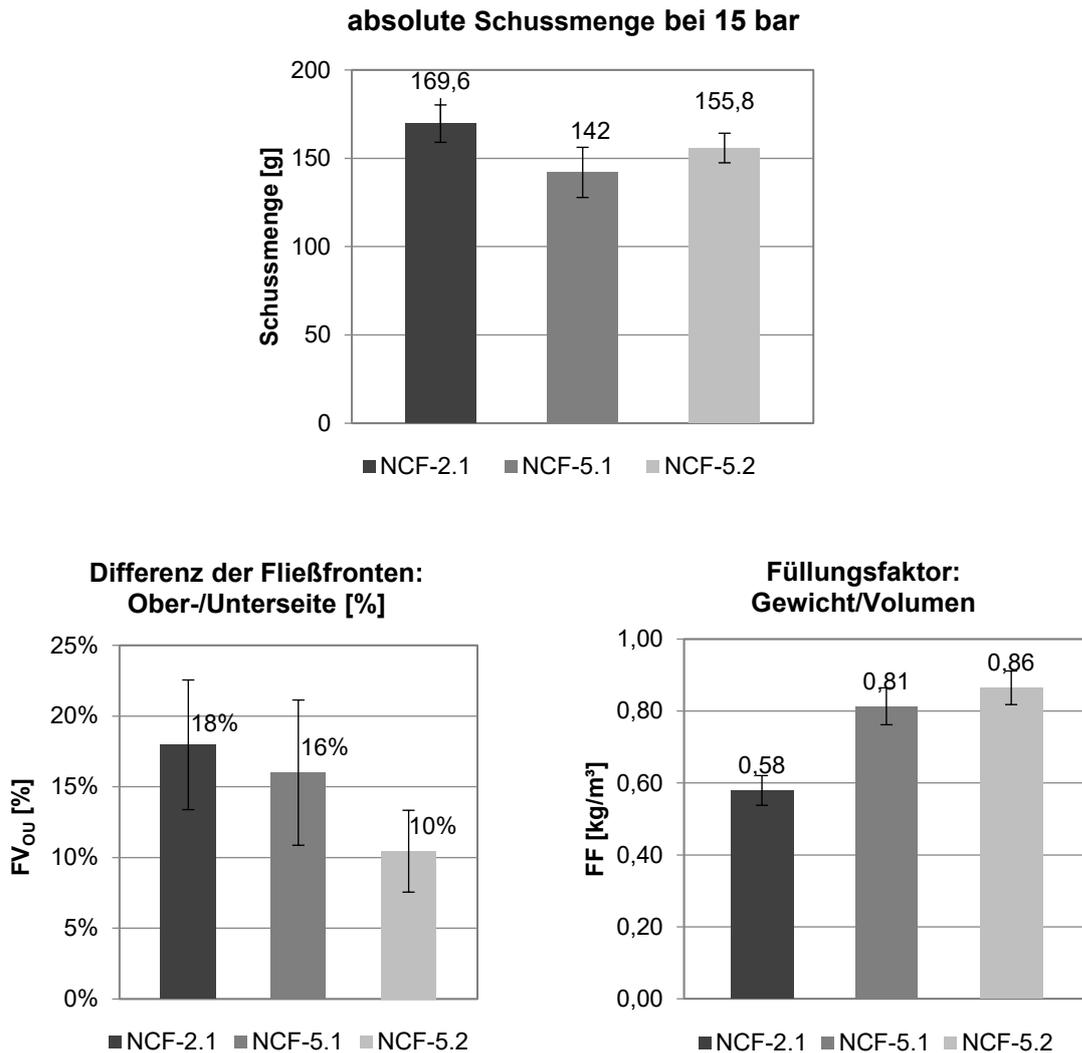


Abb. 4-27: Vergleich von 2D-HD-RTM unterschiedlicher $+45^\circ$ 300 g/m^2 -Materialien (NCF-5.1 und NCF-5.2 und NCF-2.1 als 0° -Referenz), absoluter Schussmenge (oben), Fließfrontverhältnis (unten links) und Füllungsfaktor (unten rechts).

Ein entsprechendes Bild zeigt sich bei der mikroskopischen Schnittuntersuchung der injizierten Plattenlamine, siehe Abb. 4-28. Die Probenpräparation und Bewertung folgen dabei dem in Kap. 4.1.1.3 vorgestelltem Schema.

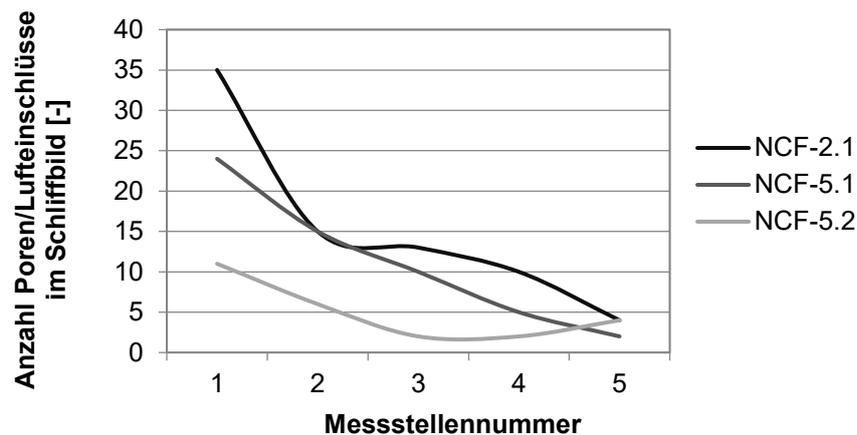


Abb. 4-28: Identifizierte Fehlstellen im ebenen Laminat, NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-5.2.

Das modifizierte Gelege (NCF-5.2) zeigt im Vergleich zu den Referenzmaterialien NCF-5.1 und NCF-2.1 eine reduzierte Anzahl von Fehlstellen im Laminat. Dementsprechend ist in der anschließenden Hochdruckinjektion eine Minderung des Forminnendruckanstiegs zu erwarten.

3D-RTM-Injektionsversuche im Serienmaßstab

Für die Bestätigungsversuche in der serienäquivalenten Versuchsumgebung wird ein fünflageriger Preform (5,6,2,6,5) hergestellt. Dieser Aufbau ist dominiert von $\pm 45^\circ$ -Materialien. Die Außenlagen werden entweder durch Materialien der Teilung E 3,5 (NCF-5.1) oder der Teilung E5 (NCF-5.2) realisiert. Die Kernlage stellt NCF-2.1, welche für beide Versuchsreihen unverändert bleibt. Dieser 1500 g/m^2 -Aufbau wird bei konstanter Austragsleistung (25 g/s) mit einer Druckbegrenzung von 25 bar injiziert. Für beide Varianten werden zehn Wiederholungen durchgeführt.

Abb. 4-29 stellt die Forminnendruckverläufe einander gegenüber. Der gemittelte Verlauf inklusive der erzielten Minimal- und Maximalwerte ist links dargestellt. Rechts ist die Differenz der erhaltenen Druckkurven bei 10 bar Forminnendruck hervorgehoben.

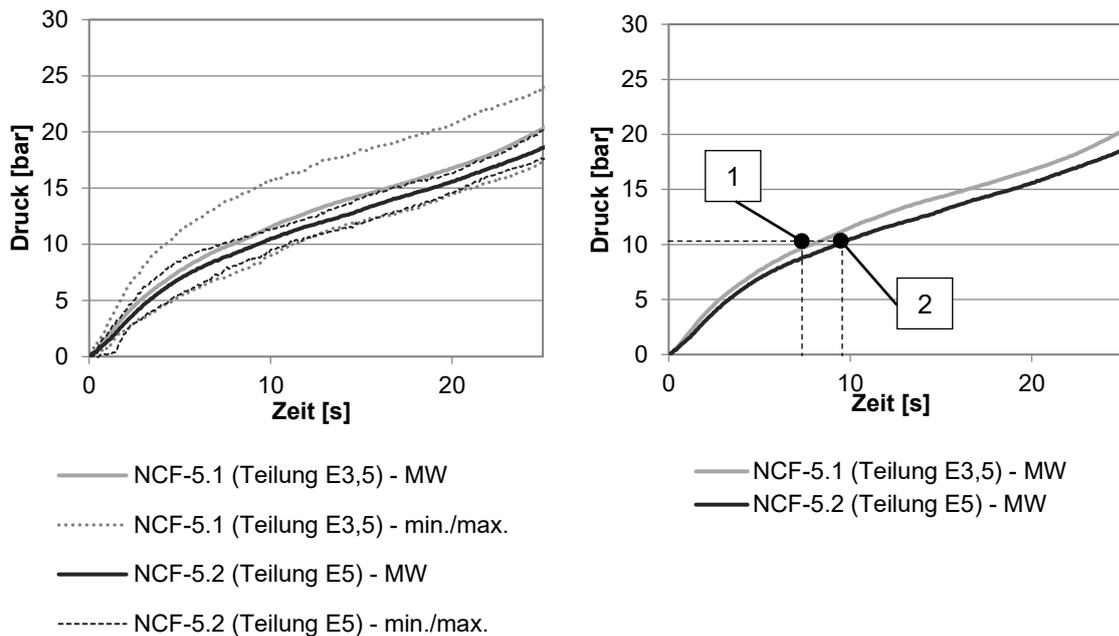


Abb. 4-29: Vergleich des Forminnendruckanstiegs bei Teilung E 3,5 (NCF-5.1) und Teilung E 5 (NCF-5.2) am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Nach 7,9 s liegt bei der Teilung E 3,5 (1) und erst nach 9,3 s bei der Feinheit E 5 (2) ein Forminnendruck von 10 bar an. Dies entspricht einem Schussgewicht von 197,5 g verglichen mit 232,5 g oder einer gesamthaften Verbesserung von 14,5 % bezogen auf die injizierte Matrixmenge.

Der Effekt der Druckminderung fällt verglichen mit den im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Optimierungen der 0°-Textilien (NCF-2.1 / NCF-2.4, vgl. Abb. 4-24) um 50 % geringer aus. Obwohl die untersuchten $\pm 45^\circ$ -Materialien hinsichtlich FKB (Fließkanalbreite), FKD (Fließkanaldurchgängigkeit), Permeabilität und Injektionsverhalten im ebenen Fall durchwegs hinter der modifizierten 0°-Gelegevariante (NCF-2.4) zurückbleiben, ist der Einfluss der veränderten Teilung dennoch auch im HD-RTM-Verfahren messbar. Dies bestätigt auch hier den positiven Einfluss der transversalen Permeabilität K_3 auf den Forminnendruckanstieg.

4.1.2 Fazit: textile Architektur (UD-NCF)

Die Engineered Gaps (Fließkanäle) eines Textils erweisen sich als wichtige Stellgröße für die Injektionsfähigkeit von trockenen UD-Gelegen. Durch ihre geometrische Ausprägung im Speziellen durch die Höhe, Breite, Form und die Anzahl der Fließkanäle (FK) beeinflussen diese vor allem die Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung der vorliegenden NCF. Infolgedessen nehmen die FK Einfluss auf den Forminnendruckanstieg bei der Injektion. Die Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen an UD-NCF können wie folgt zusammengefasst werden:

- Höhe, Breite und Länge eines FK (NCF-2.1 → NCF-2.2):

Die Fließkanalgeometrie, also Breite, Länge (und Durchgängigkeit) und Höhe (Grammatur), nehmen Einfluss auf die Permeabilität des NCF. Generell gilt: Ein größerer Fließkanalquerschnitt bedingt eine höhere Durchlässigkeit der 0°-Textilien sowie der ±45°-Materialien. Dieser Effekt ist sowohl bei der Permeabilitätsprüfung auf Laborebene, bei Injektionsversuchen im ebenen Technikummaßstab (bis 15 bar), sowie im 3D-Hochdruckbetrieb (bis 100 bar) messbar.

Dabei verringert sich die Permeabilität mit zunehmendem FVG aufgrund der Reduktion des Fließkanalquerschnitts. Dieser Effekt ist bei einem NCF mit geringem Verformungswiderstand z. B. NCF-2.1 (0° 300 g/m²: $\sigma_{tar} = 124,2 \text{ N/mm}^2$) ggü. NCF-1.1 (0° 150 g/m²: $\sigma_{tar} = 196,5 \text{ N/mm}^2$) ausgeprägter. Die FKB reduziert sich bei einer Kompaktierung (hier: $V_{f,43\%}$) auf 55% (NCF-2.1) bzw. 79 % (NCF-1.1) der Ausgangsbreite in nichtkomprimierten Zustand.

Durch die generelle Vergrößerung der Fließkanalbreite von 0,31 mm (NCF-2.1) auf 0,40 mm (NCF-2.2) kann im vorliegenden Fall der Forminnendruckanstieg im HD-RTM um 38 % gesenkt werden.

- Form des Fließkanals (NCF 2.1 → NCF 2.4):

Die Ermittlung der ebenen Permeation K_{12} ist zur Bewertung des Tränkungsverhaltens von dünnen CF-NCF-Laminaten (< 5 mm) nicht ausreichend. Es wird zu einem deutlichen Anteil von der transversalen Permeabilität K_3 beeinflusst. So zeigt sich im ebenen Injektionsfall bei der Franse-Teilschuss-Bindung (NCF-2.1: $K_{12} = 1,09 \text{ E-11 m}^2 / K_3 = 5,18 \text{ E-13 m}^2$) im Vergleich zur Trikotbindung (NCF-2.4: $K_{12} = 1,06 \text{ E-11 m}^2 / K_3 = 9,28 \text{ E-13 m}^2$) eine ausgeprägte Differenz im Fließfrontverhältnis $FV_{OU} = 18 \%$. NCF-2.4 zeichnet sich demgegenüber mit einer homogenen Füllung ($FV_{OU} = 7 \%$) aus, da sich durch die punktuelle, „straffe“ Bündelung der Rovings bei der Injektion Fließwege für das Harz in transversaler Richtung öffnen. Der Idealzustand ($FV_{OU} = 0\%$) konnte im Rahmen der Versuche nicht erreicht werden. Aber dennoch erzielt der Wechsel von der Franse-Teilschuss-Architektur hin zur Trikot-Bindung im HD-RTM eine Reduktion des Forminnendruckes von 49,6 %.

- Anzahl der Fließkanäle (NCF 5.1 → NCF 5.2):

Die Feinheit des Textils, also die Stichanzahl über die Warenbreite, beeinflusst ebenfalls die Permeabilität des Halbzeugs, vor allem in transversaler Richtung. So kann mit der Erhöhung der Feinheit von E 3,5²⁶ zu E 5 die Permeabilität K_3 von 5,59E-13 m² (NCF-5.1) auf 1,19E-12 m² (NCF-5.2) gesteigert werden. In

²⁶ E: Stiche pro engl. Zoll (2,54 cm)

der Folge wird damit die Fließfrontdifferenz (FV_{OU}) im Platteninjektionsversuch von 16 % auf 10 % reduziert. Als Resultat stellt sich auch im 3D-HD-RTM eine Reduktion des Druckanstiegs in der Kavität von 14,5 % ein.

Gesamthaft ist festzustellen, dass die im Labormaßstab ermittelten Erkenntnisse (z. B. Permeabilitätsprüfung mit $\Delta p = 0,1$ bar und dem Ersatzfluid H_2O) hinreichend genau sind und sich auf die Technikumsebene (Injektionsversuch ebene Platte, $\Delta p = 15-30$ bar) übertragen lassen. Darüber hinaus ermöglichen diese Erkenntnisse den Rückschluss auf den serienäquivalenten Hochdruckprozess (Injektionsversuch 3D-Bodenelement, $\Delta p = 25-100$ bar).

4.2 Bewertung des Lagenaufbaus (MD-Stacks)

Die bisherigen Untersuchungen beschränken sich auf Textilien gleicher Grammat, Orientierung und Konstruktion, d. h. es wurden ausschließlich unidirektionale, sog. Monoaufbauten analysiert, ausgenommen der 3D-HD-RTM Versuche. Denn in der Serienanwendung kommen mehrlagige Aufbauten unterschiedlicher Gelegetypen hinsichtlich Orientierung und Grammat – quasiisotrope (QI) Aufbauten – zum Einsatz, um den im Fahrzeug vorherrschenden Hauptbelastungsrichtungen Rechnung zu tragen. Implementiert wird der für das Fertigteil notwendige Lagenaufbau im Stacking-Prozess. Hierbei werden unterschiedliche Einzellege sukzessive zu einem multidirektionalen QI-Aufbau gestapelt (MD-Stack). Als Konsequenz muss die Interaktion mehrerer NCF-Lagen untereinander untersucht werden. D. h. CF-NCF-Stacks bestehend aus unterschiedlichen Materialtypen, einer variierenden Anzahl von Einzellagen und unterschiedlichen Materialfolgen sind zu betrachten.

Prozesstechnisch wird das Einzel-NCF beim Stacken in seinen geometrischen Eigenschaften (Fließkanalbreite, -durchgängigkeit oder -anzahl u. a.) nicht beeinflusst oder verändert. Somit ist der Stacking-Prozess selbst nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, sondern vielmehr der erzielte Lagenaufbau und dessen Verhalten hinsichtlich Permeabilität und Kompaktierung. Neben der Stacking-Sequenz (also das Aufeinanderfolgen unterschiedlicher Orientierungen) ist ein nennenswerter Einfluss der Lagenanzahl entsprechend Tab. 2-4 (Kap. 2.3.1) auf die obigen Produkteigenschaften denkbar. Daher stehen beide Faktoren im Fokus dieses Kapitels.

4.2.1 Einfluss der Lagenanzahl

Bereits während der Inbetriebnahme des H_2O -Permeationsprüfstands zeigt sich, dass ein direkter Einfluss zwischen Lagenanzahl eines Probenkörpers und der sich einstellenden

Permeabilität besteht. Mit steigender Lagenanzahl geht trotz konstantem FVG²⁷ eine verminderte Durchlässigkeit im Stack einher. Diese Durchlässigkeit erreicht bei zehn Lagen, unabhängig vom eingesetzten Gelegetyp, ihr Minimum. Eine weitere Reduzierung ist nicht zu festzustellen, siehe Abb. 4-30. Zur Veranschaulichung ist die Abnahme der K_3 -Permeabilität eines repräsentativen NCF-2.4-Aufbaus mit steigender Lagenanzahl dargestellt. Gemessen wird mittels H_2O -Permeationsprüfung bei konstantem Brutto-FVG. Die ermittelte Permeabilität in transversaler Richtung ist dabei „dunkelgrau“ und der jeweilige FVG „hellgrau“ dargestellt. Die Durchlässigkeit vom dreilagigen hin zum sechslagigen und hin zum zehnlagigen Aufbau fällt jeweils um mehr als 35 % ab.

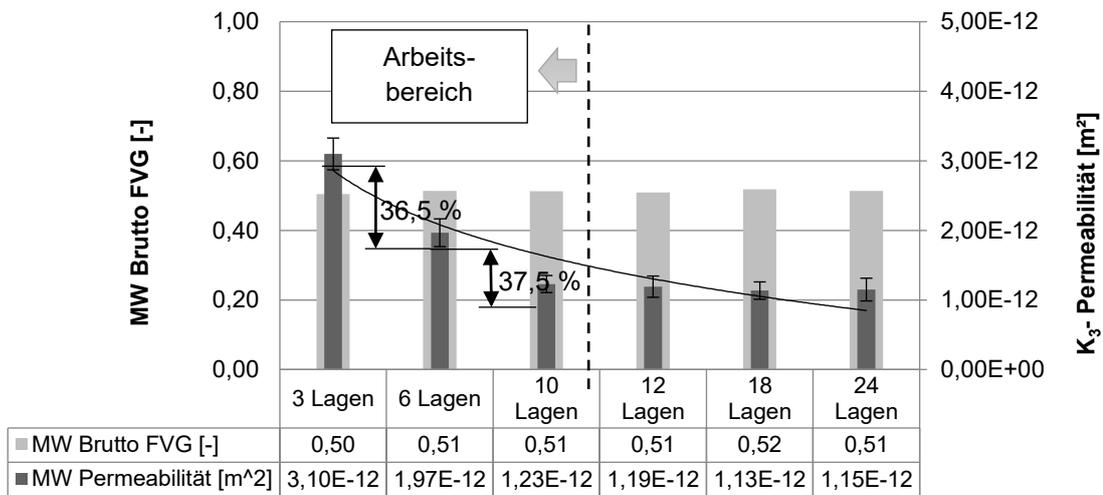


Abb. 4-30: Einfluss der NCF-Lagenanzahl auf die Permeabilität K_3 (NCF-2.4, 0°/90°-Aufbau).

Beim Übertrag des Sachverhalts auf die Serienanwendung wird die Relevanz dieser Erkenntnis deutlich. Denn in der Serienanwendung sind je nach funktionaler Anforderung Komponenten bestehend aus fünf bis zu elf Lagen realisiert. Folglich fällt deren erwartete Durchlässigkeit in den degressiven Bereich des Permeabilitätsverlaufs und beeinflusst daher signifikant das Füllverhalten im RTM-Prozess. Dieser Arbeitsbereich ist in Abb. 4-30 hervorgehoben.

Zur Bestätigung dieser Beobachtungen unter HD-RTM-Bedingungen wird eine Versuchsreihe am Bodenwerkzeug durchgeführt. Präpariert werden drei Aufbauten mit identischem Netto-FVG ($V_f = 42\%$), aber mit verschiedener Lagenanzahl, siehe. Tab. 4-7.

²⁷ Der FVG wurde mittels Anpassung der Kavitätshöhe auf identischem Niveau gehalten. Die variierte Kavitätshöhe selbst beeinflusst das Prüfergebnis nicht [96]

Tab. 4-7: Verwendete Lagenaufbauten zur Analyse unterschiedlicher Gelegekonfigurationen mit identischem CF-Flächengewicht (Netto-FVG).

Lagenanzahl	Lagenkonfiguration	Materialtypen	CF-Flächengewicht
7	3,4,2,2,2,4,3	NCF-3.1, NCF-4.1, NCF-2.1	1500 [g/m ²]
6	3,4,2,9,4,3	NCF-3.1, NCF-4.1, NCF-2.1, NCF-9.1	1500 [g/m ²]
5	5,6,2,6,5	NCF-5.1, NCF-6.1, NCF-2.1	1500 [g/m ²]

Die Lagenanzahl kann in drei Schritten durch das sukzessive Ersetzen der 150 g/m²-Grammaturen durch die entsprechenden 300 g/m²- und 600 g/m²-Textilien von sieben auf fünf reduziert werden, ohne den Netto-FVG zu verändern. Dabei bleibt die grundsätzliche Konstruktion des Stacks mit den von zwei $\pm 45^\circ$ -Lagen eingefassten 0° -Paketen erhalten, wobei sich das Verhältnis von $\pm 45^\circ$ - zu 0° -Material mit Reduktion der Lagenanzahl erhöht. Der so erhaltene 1500 g/m²-Aufbau wird bei konstanter Kavitätshöhe, also bei identischem Netto-FVG, injiziert. Als weitere Versuchsparameter werden die Injektionsdruckbegrenzung mit 25 bar und neun Wiederholversuche je Variante gewählt. Die erhaltenen Druckkurven werden zu einem Druckprofil je Stützstelle arithmetisch gemittelt. Abb. 4-31 zeigt die gemessenen Druckverläufe. Mit steigender Lagenanzahl nimmt der Forminnendruckanstieg bei der Injektion zu, siehe Abb. 4-31 (1) \rightarrow (2) \rightarrow (3). Bezogen auf die injizierte Matrixmenge bei 10 bar Forminnendruck ergibt sich ein Abfall von 38 % beim sechslagigen (2) und von 62 % beim siebenlagigen Aufbau (3) gegenüber der fünf-lagigen Referenz (1).

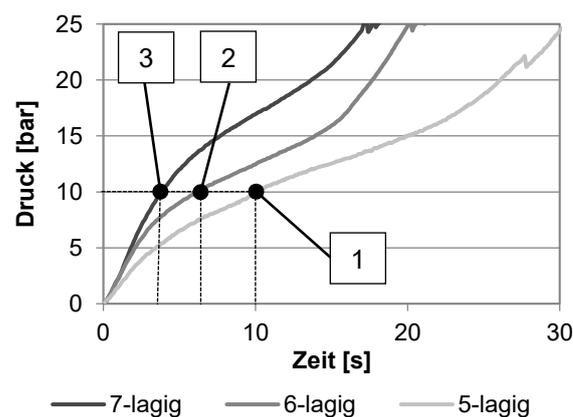


Abb. 4-31: Vergleich des Forminnendruckanstiegs eines Stacks unterschiedlicher Lagenanzahl bei identischem CF-Flächengewicht (1500 g/m²) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Die aufgezeichneten Druckprofile bestätigen die eingangs aufgestellte Hypothese. Mit steigender Lagenanzahl wird das Druckniveau von 25 bar infolge der reduzierten trans-

versalen Permeabilität zu einem früheren Zeitpunkt erreicht. Eine zunehmende Anzahl an Gelelagen im Stack schränkt die Bauteilfüllung somit ein.

Das erzielte Ergebnis wird durch zwei weitere Effekte überlagert: dem sog. Fremdmaterialanteil (also dem Gewichtsanteil von Glasfäden, Wirkgarn und Pulverbinder) und dem Nesting.

Der erste Punkt stand bereits im Fokus von Kap. 4.1.1.1 (vornehmlich Abb. 4-4). Demnach verbleibt zwar der Netto-FVG der untersuchten Varianten unabhängig von der gewählten Lagenanzahl bei nominell 42 %. Infolge der unterschiedlichen textilen Konstruktionen der verwendeten Materialtypen ändert sich aber der Brutto-FVG. Wird der Fremdmaterialanteil in die Analyse miteinbezogen, ergeben sich für den fünf-lagigen Aufbau ein Brutto-FVG von 46,7 %, für den sechslagigen von 47,3 % und für den siebenlagigen Stack von 48,4 %. Dieser Faktor ist ein Grund für den Permeabilitätsabfall infolge der Erhöhung der Lagenanzahl, da die Matrix beim Injektionsvorgang neben der C-Faser auch die erhöhten Anteile von Glas- und Wirkfäden im Halbzeug imprägnieren muss.

Der zweite Effekt wird anhand einer Permeabilitätsversuchsreihe basierend auf unterschiedlichen UD-Aufbauten ($0^\circ/0^\circ$ -Lagenorientierung) ersichtlich. Gerade die Lagenverbunde gleicher Orientierung zeigen eine deutlicher ausgeprägte Permeabilitätsverringerung mit steigender Lagenanzahl als die zuvor untersuchten MD-Aufbauten ($0^\circ/90^\circ$ -Orientierung), siehe Abb. 4-33. Bei den hier untersuchten Lagenorientierungen reduziert sich die transversale Durchlässigkeit von fünf-lagigem Stack hin zu achtlagigem Aufbau um 37,8 %. Auch diese Feststellung ist für die Serienanwendung von großer Bedeutung, denn Lagenaufbauten mit aufeinanderfolgenden Gelelen gleicher Orientierungen sind dort üblich.

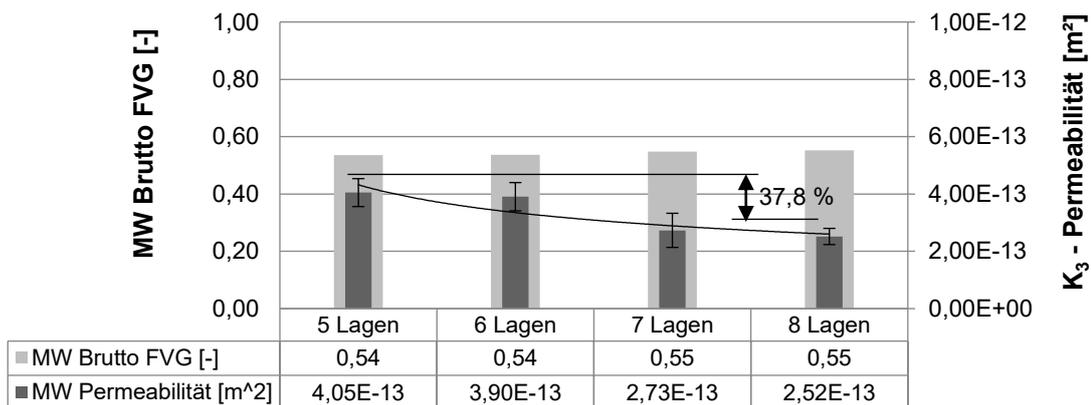


Abb. 4-32: Einfluss der NCF-Lagenanzahl auf die Permeabilität K_3 (NCF-2.1, $0^\circ/0^\circ$ -Aufbau).

Die Ursache für diesen Effekt liegt im sog. Nesting begründet [180], [181], [100]. Vor allem Chae [107] beschreibt einen Einfluss des Blockierens benachbarter Lagen bei Glasgeweben und Geflechtes. Anhand von Schliffbildern der zu Beginn des Abschnitts injizierten Komponenten kann der beschriebene Mechanismus auch bei CF-Gelelen

visualisiert werden, siehe. Abb. 4-33. Dargestellt sind drei unterschiedliche Laminat mit gleichem Netto-FVG (2 mm Wanddicke) hergestellt im 3D-HD-RTM: 5,6,2,6,5 (1), 3,4,2,9,4,3 (2) und 3,4,2,2,2,4,3 (3) bzw. (4). Der Imprägnierpfad der Matrix (exemplarisch „weiß“ skizziert) durch das Laminat entlang der Fließkanäle in z-Richtung verlängert sich mit zunehmender Lagenanzahl (1), (2) und (3). Der siebenlagige Aufbau, siehe Abb. 4-33 (3) und (4), zeichnet sich dabei durch ein UD-Paket bestehend aus drei Lagen gleicher Orientierung aus und veranschaulicht hier einen Sonderfall. Im dargestellten Fall (3) blockieren sich die Lagen gleicher Orientierung, da diese versetzt liegen. Es ist aber ebenfalls der entgegengesetzte Fall (4) zu beobachten. In diesem Zustand sind die Fließkanäle der Einzellagen zwar ebenfalls sequenziell angeordnet, halten aber den transversalen Fließweg für die Matrix offen. Dieser Effekt ist Untersuchungsgegenstand des nachfolgenden Kapitels.

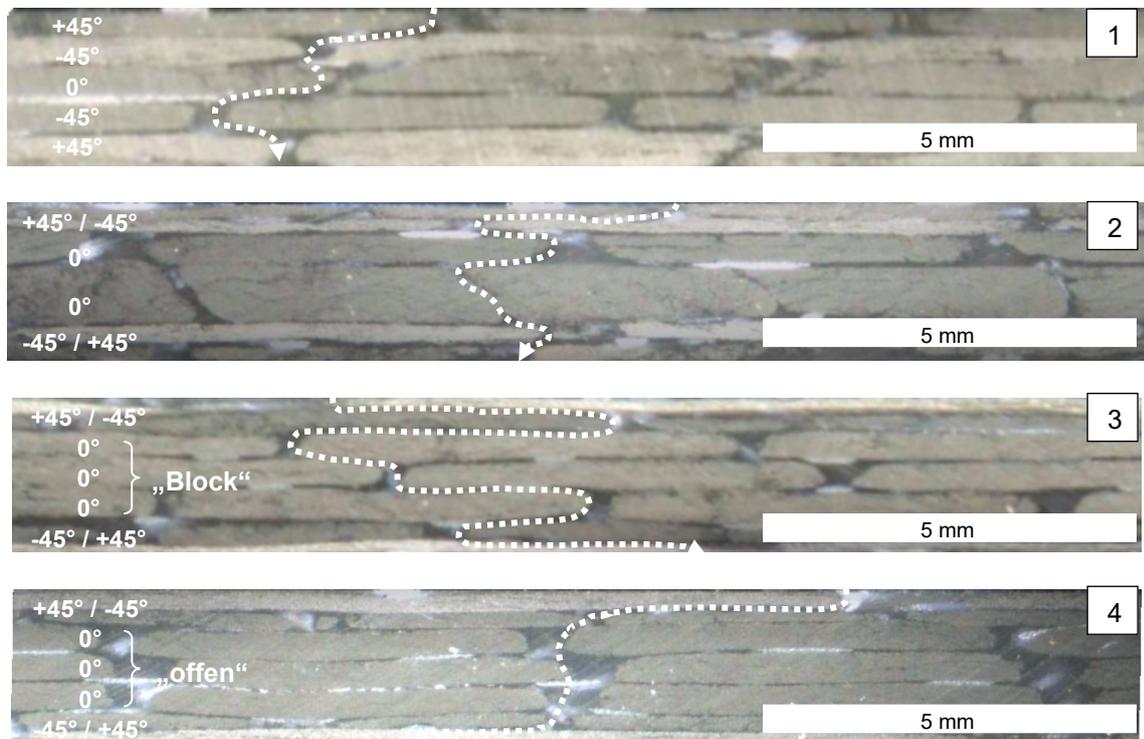


Abb. 4-33: Schliffbilder unterschiedlicher 1500 g/m²-Aufbauten.
 Netto-FVG (2 mm Wanddicke) im 3D-HD-RTM: 5,6,2,6,5 (1), 3,4,2,9,4,3 (2) und 3,4,2,2,2,4,3 (3)/(4). Ein möglicher transversaler Fließweg ist jeweils hervorgehoben.

4.2.2 Lagenaufbau und Nesting

Ziel dieses Abschnitts ist es, den Effekt des sog. Nestings abhängig von unterschiedlichen Lagenaufbauten anhand der Permeabilität K_3 zu quantifizieren. Dazu verdeutlicht Abb. 4-34 beispielhaft die prinzipiell möglichen Lagenfolgen eines dreilagigen Gelegestacks auf mesoskopischer Ebene. Unterschieden wird der UD-Aufbau mit NCF-

Lagen gleicher CF-Orientierung (1) und (2) und weiterhin der MD-Aufbau mit unterschiedlicher CF-Orientierung, 0° gefolgt von 90° (3).

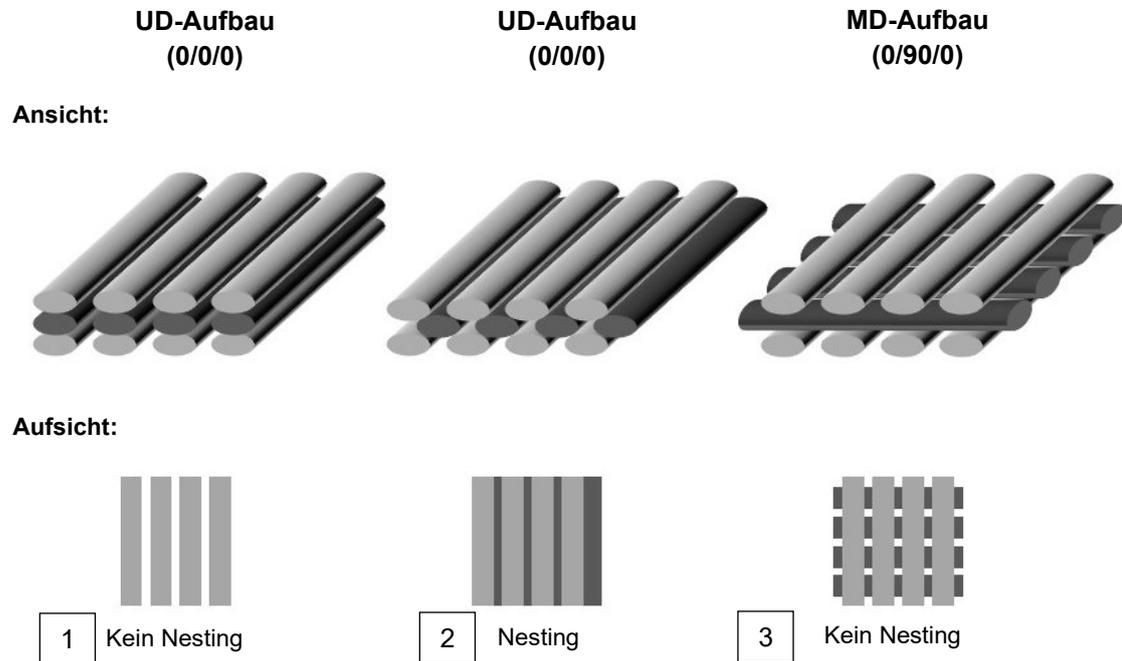


Abb. 4-34: Nestingprinzip bei UD- und MD-Lagenaufbauten.

Die beiden abgebildeten UD-Aufbauten (1) und (2) unterscheiden sich im Versatz der zweiten Lage. Diese blockiert in der Aufsicht Fall (2), Abb. 4-34 Mitte, den direkten Fluidstrom und reduziert daher die Permeabilität. Beim MD-Aufbau (3), hier in einer $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ -Orientierung dargestellt, Abb. 4-34 rechts, bleibt analog zum UD-Aufbau im Fall (1), Abb. 4-34 links, der direkte Harzfluss möglich. Kommen beim Stacking Einzellagen gleicher Orientierung versetzt zum Liegen, können diese beim Umformen im Preformprozess oder unter dem Injektionsdruck der HD-Injektion ineinandergleiten. In diesem Fall wird von Nesting gesprochen [151], wobei das Lagenpaket als „Dichtung“ wirkt. Abb. 4-35 veranschaulicht den beschriebenen Sachverhalt: Im Fall (1) und (2) sind die Fließkanäle sequentiell angeordnet, im Fall (3) und (4) versetzt. Das oben beschriebene Ineinandergleiten einzelner Gelelagen ist in (4) deutlich zu erkennen.

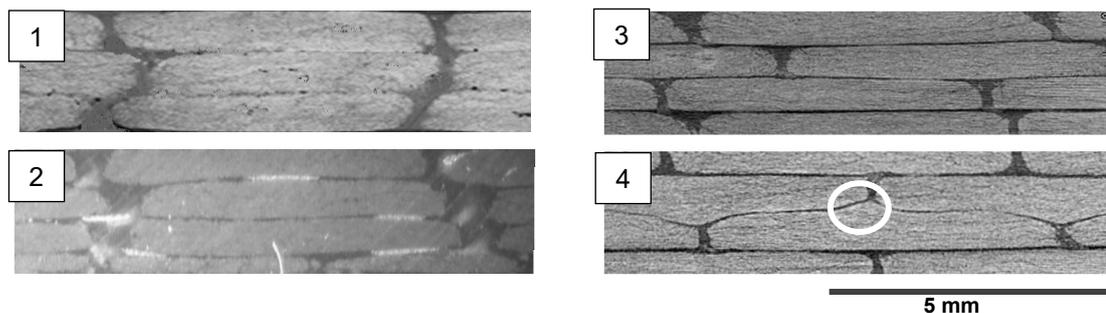
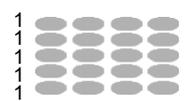
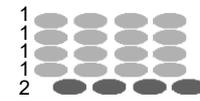
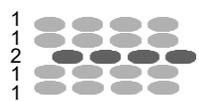
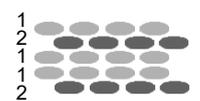
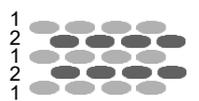


Abb. 4-35: Exemplarische Schlibfbilder unterschiedlicher UD-Laminat: kein Nesting (links) und Nesting (rechts).

Der Einfluss des Nestingeffekts wird im Folgenden anhand eines fünfflagigen UD-Aufbaus analysiert. Es existieren in Anlehnung an die Vorüberlegung je Lage zwei Zustände: Position 1, die sequenzielle Basislage, und Position 2, die versetzte, blockierende Lage, siehe Tab. 4-8 (Beispielbild). Die Kombinatorik lässt somit 2^n (n = Anzahl Lagen) Lagenfolgen zu. Mit $n = 5$ ergeben sich exemplarisch 32 unterschiedliche Kombinationen. Von Interesse sind bei genauer Betrachtung nur die Übergänge zwischen den einzelnen Gelegelagen und deren Zustand: „blockiert“ oder „offen“. Der fünfflagige Aufbau weist vier Übergänge auf, die sich gemäß Tab. 4-8 in die Varianten A bis E gliedern. Dabei beschreibt Variante A vier „offene“ und Variante E vier „blockierende“ Übergänge. Beide Beispiele lassen sich in einem Lagenaufbau mit n -Lagen nur exakt einmal abbilden, wobei die Varianten B, C und D durch mehrere Lagenfolgen darstellbar sind. Bei diesen Überlegungen wurden die spiegelgleichen Lösungen, z. B.: $2,1,1,1,1 = 1,2,2,2,2$ vernachlässigt, da sich diese in der Abfolge der Übergänge zwischen den Lagen nicht unterscheiden. In beiden Fällen ist der Übergang zwischen der ersten und zweiten Lage gesperrt und jener der übrigen Lagen offen. Tab. 4-8 (Lagenfolge) listet die Kombinatorik der einzelnen Varianten auf:

Tab. 4-8: Mögliche Lagenversatzszenarien eines fünfflagigen UD-Stacks.

Variante A	Variante B	Variante C	Variante D	Variante E
Beispielbild				
				
Anzahl blockierender Übergänge				
0	1	2	3	4
Lagenfolge (1 = "offen", 2 = "versetzt")				
1,1,1,1,1	1,1,1,1,2 1,1,1,2,2 1,1,2,2,2 1,2,2,2,2	1,2,1,1,1 1,2,2,1,1 1,1,2,1,1 1,2,2,2,1 1,1,2,2,1 1,1,1,2,1	1,2,1,1,2 1,2,1,2,2 1,2,2,1,2 1,1,2,1,2	1,2,1,2,1
Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten und Auftretenswahrscheinlichkeiten				
1	4	6	4	1
6,25 %	25 %	37,5 %	25 %	6,25 %

Um den Nestingeffekt und dessen Einfluss auf die Injektionsfähigkeit eines Stacks zu quantifizieren, werden die in Tab. 4-8 vorgestellten Prinzipaufbauten nachgestellt und hinsichtlich K_3 -Permeabilität untersucht. Die Probenpräparation erfolgt manuell. Als

Versuchsmaterial dient NCF-2.1. Je Versuchspunkt stehen 12 Wiederholungen zur Verfügung. Die händisch präparierten Probekörper werden mittels H₂O-Permeation geprüft. Abb. 4-36 stellt die Versuchsergebnisse zusammen:

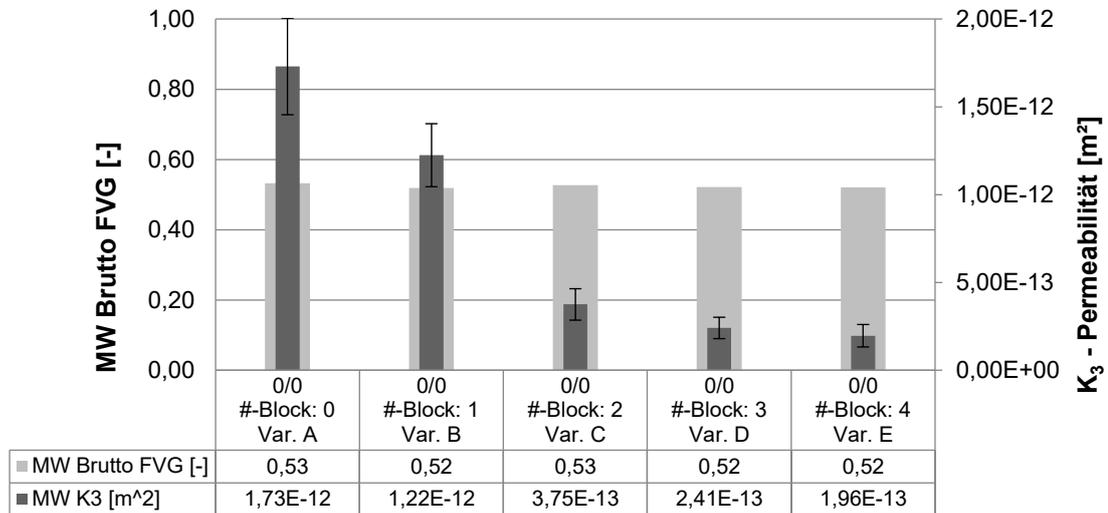


Abb. 4-36: Vergleich Permeabilität K_3 unterschiedlicher Lagenversatzszenarien, fünfläger UD-Stack, NCF-2.1.

Die Spanne der ermittelten Permeationswerte für Variante A bis E reicht von 1,73E-12 m² bis 1,96E-13 m². Die erzielten Ergebnisse bestätigen die vorangegangene Hypothese: Je höher die Anzahl der blockierenden Lagenübergänge ist, desto geringer wird die Permeabilität des gesamten Stacks in z-Richtung ausfallen. Wird die Auftretenswahrscheinlichkeit, abgeleitet aus der Anzahl der möglichen Kombinationen je Variante (vgl. Tab. 4-8), in die Überlegungen miteinbezogen, werden in der realen Anwendung in neun von zehn Fällen ein bis drei Lagenübergänge blockieren. Hinzu kommt weiterhin, dass bei der Modellbildung für die Zustände 1 und 2 das Größenverhältnis von Roving und Fließkanal vernachlässigt wurde. Bei einer Teilung E5 und einer mittleren FKB von 0,5 mm stellt sich ein Verhältnis von zehn zu eins dar. D. h. in nur einem von zehn Fällen ist der Zustand 1 wahrscheinlich. Daraus folgt, dass zwei aufeinanderfolgende Lagen gleicher Orientierung grundsätzlich „nesten“ und jede weitere Lage den Grad des Nestings in z-Richtung verstärkt. Im Umkehrschluss ist der Nestingeffekt also keine Ausnahme, sondern stellt die Regel dar.

Der Vergleich mit den in Kap. 4.2.1 geprüften Aufbauten bestätigt diese Schlussfolgerungen. So weist der in Abb. 4-32 gezeigte zufällige Aufbau eine transversale Permeabilität von 4,05E-13 m² ($V_{f,Brutto} = 54\%$) auf. Dem gegenüber steht die bewusst manipulierte Variante C der obigen Versuchsreihe mit 3,75E-13 m² ($V_{f,Brutto} = 53\%$). In Anbetracht des geringeren FVG und der gemessenen Standardabweichung sind beide Prüfergebnisse gleichzusetzen. In der Konsequenz hat auch hier eine Lagenfolge mit zwei blockierenden Übergängen (Variante C) vorgelegen. Dies unterstreicht die diskutierte Auftretenswahrscheinlichkeit. Die Analyse des entsprechenden Probekörpers bestätigt die Überlegungen.

Nach der Diskussion des Nestingeffekts bei UD-Aufbauten rückt jetzt der MD-Aufbau in den Fokus der Untersuchungen. Die zu Beginn des Kapitels vorgestellte Prinzipskizze (vgl. Abb. 4-34) zeigt, dass sich für den 0°/90°-Aufbau im Gegensatz zum 0°/0°-Aufbau keine Möglichkeit des Nestings zwischen zwei benachbarten Lagen ergibt.

Dies bedeutet, dass die MD-Materialien ($\pm 45^\circ$ und 90°), bedingt durch den konstruktiv festgelegten Lagenaufbau (z. B. $+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ$) mit kreuzweiser Anordnung in den Außenlagen, im Lagenverbund immer eine höhere Durchlässigkeit gewährleisten als die eingefassten, parallel angeordneten UD-Pakete im Stackinneren, obwohl beide Materialtypen einzeln betrachtet nominell vergleichbare Permeabilitäten aufweisen. Dementsprechend muss eine alternierende Lagenorientierungsfolge im Stacking die Permeabilität und damit die Injektionsfähigkeit eines Lagenaufbaus signifikant beeinflussen. Obwohl eine Vermeidung von UD-Paketen durch das sog. „Entkoppeln“, d. h. die alternierende Anordnung von 0°- und 45°-Gelegen, die Bauteilfunktion bezogen auf ihre mechanischen Eigenschaften (hauptsächlich hinsichtlich Biegebeanspruchung) negativ beeinflusst, soll dieser Mechanismus quantifiziert werden, da er einen positiven Effekt auf die Imprägniereigenschaft verspricht.

Zur Nachweisführung werden Permeationsversuche unterschiedlicher CF-NCF-Typen und Lagenfolgen durchgeführt. Das nominelle Netto-Flächengewicht der untersuchten Stacks wird für die Vergleichbarkeit konstant bei 1500 g/m^2 gehalten. Entsprechend Tab. 4-9 werden die Gelegetypen NCF-2.1, NCF-2.4, NCF-5.1 und NCF-5.2, jeweils als 0°/0°-, 0°/90°- und kombiniert als $-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ -Aufbau, untersucht.

Tab. 4-9: Verwendete Lagenaufbauten zur Analyse der Lagenorientierung.

Variante	Materialtyp	Lagenorientierung [°]	Textile Architektur
1	2,2,2,2,2	0/0/0/0/0	NCF-2.1
2	2,2,2,2,2	0/90/0/90/0	NCF-2.1
3	2,2,2,2,2	0/0/0/0/0	NCF-2.4
4	2,2,2,2,2	0/90/0/90/0	NCF-2.4
5	5,5,5,5,5	0/0/0/0/0	NCF-5.1
6	5,5,5,5,5	0/90/0/90/0	NCF-5.1
7	5,5,5,5,5	0/0/0/0/0	NCF-5.2
8	5,5,5,5,5	0/90/0/90/0	NCF-5.2
9	5,6,2,6,5	$-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$	NCF-2.1, NCF-5.2, NCF-6.2
10	5,6,2,6,5	$-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$	NCF-2.4, NCF-5.2, NCF-6.2

In Abb. 4-37 werden die erzielten Ergebnisse gegenübergestellt:

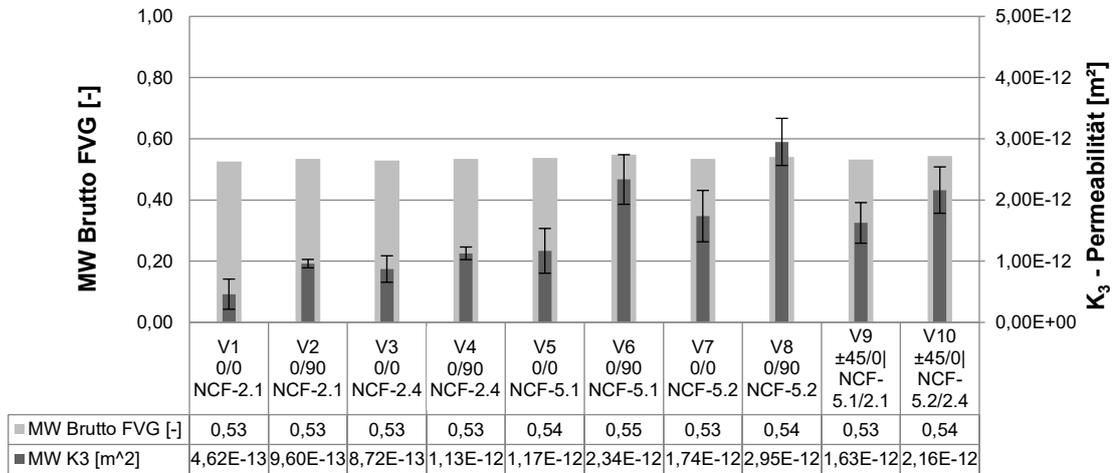


Abb. 4-37: Vergleich Permeabilität K_3 unterschiedlicher Stacksequenzen.

In jedem untersuchten Fall ist die transversale Permeabilität eines $0^\circ/90^\circ$ -Aufbaus höher als die des korrespondierenden UD-Stacks mit $0^\circ/0^\circ$ -Aufbau: $K_{0/90} > K_{0/0}$. Dies gilt unabhängig vom gewählten Materialtyp für die Versuchspunkte V1 bis V8. Ebenfalls übersteigen die beiden Multimaterialaufbauten (V9 und V10) mit der $-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ -Lagenfolge die $0^\circ/0^\circ$ -Varianten (V1, V3, V4 und V7) bezogen auf die Permeation, da auch hier kein Nesting auftreten kann. Am Beispiel von V1 ($K_3 = 4,62 \text{ E-13 m}^2$) und V2 ($K_3 = 9,60 \text{ E-13 m}^2$) wird deutlich, dass durch die Entkopplung ($0^\circ/0^\circ \rightarrow 0^\circ/90^\circ$) die Durchlässigkeit um bis zu 100 % gesteigert werden kann. Als Fazit lässt sich festhalten, dass eine alternierende Lagenorientierungsfolge die transversale Permeabilität begünstigt.

Die Bestätigung des herausgearbeiteten Mechanismus im 3D-HD-RTM erfolgt am Realbauteil mit der in Tab. 4-10 abgebildeten Lagenkonfiguration. In beiden Fällen wird ein 2700 g/m^2 -Aufbau erstellt. Variante 1 zeichnet sich durch ein innen liegendes siebenlagiges UD-Paket aus. Variante 2 wird vollständig entkoppelt aufgebaut. In diesem Prinzipversuch werden mechanische Eigenschaften der späteren Komponente bewusst vernachlässigt, um den zu untersuchenden Effekt zu maximieren.

Tab. 4-10: Verwendete CF-NCF zur Untersuchung der Entkopplung, 3D-HD-RTM.

Zwei Varianten eines 2700 g/m^2 -Aufbaus: eine Standardstacksequenz (Variante 1) und vollständig entkoppelter Aufbau (Variante 2).

Variante	Materialtyp	Lagenorientierung [°]	Textile Architektur
1	3,4,2,2,2,2,2,2,4,3	+45/-45/0/0/0/0/0/0/0/0/-45/+45	NCF-2.1, NCF-3.1, NCF-4.1
2	3,2,4,9,8,9,4,2,3	+45/0/-45/0/90/0/0/-45/0/+45	NCF-2.1, NCF-8.1, NCF- 9.1, NCF-3.1, NCF-4.1

Beide Varianten werden im Serienprozess verarbeitet. Abb. 4-38 zeigt die beiden erzielten gemittelten Forminnendruckprofile (fünf Wiederholversuche, Injektionsdruckbegrenzung 100 bar):

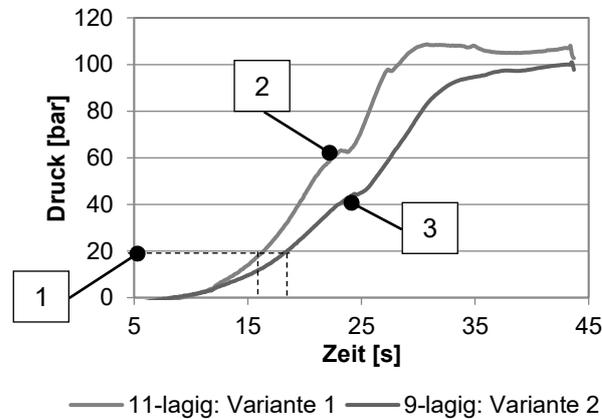


Abb. 4-38: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Preforms unterschiedlicher Lagenfolge im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 100 bar).

Das Druckprofil des entkoppelten Stacks zeichnet sich, verglichen mit der Basiskonfiguration, durch einen geringeren Forminnendruckanstieg aus. Der Vergleich der injizierten Harzmenge bei 20 bar Kavitätinnendruck, entsprechend Abb. 4-38 (1), weist eine Verbesserung von 12,8 % auf. Die dezidierte Betrachtung des Druckverlaufs gegen Schussende zeigt darüber hinaus, dass Variante 1 die Formfüllung mit 60 bar (2) erzielt, der entkoppelten Variante 2 hingegen 40 bar (3) genügen. In diesem Fall kann demnach sogar eine Druckreduktion von ca. 30 % erzielt werden. Dies bestätigt die zuvor aufgestellten Hypothesen.

Um die Effekte des Nestings mit den in Kap. 4.1 ermittelten Einflussfaktoren (Fließkanalbreite und Materialtyp) in Relation zu setzen, wird eine Versuchsreihe im Labormaßstab durchgeführt. Als indirekte Messgrößen für die erwartete Formfüllung dienen die Permeabilität K_{12} und K_3 sowie die Kompaktierungsspannung σ . Mit den Prämissen, dass Grammatur, Nadelteilung und Bindungsart während eines Produktionsloses nicht veränderlich sind, werden als Versuchsbasis die Materialien NCF-2.4, NCF-5.2 und NCF-6.2 gewählt. Als variabler Faktor auf Textilebene verbleiben die Kettfadenspannung und damit die Fließkanalbreite. Demgegenüber wird auf Stackebene der Lagenaufbau hinsichtlich Lagenfolge und eingesetzten Materialtypen variiert. Die Lagenanzahl entfällt als Parameter, da diese funktional-konstruktiv unveränderlich ist.

Im Betrachtungsfokus steht neben den Fließkanalbreiten der Einfluss der Stacksequenz und des Materialtyps. Folglich werden UD-Aufbauten aus 0° 300 g/m²-Textilien (NCF-2.4) und $\pm 45^\circ$ 300 g/m²-Gelegen (NCF-5.2/NCF-6.2) wie auch $0^\circ/90^\circ$ -Aufbauten mit identischen Materialien hergestellt. Alle Varianten werden zehnlagig präpariert, ausgenommen ist der serienrelevante Lagenaufbau. Dieser ist dem sechslagigen Standardbodenaufbau der vorangegangenen Untersuchungen nachempfunden: NCF-5.2/NCF-6.2/NCF-2.4_s. Die für die Prüfkörper notwendigen Einzellagen werden mittels

NCF-Scanner vermessen und hinsichtlich ihrer Fließkanalbreiten aufgebaut. Es ergeben sich je Variante ein diskreter Stack mit explizit großen und je ein Stack mit kleinen Fließkanalbreiten. Beim Serienaufbau („Boden“) werden vier Abstufungen hinsichtlich Fließkanalbreite realisiert. Im Anschluss werden die Stacks auf deren Permeabilität in K_{12} und K_3 -Richtung hin untersucht. Ebenso werden das Kompaktierungsverhalten beim Zielfaservolumengehalt σ_{tar} , die max. auftretende Kompaktierungsspannung σ_{max} und das Relaxationsverhalten derselben analysiert. Der gewählte Zielfaservolumengehalt ist 53 %, die Probenanzahl je Versuchspunkt beläuft sich auf sechs Stück. Die erzielten gemittelten Fließkanalbreiten je Aufbau und die gewonnenen Ergebnisse sind in Abb. A-19 und Abb. A-20 im Anhang zusammengefasst.

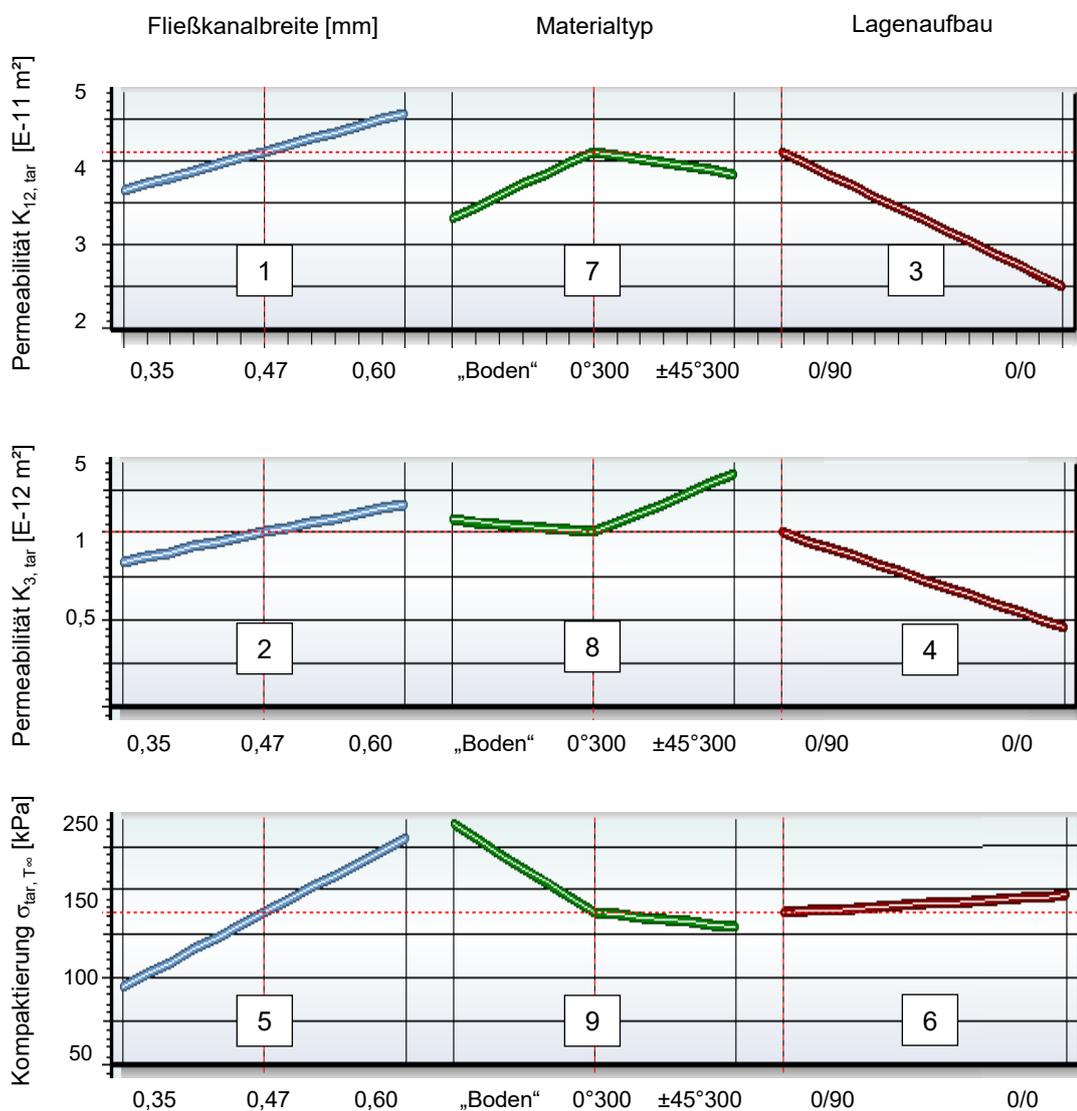


Abb. 4-39: Zielgrößen Permeabilität und Kompaktierung in Abhängigkeit Parameter Fließkanalbreite, Materialtyp und Lagenaufbau.

Eine Regressionsrechnung über die ermittelten Resultate mit den Parametern Lagenaufbau, Fließkanalbreite und Materialtyp soll den analytischen Nachweis des Einflusses auf die Zielgrößen Permeabilität K_{12} , K_3 und Kompaktierung σ_{tar} geben. Mittels linearer multipler Regression werden abhängig von den Zielgrößen Bestimmtheitsmaße R^2 von 0,85-0,95 erreicht. Die graphische Auswertung ist in Abb. 4-39 aufgetragen.

Diese Extremwertbetrachtung zeigt, dass der Mittelwert der Permeabilität allein mit der Zielgröße Fließkanalbreite beim Einzelmateriale Aufbau im ebenen Fall (K_{12}) um ca. $\pm 12,5\%$ (1) und um $\pm 25\%$ im transversalen Fall (K_3) variiert werden kann (2). Die Änderung des Lagenaufbaus von $0^\circ/90^\circ$ auf $0^\circ/0^\circ$ bewirkt in beiden Fällen eine Reduktion um ca. 50 %, siehe (3) und (4). Hinsichtlich Kompaktierung lässt sich bezogen auf die Fließkanalbreite eine Änderung um $\pm 30\%$ erzielen (5). Die Änderung der Stacksequenz beeinflusst diese jedoch nicht (6). Die Einflussnahme des Parameters Materialtyp auf die Permeabilität (7), (8) und Kompaktierung (9) bestätigt die Ergebnisse der Kap. 4.1.1.3 und 4.1.1.4.

Die Regression erlaubt weiterhin die Gewichtung der Einzeleffekte abhängig von der gewählten Zielgröße, wie in Abb. 4-40 verdeutlicht:

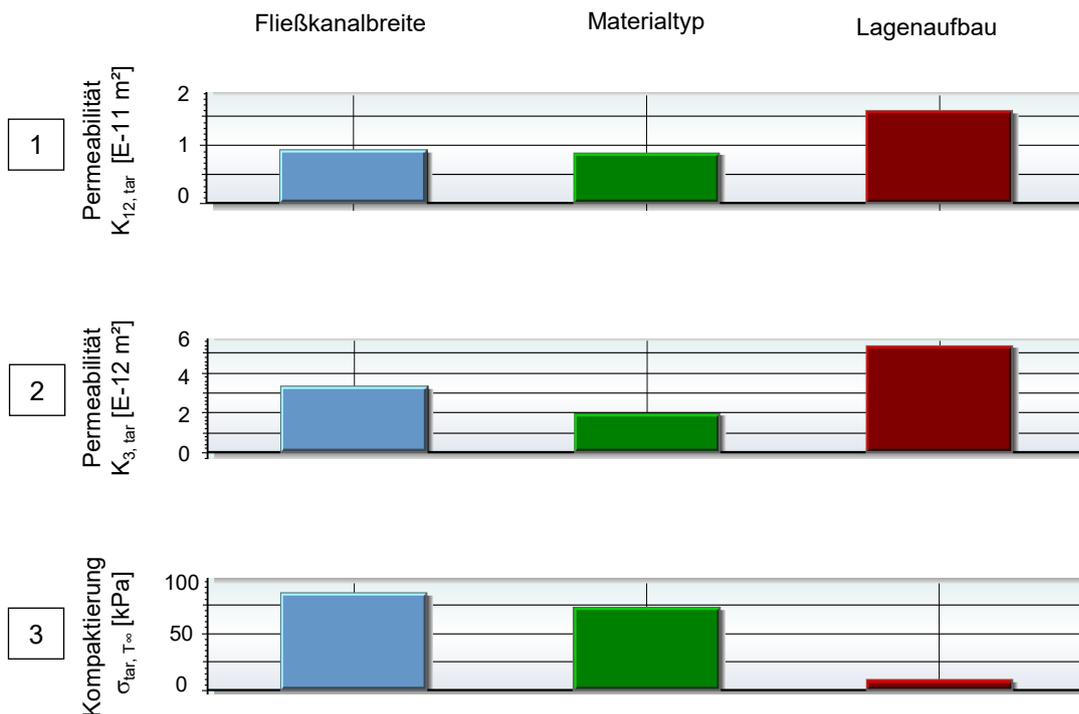


Abb. 4-40: Gewichtung der Einzeleffekte Fließkanalbreite, Materialtyp und Lagenaufbau abhängig von den Zielgrößen Permeabilität und Kompaktierung.

Bezogen auf die Zielgröße Permeabilität übersteigt der Effekt des Lagenaufbaus sowohl in der Ebene (1) wie auch in transversaler Richtung (2) den der Fließkanalbreite um ca. 50 %. Dies unterstreicht den Einfluss des auftretenden Nestings. Bei der Kompaktierung hingegen fällt die Stacksequenz nicht ins Gewicht (3). Hier sind die textile Konstruktion

und die angelegte Kettfadenspannung maßgebend. Ein „straff“ abgebundener Einzelroving weist also einen höheren Verformungswiderstand auf als eine vergleichbare „lockere“ Bindung.

4.2.3 Fazit: Lagenaufbau (MD-Stack)

Der Stacking-Prozess birgt durch die Festlegung des Lagenaufbaus ein großes Potenzial hinsichtlich Permeabilität sowohl in der ebenen K_{12} -Richtung als auch in der transversalen K_3 -Richtung. Es können folgende Einflussfaktoren herausgearbeitet werden:

- Lagenanzahl (bis zu zehn Lagen und mehr):

Die Permeabilität in transversaler Richtung vermindert sich mit steigender Lagenanzahl, trotz konstantem FVG. Dieser Effekt stagniert ab einer Lagenanzahl von zehn Lagen. Im HD-RTM-Prozess konnte der Forminnendruck abhängig von der Lagenanzahl um 38 % (fünf Lagen → sechs Lagen) und 62 % (fünf Lagen → sieben Lagen) variiert werden.

- Lagenfolge ($0^\circ/0^\circ \rightarrow 0^\circ/90^\circ$):

Aufeinanderfolgende Lagen gleicher Orientierung können Fließwege blockieren und in der Folge die Permeabilität reduzieren. Durch die Entkoppelung von Lagenaufbauten, also die alternierende Anordnung von 0° -, $\pm 45^\circ$ - oder 90° -Gelegen im Lagenverbund, kann die Permeabilität eines Stacks bei gleichbleibendem C-Faserinhalt um bis zu 100 % variiert werden. Im Hochdruckprozess kann durch die Entkoppelung eines beispielhaften Aufbaus eine Forminnendruckreduktion von ca. 30 % erzielt werden.

Die oben formulierten Feststellungen beeinflussen die bisherigen Erkenntnisse hinsichtlich textiler Architektur der UD-Einzellagen aus dem vorangegangenen Kap. 4.1.1 nur bedingt. Die Probekörper der H_2O -Permeabilitätsprüfung in der K_{12} - und in K_3 -Richtung sowie die der Kompaktierungsprüfung wurden zehnlagig in $0^\circ/90^\circ$ -Orientierung präpariert, um die beschriebenen Nestingeffekte und Abhängigkeiten von der Lagenanzahl auszuschließen. Demgegenüber ist beim ebenen Platteninjektionsversuch (2D-HD-RTM) mit Nesting zu rechnen. Dies ist ursächlich für die auftretende Streuung in den erzielten Ergebnissen. Im serienrelevanten 3D-HD-RTM-Versuch, sind die Effekte beim fünf-lagigen, alternierenden Aufbau ($+45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ$) nicht existent. Beim sechs- und siebenlagigen ($+45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, (0^\circ), 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ$) ist ein Ineinandergleiten der sequentiell angeordneten 0° -Lagen im Kern möglich. Deren Einfluss bleibt jedoch infolge der geringen Lagenanzahl (zwei bzw. drei Kernlagen) hinter dem Beispiel aus Abb. 4-38 (sieben Kernlagen) zurück. Nichtsdestotrotz sind die Nestingeffekte, neben der grundsätzlichen textilen Varianz, mitunter ursächlich für die beobachteten Schwankungen bei den durchgeführten Injektionsversuchen.

Die Relevanz für die Serienanwendung ist demgegenüber durchaus gegeben. Denn Lagenaufbauten mit einer Lagenanzahl von bis zu zehn Lagen sind gängige Praxis. Grundsätzlich ist aus den oben aufgeführten Überlegungen abzuleiten, dass alleine durch die Entkopplung der Stacksequenz eines solchen MD-Aufbaus das Füllverhalten des späteren Bauteils maßgeblich beeinflusst werden kann, ohne die mechanischen Eigenschaften der Komponente grundsätzlich zu ändern.

5 Interaktion mit den Verarbeitungsprozessen Preform und RTM

Nach der Analyse und Optimierung der eingesetzten Halbzeuge UD-NCF und MD-Stack hinsichtlich Imprägniereigenschaften wird in diesem Abschnitt deren Interaktion mit dem Preform- und RTM-Prozess untersucht. Im Fokus stehen die Wirkzusammenhänge des Bindersystems (Menge und Verarbeitungstemperatur) mit dem CF-NCF und daraus abgeleitet die Prozessführung (Wärmeeintrag) beim Preformen (Kap. 5.1) sowie die Möglichkeit zur Spaltinjektion bei RTM-Verfahren (Kap. 5.2). Ziel dabei ist es, die Stellhebel zu identifizieren, welche die Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung der vorliegenden Halbzeuge beeinflussen, um diese zielgerichtet zu modifizieren. Darauf aufbauend wird das optimale Prozessfenster für deren Verarbeitung im anschließenden Kapitel 6 abgeleitet.

5.1 Wirkzusammenhänge beim Binderpreformen

Aus den bisherigen Untersuchungen (Kap. 4.1.2 und 4.2.3) lässt sich folgern, dass auch das trockene, umgeformte Halbzeug - der Preform - besonders permeabel und formstabil sein muss, um bei der HD-Injektion einen Forminnendruckanstieg zu generieren, welcher eine vollständige Komponentenfüllung ermöglicht. Der Begriff „formstabil“ muss im Kontext des Preformens über den bereits diskutierten Verformungswiderstand bei der Kompaktierung des ebenen Halbzeugs Gelege oder Stack hinaus detailliert werden. Es ist zu beachten, dass der RTM-Prozess neben einem handlingssteifen Preform auch eine hohe Lagenhaftung zwischen den einzelnen Gelegelagen des Lagenverbunds fordert, um Materialverschiebungen bei der HD-Injektion zu vermeiden.

Das eingesetzte Bindersystem stellt sich nach Klingele, Dickert, George u. v. m. [90, 105, 109-112, 182-186] als zentraler Einflussfaktor auf die oben dargestellten Anforderungen an CF-NCF-basierte Preforms dar. Demnach wirkt dieser Binder als Klebstoff innerhalb des Halbzeugs und garantiert dadurch die geforderten Produkteigenschaften des Preforms:

- Lagenhaftung und Steifigkeit (Strukturstabilität und Handlingssteifigkeit),
- Permeabilität und Kompaktierung

Die oben aufgeführten Parameter werden im Folgenden detailliert untersucht.

5.1.1 Einfluss des Bindersystems

Die visuelle Untersuchung des Pulverbinders (Typ: LT 3366, gemäß Abb. A-5) entlang der Prozesskette zeigt abhängig vom Wärmeeintrag in das Textil unterschiedliche Ausprägungen des Epoxids. Vor allem in dessen Form und Lage auf dem Halbzeug sind Unterschiede festzustellen. Abb. 5-1 stellt entsprechende, repräsentative Mikroskopaufnahmen dar.

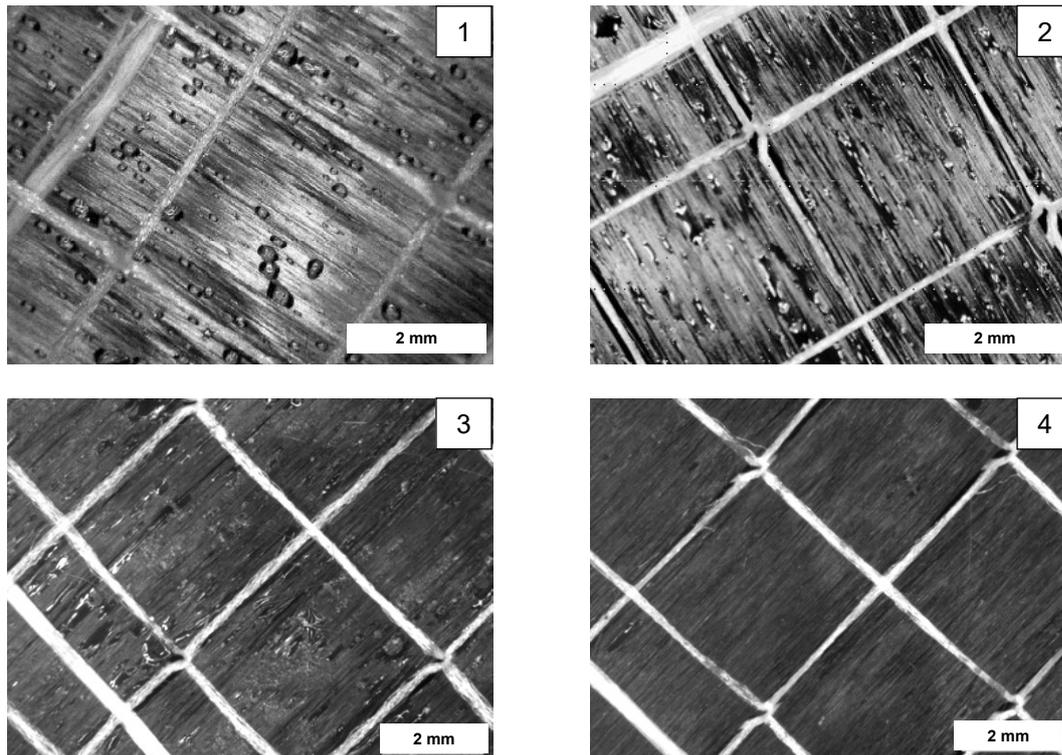


Abb. 5-1: Bindermigration auf einem CF-NCF in Abhängigkeit des Wärmeeintrags.
Geringer und hoher Ansintergrad bei der Gelegeproduktion (1) und (2) und geringe und hohe Wärmezufuhr beim Preformen (3) und (4).

Auf dem CF-NCF liegt das Binderpulver mit steigender Ansintertemperatur und -dauer bei der textilen Flächenbildung in „Kugelform“ oder in elliptischer Form vor, siehe Abb. 5-1 (1) und (2). Weiterhin zeigt die Analyse von bereits umgeformten Einzellagen eines Preforms bei Betrachtung des Lageninterface eine weitere Ausprägung. Nach der Umformung lässt sich, abhängig vom Wärmeeintrag, das Epoxid zwischen den einzelnen CF-Lagen unterschiedlich lokalisieren. Das Pulver sinkt infolge der Wärmezufuhr beim Preformen weiter in das Gelege ein (3) und migriert mit steigender Temperatur vollständig in das Gelege. In diesem Fall ist der Binder oberflächlich mittels Auflichtmikroskopie nicht mehr zu lokalisieren (4).

Entsprechende REM-Aufnahmen visualisieren die Interaktion des Epoxids mit dem CF-NCF repräsentativ, wie in Abb. 5-2 verdeutlicht. Die Bildausschnittsgröße beträgt vom Großen zum Kleinen: 20 mm (1), 5 mm (2), 2 mm (3), 1000 µm (4), 500 µm (5)

und 100 μm (6). Zur Orientierung ist in jedem Bildabschnitt das korrespondierende Skalierungsmaß angegeben (links unten). Die Kapillarwirkung des Rovings und das Einsinken des Pulvers in die Gelegestruktur sind gut erkennbar (Abb. 5-2, (6)).

Auf Grundlage dieser Beobachtungen lässt sich feststellen, dass der Pulverbinder seine Position im Lagenverbund, d. h. auf der Oberfläche des Geleges, zwischen den Einzel-lagen im Stack oder im Faserbündel je nach Wärmezufuhr ändert. Wirkt das Bindersystem als Klebstoff, müssen aufgebrauchte Pulvermenge und Einwirkdauer der Temperaturbeaufschlagung einen direkten Einfluss auf die Stabilität der textilen Struktur und die Lagenhaftung aufweisen.

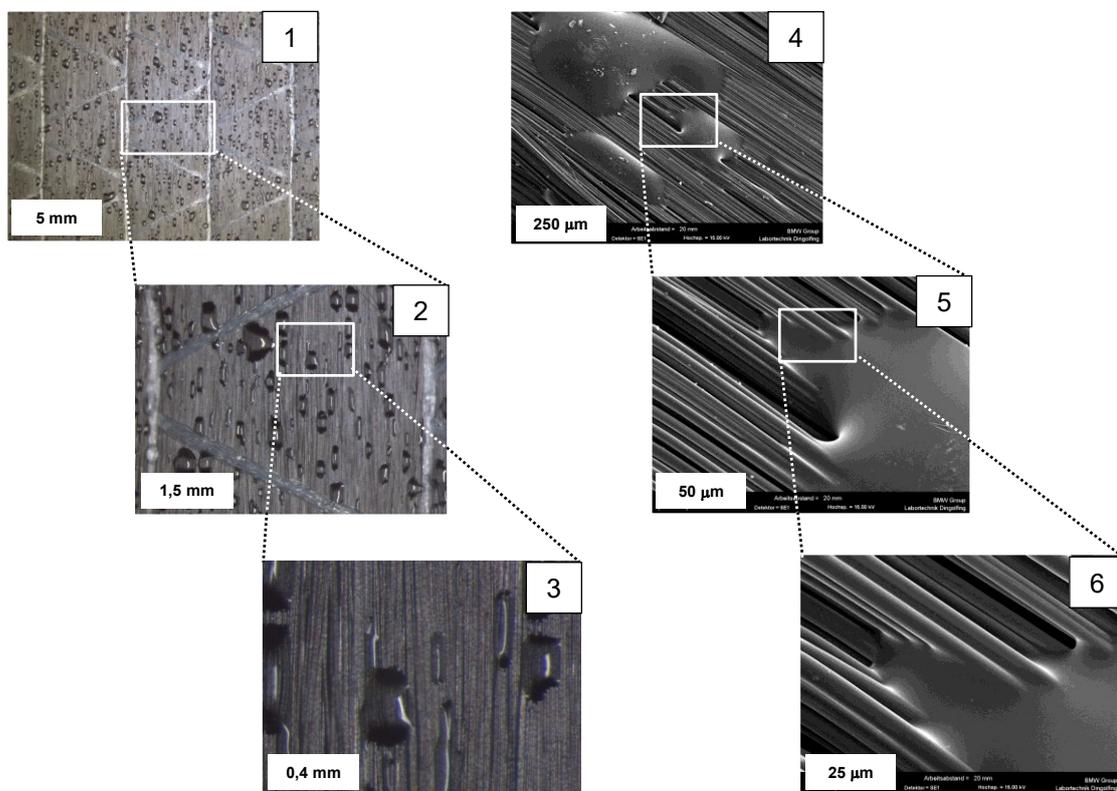


Abb. 5-2: Mikroskop- und REM-Aufnahmen eines CF-NCF (bebindert und angesintert).

Ein Prinzipversuch im Labormaßstab soll diese Thesen bestätigen. Untersucht werden die Durchbiegung (Kehrwert der Steifigkeit) und die Lagenhaftung eines sechslagigen, ebenen Preforms (textile Architektur entsprechend NCF-2.1).

Abb. 5-3 veranschaulicht die verwendeten Versuchsaufbauten. (1) stellt den Aufbau zur Ermittlung der Durchbiegung dar. Dabei wird ein ebener Probekörper mit definierter Einspannlänge mit einer definierten Kraft F_B (hier: 1 N) belastet und dessen Durchbiegung x_B ggü. dem unbelasteten Zustand („gestrichelt“ dargestellt) ermittelt.

Abb. 5-3 (2) veranschaulicht demgegenüber den hier angewandten „Peel-Off“-Versuch. Hierbei wird eine Probe an den jeweiligen Enden fixiert. Die Krafteinleitung erfolgt

über einer weiteren Klemmung an nur einer diskreten Lage des Verbunds (hier mittels einer Universellen Prüfmaschine). Es werden nacheinander Lage für Lage des Probekörpers abgezogen und die dazu notwendige Kraft F_{Peel} aufgezeichnet. Beim sechslagigen Aufbau ergeben sich demnach fünf Abzugsvorgänge (Interface: „a“ bis „e“). Den detaillierten Versuchsaufbau beschreibt Fenske [173].

Beide Vorrichtungen verwenden Probekörper gleicher Geometrie; 50 mm breit und 500 mm lang, gemäß Abb. 5-3 (3).

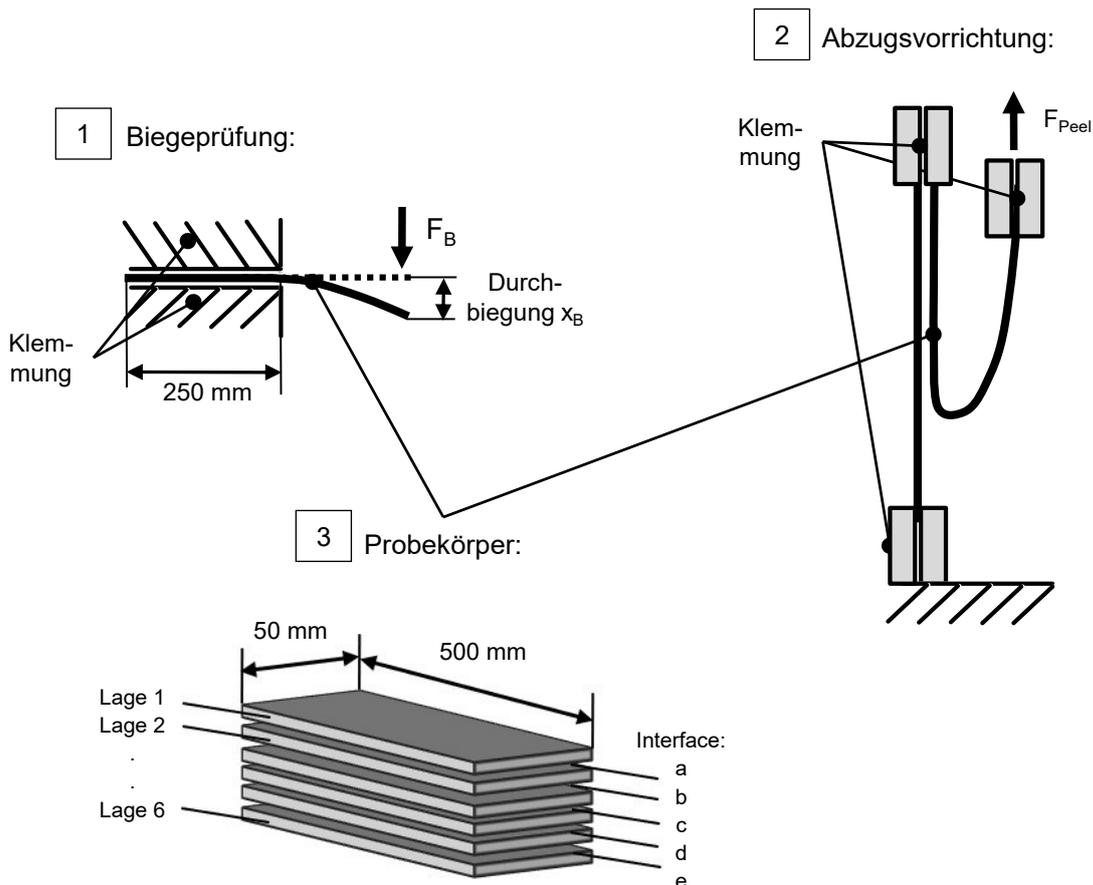


Abb. 5-3: Skizze der Versuchsaufbauten zur Bewertung der Preformsteifigkeit (1) und der Lagenhaftung (2).

Bei der Probenpräparation wird bei der ersten Versuchsreihe die Bindermenge des Geleges von $7,5 \text{ g/m}^2$ über $18,75 \text{ g/m}^2$ bis 30 g/m^2 variiert. Die Heiztemperatur verbleibt hier konstant bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Im Zuge der zweiten Versuchsreihe wird die Heiztemperatur beim Verpressen des Stacks zum eigentlichen Preform von $160 \text{ }^\circ\text{C}$ über $187,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $215 \text{ }^\circ\text{C}$ gesteigert. Demgegenüber beträgt die Bindermenge konstant $12,5 \text{ g/m}^2$. Für beide Versuchsreihen wird die Heizdauer bei konstant 30 s gehalten.

Abb. 5-4 zeigt die gewonnenen Versuchsergebnisse. Aufgrund der bei der Versuchsdurchführung beobachteten Varianz der Abzugsversuche sind die erzielten Ergebnisse bzgl. Lagenhaftung F_{Peel} (Abb. 5-4 (2) und (4)) als qualitative Mittelwerte ohne Standardabweichung angeben. Ursächlich für die festgestellte Streuung sind Randeffekte im

Einspannbereich der Einzellage, welche durch die aufwendige, manuelle Probenpräparation und Versuchsvorbereitung hervorgerufen werden.

Es ist ersichtlich, dass mit steigender Heiztemperatur die Durchbiegung des Halbzeugs abnimmt. Im Umkehrschluss nimmt die Steifigkeit des Textils zu, siehe Abb. 5-4 (1). Demgegenüber verhält sich die Lagenhaftung (2) invers. Diese verringert sich mit steigendem Wärmeeintrag. Darüber hinaus ist bei allen untersuchten Varianten eine zum Kern des Lagenverbunds hin progressive Haftung festzustellen. Bei der Ergebnisbeurteilung des Einflusses der Bindermenge stellt sich bezogen auf die Steifigkeit ein entsprechendes Verhalten ein. Mit zunehmender Bindermenge steigt diese (3) und ebenso nimmt die Anhaftung innerhalb der Einzellagen zu (4).

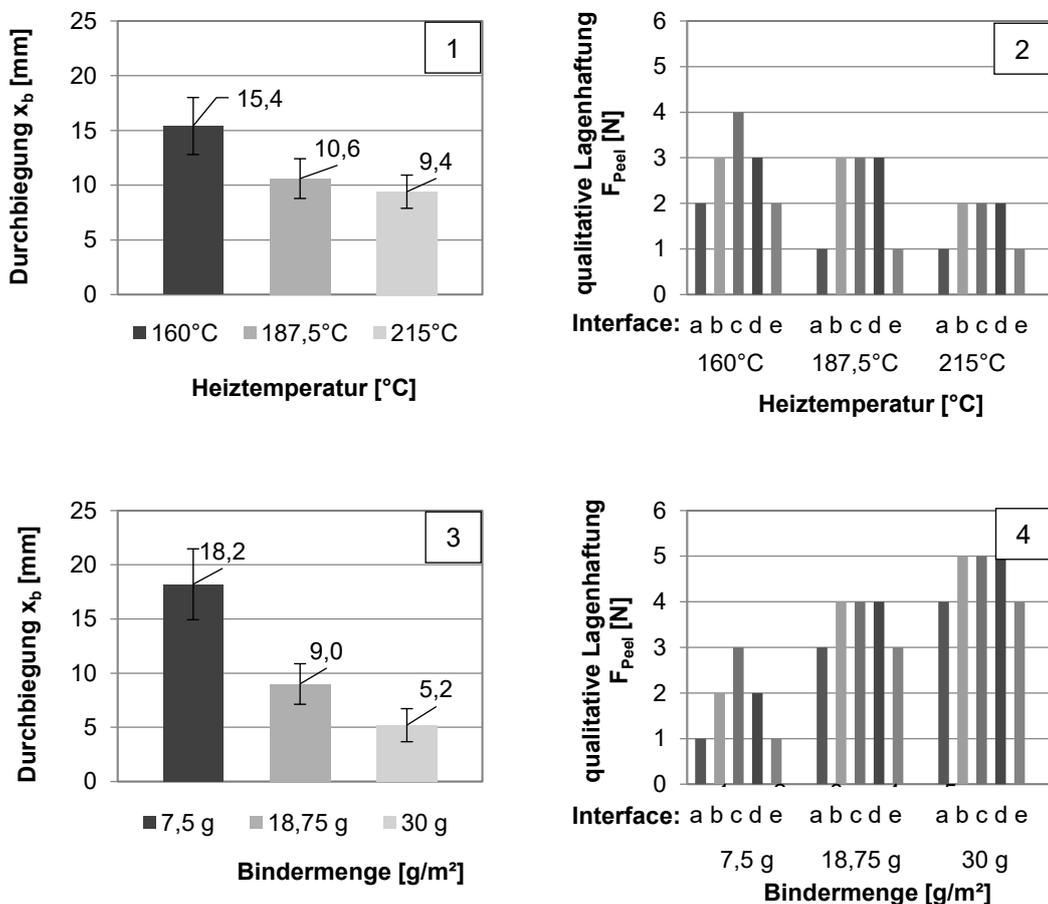


Abb. 5-4: Einfluss von Wärmeeintrag und Bindermenge auf die Durchbiegung (Steifigkeit) und Lagenhaftung eines ebenen Preforms.

Aus diesen Beobachtungen leitet sich folgende modellhafte Beschreibung des Binder- verhaltens ab, siehe Abb. 5-5. Es wird die Migration (von links nach rechts) des Epo- xids in das CF-Gelege entlang der vorliegenden Prozesskette (vom Auftrag auf das CF- NCF bis zum Preforming) schematisch dargestellt:

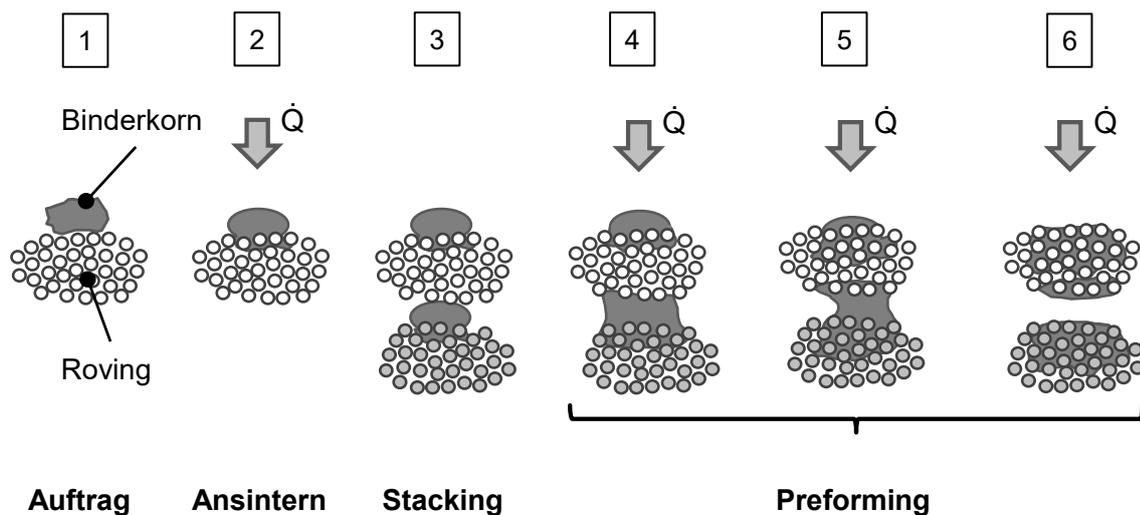


Abb. 5-5: Bindermigration in ein CF-NCF entlang der Prozesskette in Anlehnung an Dickert [109].

Im ersten Prozessschritt wird der Binder bei der Gelegeherstellung auf das Textil aufgestreut, siehe Abb. 5-5 (1). Das Binder Korn liegt lose als gemahlenes Extrudat auf der Gelegeoberseite (linken Wareenseite) oder hier dem einzelnen Roving. Um das Pulver auf dem NCF zu fixieren, durchläuft das Gelege einen Sinterprozess (2). Durch die Temperaturbeaufschlagung erhitzt sich die thermisch leitende C-Faser (CF) und erwärmt das Pulverkorn lokal über den Schmelzpunkt. Durch die Kapillarwirkung des CF-Bündels wird das Epoxid in den Roving gesogen und erkaltet in der festen Phase. Beim anschließenden Stacking (3) werden mehrere Gelegelagen aufeinander gestapelt (hier sind schematisch zwei Rovings dargestellt). Im darauffolgenden Preformprozess wird der Stack im Heizfeld weiter erhitzt. Dieser Prozess kann je nach zugeführtem Energieeintrag in drei Zustände unterschieden werden: Im ersten Fall (4) wird der Pulverbinder bei geringer Wärmezufuhr aufgeschmolzen und von den aufeinanderliegenden C-Faser-Rovings gleichermaßen aufgesogen. Es stellt sich der Zustand maximaler Lagenhaftung ein. Durch weitere Energiezufuhr dringt der Binder weiter in die Rovings ein (5). Durch die Benetzung mit Binder werden diese biegesteif und der Preform wird formstabil. In gleichem Maße muss jedoch die Lagenhaftung abnehmen, da das Epoxid zunehmend aus dem Lageninterface in die CF-Bündel eindringt. Nach weiterer Temperaturbeaufschlagung migriert der Binder gesamthaft in die Rovings (6). Der Zustand maximaler Preformsteifigkeit ist jetzt erreicht; Lagenhaftung ist in diesem Zustand kaum mehr gegeben.

Nach den Analysen auf Laborebene muss die Relevanz der festgestellten Einflussfaktoren Verarbeitungstemperatur und Bindermenge im HD-RTM nachgewiesen werden. Infolge der in Kap. 2.1.5 festgelegten Randbedingungen ist die Auftragsmenge des Epoxids nur in einem schmalen Prozessfenster zu variieren; 10 bzw. 12,5 g/m² ($\pm 20\%$). Für den Bestätigungsversuch werden im vorliegenden Fall 7,5 g/m² und 12,5 g/m² gewählt. Die Pulvermenge wird dabei bereits bei der Gelegeproduktion, d. h. automati-

siert, aufgebracht. Injiziert werden jeweils fünf fünflagige Stacks (5,6,2,6,5), welche auf Basis der textilen Konstruktionen von NCF-5.1, NCF-6.1 und NCF-2.1 aufgebaut werden. Die erzielten Injektionsergebnisse sind in Abb. 5-6 visualisiert. Im gewählten Versuchsfenster ist kein Einfluss im 3D-HD-RTM nachzuweisen. Die ermittelten Druckprofile zeigen keine signifikanten Unterschiede in deren Druckanstieg. Ebenfalls lässt die Bauteilbegutachtung (ohne Abbildung) keine Veränderung im Füllverhalten erkennen.

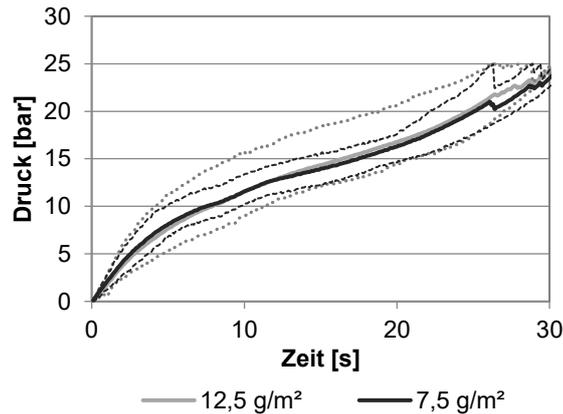


Abb. 5-6: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Preforms mit 7,5 g/m² und 12,5 g/m²-Binder am fünflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Weiterhin ist der zweite identifizierte Einflussfaktor, der Wärmeeintrag in den Lagenaufbau, ein variabler Parameter im Preformprozess. So ist zwar die maximale Heizfeldtemperatur mit 215 °C gemäß den bekannten Randbedingungen (vgl. 2.1.5 Tab. 2-2) begrenzt, dagegen sind Prozesszeiten und Öffnungsspalt von Heizfeld und Preformkavität in gewissen Grenzen veränderlich. D. h. es ist zu untersuchen, ob und falls zutreffend in welcher Intensität diese Prozessparameter einen messbaren Einfluss auf die injektionsrelevanten Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung des Preforms mit sich bringen.

5.1.2 Einfluss der Prozessführung beim Preformen

Um den Einfluss der Prozessführung beim Preformen auf die Imprägniereigenschaften von CF-NCF zu quantifizieren, wird zunächst eine Versuchsreihe auf Laborebene durchgeführt, um diejenigen Haupteinflussparameter zu identifizieren, welche nachfolgend im HD-RTM-Prozess verifiziert werden müssen.

Als Zielgrößen für die Untersuchungen stehen Permeabilität (K_{12} , K_3) und Kompaktierungsspannung (σ_{tar}) beim jeweiligen Zielfaservolumengehalt ($V_{f,tar}$) im Fokus. Demgegenüber definieren die variablen Prozessparameter Heizfeldtemperatur, Heizzeit und Öffnungsspalt im Kontaktheizfeld („Heizfeldspalt“) den Wärmeeintrag in den Gelegekomplex. Somit sind diese Parameter die Stellhebel für den Wärmehaushalt des Halb-

zeugs beim Preformen. Die erzielte Halbzeugdicke nach Erkalten des umgeformten Preforms wird über den Werkzeugspalt (den sog. „Preformspalt“) realisiert. Dabei stellt sich in der Werkzeugkavität ein definierter FVG ein, welcher den vierten Prozessstellhebel bildet.

Die Vielzahl der Parameter macht eine statistische Versuchsplanung notwendig. Im Rahmen der DOE wird ein d-optimaler Versuchsplan in Abhängigkeit von den zuvor beschriebenen Einflussgrößen erstellt. Die Basis für die Untersuchungen bildet ein ebener Stackaufbau (Lagenfolge: 5,6,2,2,2,5,6; textile Konstruktion: NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-6.1).

Als Versuchsumgebung dienen die in Kap. 3.2.1.2 und 3.2.1.3 vorgestellten Aufbauten zur Prüfung der Permeabilität und Kompaktierung. Ein dreistufiger Versuchsplan variiert dabei die o. g. Prozessparameter in festgesetzten Prozessgrenzen, um die Schwankungsbreite der injektionsrelevanten Produkteigenschaften abzubilden. So wird in Anlehnung an die in Kap. 5.1.1 gewonnenen Ergebnisse die Heizfeldtemperatur von 160-215 °C und die Heizdauer von 20-30 s eingestellt. Der Zielfaservolumengehalt ($V_{f,tar}$) definiert dabei die Distanz des Heizfelds mit 47 % \pm 5 % und die der Preformkavität mit 53 % \pm 4 %. Um den Realprozess ideal abzubilden, wird die Kompaktierungsprüfung bei Raumtemperatur ($\sigma_{tar,T\infty}$) und bei 100 °C ($\sigma_{tar,100^\circ C}$) durchgeführt. Dies spiegelt die Temperierung der RTM-Kavität wider, in welcher sich der Preform beim Injektionsprozess befindet. Für diesen Versuchspunkt wird der Versuchsaufbau zur Kompaktierungsprüfung um eine zusätzliche Heizkammer erweitert.

Nach Versuchsdurchführung wird mittels Regressionsrechnung der Einfluss der gewählten Parameter Temperatur, Heizfeldspalt, Zeit und Preformspalt in Abhängigkeit von den Zielgrößen Permeabilität und Kompaktierung errechnet. Für die Permeation ergibt sich mit einem linearen Modell ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,8. Für die Kompaktierungsspannung bei Umgebungstemperatur wird mittels quadratischer Regression eine Modellgüte von ebenfalls 0,8 und bei 100 °C sogar 0,85 erzielt [173].

Abb. 5-7 verdeutlicht die ermittelten Ergebnisse. Die im Rahmen der Untersuchungen festgelegten Ausgangswerte sind „fett“ hervorgehoben:

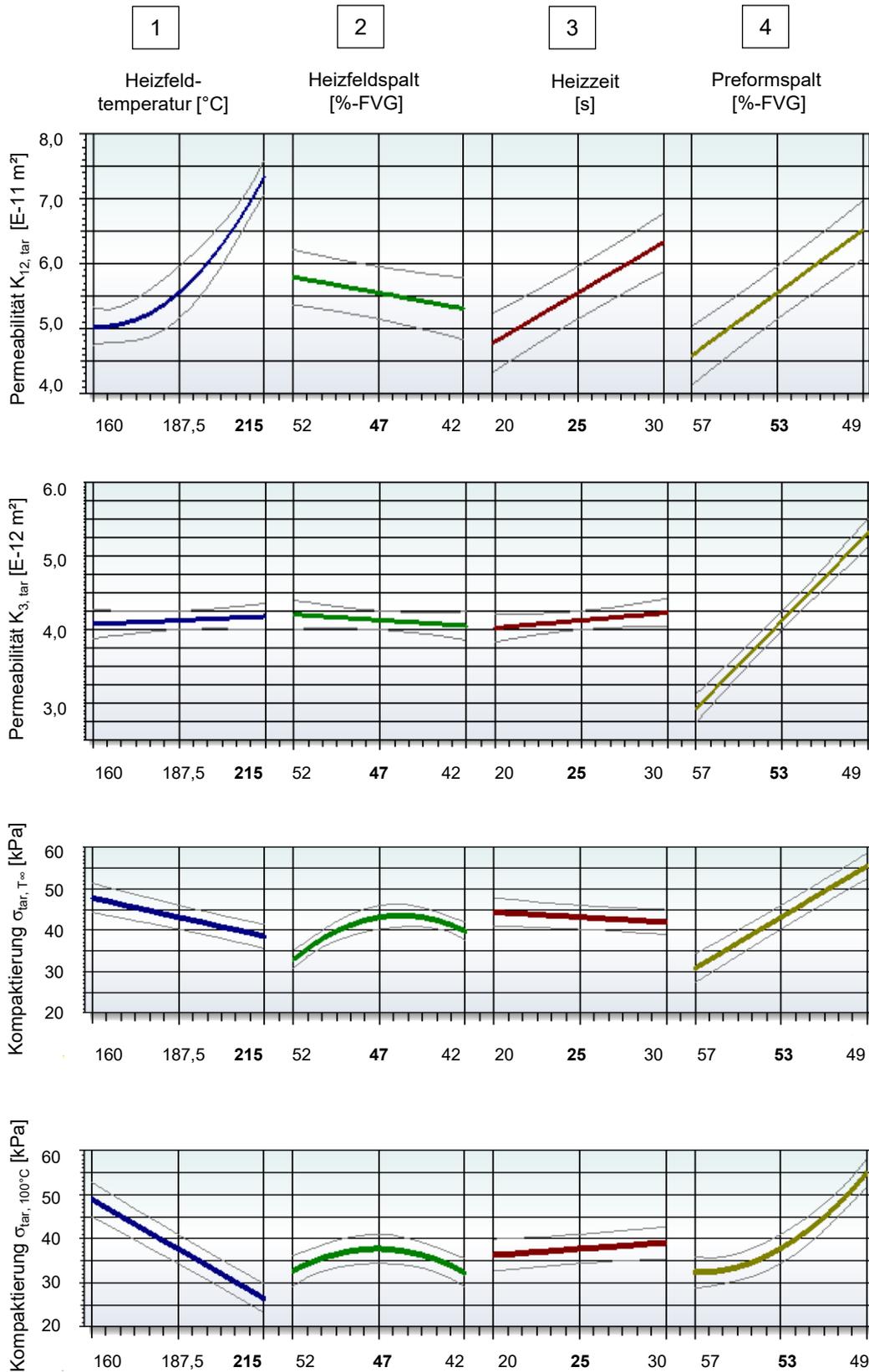


Abb. 5-7: Zielgröße Permeabilität und Kompaktierung abhängig von Preformprozessparametern in Anlehnung an Fenske [173].

Der Einfluss der Kavitätshöhe (4) beim Umformen (der Preformspalt) zeigt deutlich, dass sich sowohl K_{12} und K_3 wie auch σ_{tar} in den festgelegten Grenzen signifikant ändern (ca. $\pm 25\%$). Durch das Fixieren der Gelegestruktur bei einem geringen FVG ($V_{f,tar} = 49\%$), zurückzuführen auf das Erstarren des Binders beim Abkühlen, steigt die Kompaktierungsspannung σ_{tar} bedingt durch das viskoelastische Verhalten des Materials beim Zielfaservolumengehalt. Das höhere σ_{tar} wiederum ist gleichzusetzen mit einer höheren ertragbaren Spannung bei der Injektion. Ebenso verbleiben Fließkanäle unter dem Injektionsdruck „länger“ geöffnet und konsequenterweise muss die Permeabilität K_{12} , wie auch K_3 steigen. Dieser Effekt des „Unterpressens“ ($V_{f,tar} = 49\%$) eines Preforms bleibt auch bei der Prüftemperatur von $T = 100\text{ °C}$ erhalten, siehe $\sigma_{tar,100\text{ °C}}$. Beim sog. „Überpressen“ ($V_{f,tar} = 57\%$) verhalten sich die Produkteigenschaften umgekehrt.

Die Wirkung des zweiten Stellhebels des Heizfeldspalts (2) auf die Zielgrößen ist weniger signifikant. Bei genauer Betrachtung des Vertrauensbereichs der Einzelgraphen bezogen auf die erzielten Kompaktierungsspannungen lässt sich kein Trend ableiten. Hier überlagern sich die Effekte des „Über- /Unterpressens“ und des Wärmeeintrags. „Überpressen“ meint an dieser Stelle, dass mit verringerter Heizfeldkavität ($V_{f,tar} = 52\%$), das Relaxationsverhalten des Stacks analog zum Kompaktierungsmodell zuvor reduziert wird. Das Rücksprungverhalten des Stacks verringert sich. Dies erklärt den Abfall von σ_{tar} mit kleiner werdendem Heizfeldspalt. Die Reduktion der Kompaktierungsspannung mit steigendem Spalt („Unterpressen“, $V_{f,tar} = 42\%$) wiederum muss im Wärmeeintrag begründet liegen. Der Wärmeübergang des Kontaktheizfelds ist durch den geringen FVG und der damit verbundenen geringen Kontaktfläche innerhalb des Faserhalbzeugs weniger deutlich ausgeprägt. Der Pulverbinder verbleibt im Zwischenlagenbereich (entsprechend Abb. 5-1 (3)) und kann nicht in den Einzelroving eindringen und diesen fixieren. Mit derselben Überlegung lässt sich die Reduktion der Permeabilität K_{12} und K_3 , um ca. 10% begründen. Das Binderpulver blockiert die Fließwege im Halbzeug.

Die Variation der Heizzeit (3) zeigt trotz des geringen Einstellbereichs von $\pm 5\text{ s}$ einen signifikanten Einfluss auf K_{12} (\pm ca. 20%) und eine noch messbare Wirkung auf die transversale Permeabilität (\pm ca. 5%). Ein signifikanter Effekt auf das Kompaktierungsverhalten lässt sich hingegen mit der gewählten Heizzeitdifferenz nicht nachweisen.

Deutlich wird der Einfluss des Wärmeeintrags bei der Analyse des letzten Stellhebels, der angelegten Temperatur (1). Es bestätigt sich, dass mit steigender Heizfeldtemperatur ($+55\text{ °C}$) die Permeation in der Ebene zunimmt (ca. $+50\%$). Die Temperaturbeaufschlagung lässt den Binder aus den Fließkanälen ins Faserbündel migrieren. Wird darüber hinaus σ_{tar} in den Analysebereich mit einbezogen, entsteht jedoch ein Zielkonflikt. Mit steigender Temperatur nimmt die Permeabilität auf der einen Seite zu, die Kompaktierung auf der anderen fällt aber in gleichem Maße ab (ca. -50%). Offensichtlich muss ein bestimmtes Maß an Binder im Lageninterface verbleiben, um die Halbzeugstruktur und damit den Kompaktierungswiderstand zu erhalten.

Um den oben genannten Zielkonflikt weiter zu analysieren und die auf Laborebene gewonnenen Ergebnisse zu verifizieren, werden nachfolgend Injektionsversuche auf Serienebene mit folgender Fragestellung durchgeführt: Überwiegt die Wirkung der Permeabilität den Einfluss der Kompaktierung als Faktor bei der Injektionsfähigkeit?

Um diese Frage zu klären, wird im Versuchswerkzeug „Boden“ ein fünfflagiger Aufbau (5,6,2,6,5: NCF-5.1, NCF-6.1 und NCF-2.1) injiziert. Die Stacks werden bei 175 °C und 215 °C Preformtemperatur umgeformt. Heizfeldspalt und Preformspalt bleiben genauso unverändert wie die Heizzeit bei den bereits in Abb. 5-7 festgelegten Einstellwerten („fett“ hervorgehoben). Die charakteristischen Druckverläufe verdeutlicht Abb. 5-8:

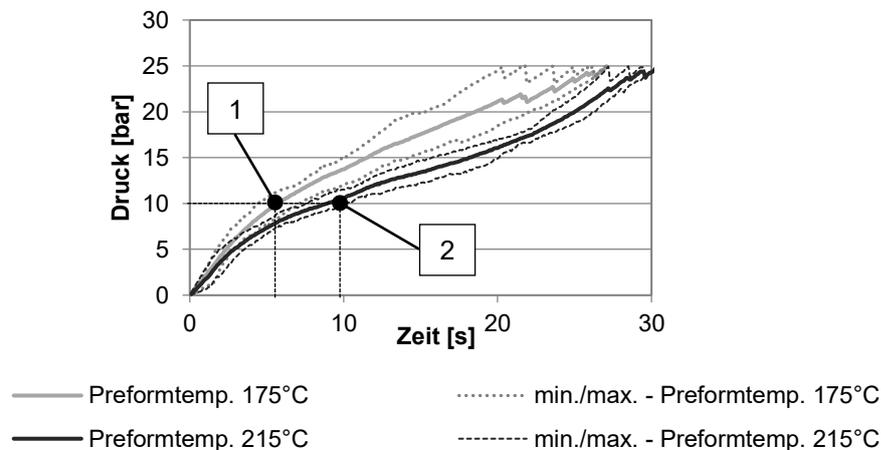


Abb. 5-8: Vergleich des Forminnendruckanstiegs unterschiedlicher Preformtemperaturen am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Der Werkzeuginnendruck der mit 175 °C hergestellten Preformlinge steigt schneller als der Druck der 215 °C-Varianten. Bis zum Erreichen der 10-bar-Grenze stellt sich eine Differenz von 26,6 % injizierter Matrixmenge ein. Die Temperaturzunahme zeigt demnach einen positiven Effekt auf die Bauteilfüllung. In der Folge übersteigt die Permeabilitätszunahme des Preforms den Einfluss der verminderten Kompaktierung.

Das aufgestellte Modell in Abb. 5-7 beschreibt mit dem Preformspalt (4) einen Parameter, der gleichermaßen Permeation und Kompaktierung beeinflussen kann. Eine geringere Verdichtung des Stacks in z-Richtung beim Umformen steigert demnach dessen Kompaktierungsspannung und in der Folge die Permeabilität. Dies bestätigt die Eingangsthese, wonach der Pulverbinder den Gelegekomplex bei einem definierten FVG „einfriert“. Zur Verifikation im HD-Bereich werden entsprechende fünfflagige Aufbauten (5,6,2,6,5; NCF-5.1, NCF-6.1 und NCF-2.1) dargestellt. Die Preformprozessparameter Heizzeit (25 s), Heizfeldspalt ($V_{f,tar} = 47\%$) und Temperatur (215 °C) werden konstant gehalten. Der Preformspalt wird mit einer Zugabe von 10 % Kavitätshöhe zur nominellen Sollwanddicke der späteren RTM-Komponente realisiert ($V_{f,tar} = 49\%$).

Vor der Injektion werden die auf diese Weise hergestellten Preforms auf ihre Permeabilität in transversaler Richtung hin geprüft. Die sich einstellenden Einzelwerte in Abhängigkeit der Probenentnahmeposition sind im Anhang in Abb. A-22 zusammengestellt. Grundsätzlich lässt sich eine mittlere Zunahme der Permeabilität K_3 von $1,09E-12 \text{ m}^2$ auf $1,55E-12 \text{ m}^2$ festhalten (Steigerung um ca. 50%). Dies bestätigt die Vorhersage der Regressionsrechnung: Die Erhöhung des Umformspalts steigert die gemessenen Werte.

Daran anknüpfend unterstreicht die anschließende 3D-HD-Injektion die Ergebnisse auf Laborebene:

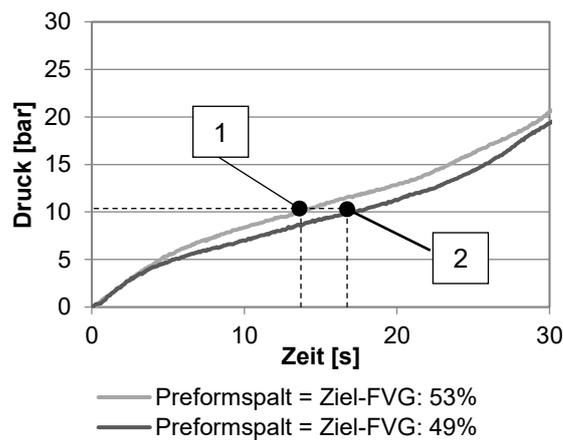


Abb. 5-9: Vergleich des Forminnendruckanstiegs in Abhängigkeit des Preformspalts am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM (Injektionsdruckbegrenzung bei 25 bar).

Der gewählte Preformspalt entspricht hier der Sollwanddicke (Ziel-FVG: 53 %) und Sollwanddicke +10 % (Ziel-FVG: 49 %).

In obiger Abb. 5-9 sind die gemittelten Druckverläufe aufgetragen. Die Auswertung der HD-Versuche bestätigt die Schlussfolgerungen der Laboruntersuchungen. Die „unterpressten“ Preforms (2), Sollwanddicke + 10 %, $V_{f,tar} = 49 \%$, erreichen das 10bar-Druckniveau zu einem späteren Zeitpunkt als die bei $V_{f,tar} = 53 \%$ verpressten Preforms (1). Die gemessene Differenz stellt eine mittlere Zunahme der injizierten Harzmenge im Betrachtungspunkt von 92,5 g dar. Folglich variiert dieser Prozessparameter das RTM-Prozessfenster um 27,4 %.

Die diskutierten Effekte lassen sich auch im imprägnierten Laminat nachweisen. Abb. 5-10 zeigt repräsentative Schlibfbilder zweier unterschiedlicher dreilagiger Lamine (NCF-9.6) gleicher Faservolumengehälter untersucht mittels Lichtmikroskopie. Links ist ein „überpresster“ Fall (1) (Umformspalt: $V_{f,tar} = 57 \%$), rechts der „unterpresste“ Fall (2) (Umformspalt: $V_{f,tar} = 47 \%$) abgebildet:

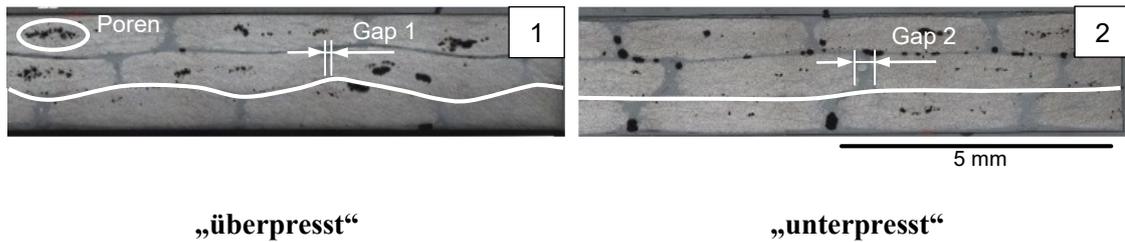


Abb. 5-10: Vergleich des Prinzips des „Über“- und „Unterpressens“ anhand von Schlifffbildern eines dreilagigen Laminats (NCF-9.6).

Bei der „überpressten“ Variante (1) ist ersichtlich, dass die Einzelrovings ineinanderzugleiten beginnen. Diese wirken „dünner“, aber breiter als jene des „unterpressten“ Laminats (2). D. h. in der Folge sind sie höher verdichtet. Auch der Effekt der sich schließenden Fließkanäle unter Druck ist deutlich. In Abb. 5-10 (2) erscheinen die Fließkanäle breiter und sichtbar geöffnet (Gap (2) > Gap (1)). Dies erklärt die höhere Permeabilität im „unterpressten“ Fall (2). Die verringerte Permeabilität im „überpressten“ Fall (1) wird weiterhin durch die Poren im verdichteten Roving, Abb. 5-10 (1) unterstrichen.

Aus den Untersuchungen lässt sich folgern, dass eine Erhöhung des Preformspalts (von $V_{f,tar} = 53\%$ auf 49%) sowohl die makroskopische Füllung (Indikator ist der Formindendruckanstieg) als auch die mikroskopische Füllung der Komponenten in Bezug auf die Laminatqualität verbessert. Demgegenüber ist eine weitere Verbesserung der Imprägnierung durch die Variation der Heiztemperatur nicht möglich. Die gegebenen Randbedingungen begrenzen diese bei 215 °C (vgl. Kap. 2.1.5).

5.2 Spaltinjektion im RTM-Prozess

Die in Kap. 2.1.5 festgelegten Vorgaben beschreiben mit der sog. Spaltinjektion einen variablen Prozessparameter im HD-RTM-Verfahren. Prinzipversuche auf Technikumsebene sollen den Effekt der Faservolumengehaltsvariation während des Imprägniervorgangs verdeutlichen.

Als Versuchsmaterialien dienen sechslagige Aufbauten (5,6,2,2,6,5) auf Basis der Gelege NCF-5.2, NCF-6.2 und NCF-2.4. Der Ersatzversuch wird mit einem langsam härtendem Harzsystem, Epikote™ Resin 06000 (Datenblatt siehe Anhang Abb. A-6) und Drucktopf durchgeführt. Die Injektion ist damit druckgesteuert im Niederdruckbereich ($p_{inj,max} = \text{const} = 5\text{ bar}$).

Um den Injektionsspalt exakt kontrollieren zu können, wird ein Versuchswerkzeug angefertigt, welches auf einer universellen Prüfmaschine (UPM) montiert wird. Die als Presse eingesetzte UPM (Fa. Zwick GmbH & Ko KG, Ulm) verfügt über eine Arbeitsbreite von 1000 mm und 250 kN Presskraft. Die frei programmierbaren „Pressen“-Profile dieser Maschinenkombination (vgl. Abb. 5-11) ermöglichen über das Verfahren der Traverse eine exakte Kontrolle der Kavitätshöhe im Zehntelmillimeterbereich.

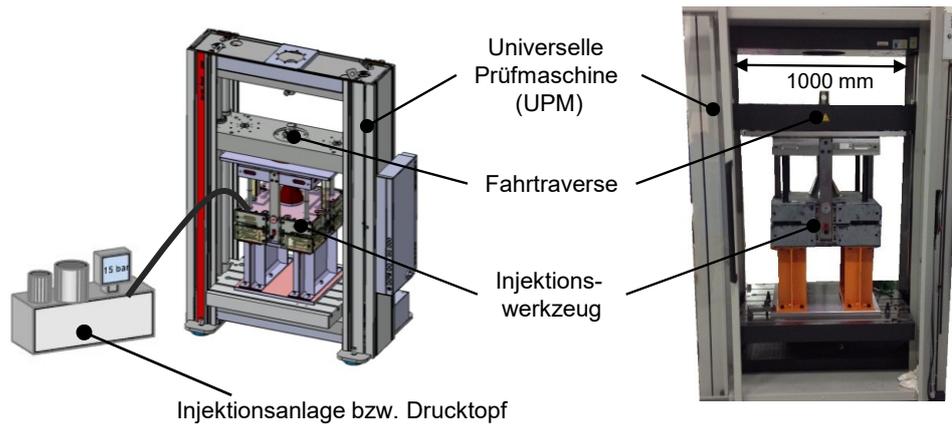


Abb. 5-11: Versuchsaufbau RTM-Spaltinjektion.

Die gewählte Werkzeugkavität (die sog. „Schikane“) ist in Abb. 5-12 (1) und das eingesetzte Halbzeug in Abb. 5-12 (2) dargestellt. Der Anguss erfolgt mittig als sog. Punktanguss.

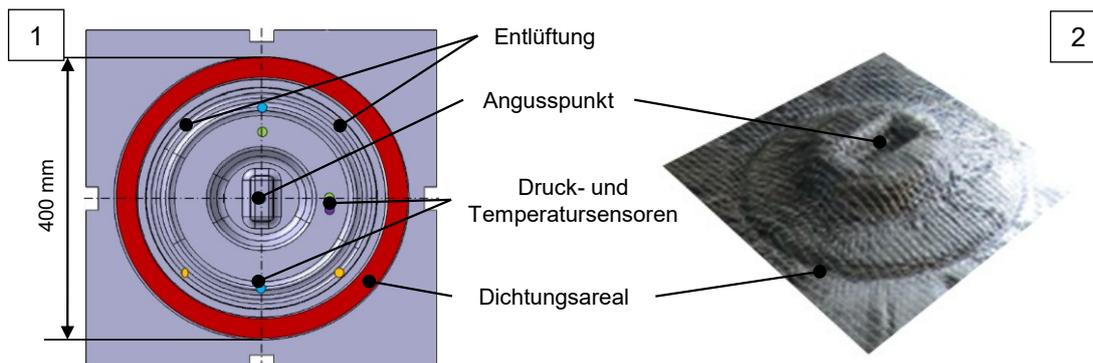


Abb. 5-12: Versuchswerkzeug „Schikane“: Aufsicht Werkzeugkavität (1) und Ansicht Preform (2).

Ausgehend vom zu erreichenden Bruttozielfaservolumengehalt ($V_{f,tar,brutto}$) von 53 % ergibt sich mit der Bruttoeinwaage (inklusive der Fremdmaterialanteile) der verwendeten Textilien von 1998 g/m² eine Kavitätshöhe t von 2,11 mm. In Anlehnung an die Untersuchungen hinsichtlich Preformspalt im Kap. 5.1.2 wird der sog. Spaltindex vierstufig bis zu einem FVF von 49 % erhöht. Entsprechend Formel (5-1)

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{V_{f,2}}{V_{f,1}} \quad (5-1)$$

mit: $t_i, V_{f,i}$ Kavitätshöhe und korrespondierender Faservolumengehalt

folgen die Zieldicken und die korrespondierenden Faservolumengehälter gemäß Tab. 5-1:

Tab. 5-1: Parameter der Injektionsspaltvariation.

Kavitätshöhe und FVG	Index 1	Index 2	Index 3	Index 4
t_i [mm]	2,11	2,16	2,21	2,28
$V_{f,i}$ [%]	52,9	51,7	50,5	49,0

Für den Spaltindex 1 ist der Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ identisch mit dem FVG bei der Injektion $V_{f,1}$. D. h. in diesem Fall wird ohne Spalt injiziert. Der Versuchsablauf selbst gliedert sich in folgende Schritte:

- Werkzeugschließen auf Spaltindex t_i
- Injektion und Schließen bis Zielfaservolumengehalt $V_{f,tar}$ bzw. $V_{f,1}$
- Aushärten und Entformen

Nach Versuchsdurchführung können die erzielten Bauteilgüten je Versuchspunkt bewertet werden. Abb. 5-13 stellt repräsentative Komponenten je Versuchspunkt (1-4, Spaltindex t_1 bis t_4) dar.

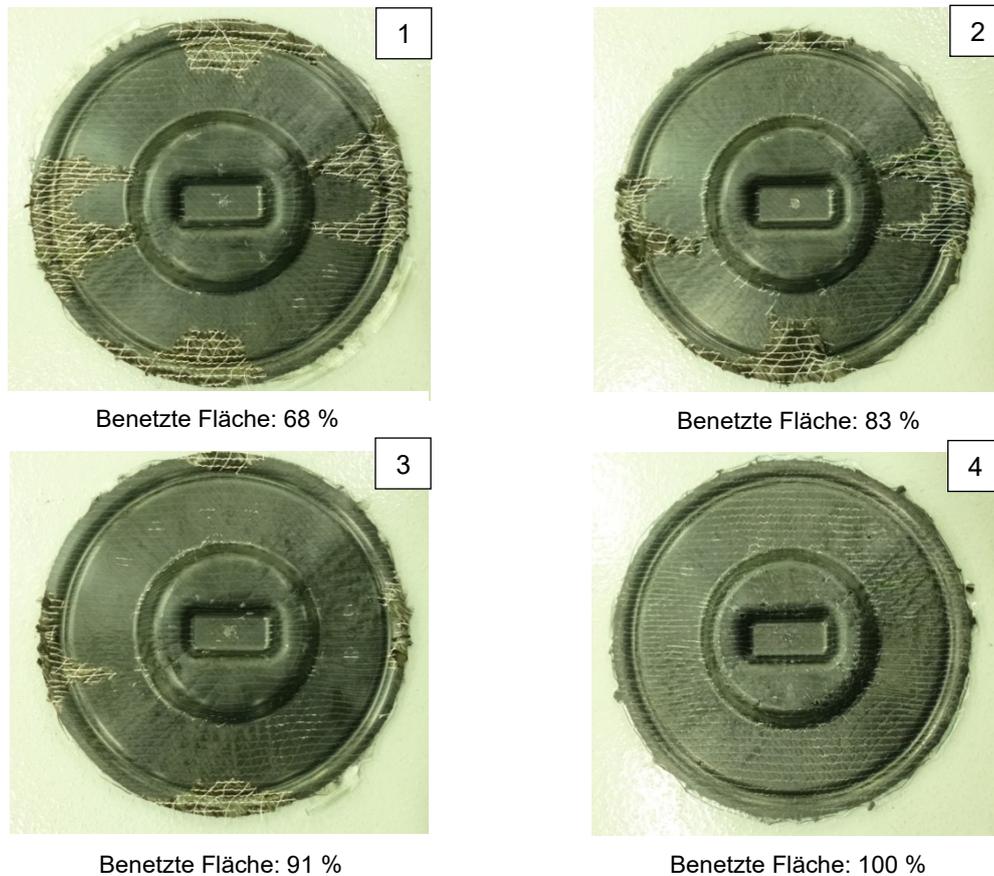


Abb. 5-13: Füllstudien am Versuchswerkzeug „Schikane“ (Niederdruckinjektion) mit Variation des Injektionsspalt.

$t_1 = 2,11$ mm (1), $t_2 = 2,16$ mm (2), $t_3 = 2,21$ mm (3) und $t_4 = 2,28$ mm (4).

Es ist deutlich sichtbar, dass sich die Spaltinjektion positiv auf die Komponentenfüllung auswirkt. Das injizierte Harzvolumen steigt mit zunehmendem Spaltindex von t_1 bis t_4 . Dies wird durch die Zunahme der benetzten Oberfläche der jeweiligen Komponente visualisiert.

Diese Feststellung liegt in der Tatsache begründet, dass durch die Injektion bei geringem Faservolumengehalt ($V_{f,tar} = 49\%$) die Permeabilität des zu injizierenden Halbzeugs entsprechend höher ist als bei der angestrebten Zieldicke des Laminats (hier: 1,8 mm). Ein quantitativ höherer Füllgrad kann erreicht werden, sofern die Kavität erst nach Abschluss der Injektion auf den Zielfaservolumengehalt ($V_{f,tar} = 53\%$) geschlossen wird [20, 25, 58].

5.3 Fazit: Prozessführung Preform und RTM

Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich ableiten, dass spezifische Prozessparameter im Preformprozess sowie im RTM-Prozess, auch in Anbetracht der festgelegten Vorgaben (vgl. Kap. 2.1.5), das Imprägnierverhalten von CF-NCF-Preforms maßgeblich beeinflussen.

Beim Preformen ist der zentrale Stellhebel der eingesetzte Pulverbinder. Dieser wirkt als Klebstoff in den Gelegezwischenlagen oder in den einzelnen Rovings der umgeformten Halbzeuge. Menge und Position des Epoxids nehmen Einfluss auf die Lagenhaftung, Preformsteifigkeit, Permeabilität und Kompaktierung der Preforms. Generell gilt:

- Eine Erhöhung der eingesetzten Bindermenge ($7,5 \text{ g/m}^2 \rightarrow 30 \text{ g/m}^2$) steigert die Preformsteifigkeit (+ 285 %) und die Lagenhaftung (+ 66 %). (mindert jedoch im gleichen Maße die transversale Permeabilität).
- Durch die Steigerung des Wärmeeintrags ($160 \text{ °C} \rightarrow 215 \text{ °C}$) erhöhen sich die Durchlässigkeit und Steifigkeit des Halbzeugs (+ 61 %); in gleichem Maße nimmt jedoch die Lagenhaftung (- 100 %) ab.

Im Preformprozess kann durch die Prozessparameter Heizzeit, Heiztemperatur, Heizfeldspalt oder durch die Kavitätshöhe beim Umformen (Preformspalt) der Wärmeeintrag in das textile Halbzeug und damit die Position des Pulverbinders im Preform gezielt gesteuert werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, sowohl das Kompaktierungsverhalten wie auch die Permeabilität der Halbzeuge bewusst einzustellen.

- Die Parameter Heizzeit, Temperatur und Heizspalt beeinflussen die Permeabilität und Kompaktierung der Halbzeuge gleichermaßen, jedoch umgekehrt proportional, siehe Abb. 5-7.
- Der sog. Preformspalt zeigt mit dem Mechanismus des sog. Über- oder Unterpessens einen Parameter, der bei einer Erhöhung sowohl Kompaktierung als auch Permeabilität steigern kann. Dieser Effekt reduziert den Forminnendruck-

anstieg im HD-RTM messbar um 27,4 % (bzgl. der injizierten Harzmenge bei 10 bar Forminnendruck).

Die sog. Spalt-Injektion stellt sich nach den durchgeführten Analysen als entscheidender Faktor bei der Prozessführung im RTM-Verfahren dar, mit welchem die Füllung der umgeformten Halbzeuge mit der Matrix verbessert werden kann. Durch die Injektion des Preforms bei einem definierten Spalt der Werkzeugkavität, welcher größer ist als die angestrebte Zielbauteildicke, reduziert sich der FVG im Formnest. Demgemäß erhöht sich die Durchlässigkeit des Halbzeugs ggü. der Matrix. Eine deutlich ausgeprägte Füllung der Komponente ist die Folge: Die Injektionspaltzugabe von 8 %²⁸ führt zur Steigerung der benetzten Bauteilfläche von 68 % auf 100 %.

Wird das Gesetz von Darcy (2-8) in die Überlegung mit einbezogen, muss sich die Verbesserung der Formfüllung durch eine Reduktion des Druckniveaus im HD-RTM-Prozess quantifizieren lassen. Dies ist im folgenden Kap. 6 zu verifizieren.

²⁸ Die Angabe bezieht sich auf den Spaltindex. Bezogen auf den Faservolumengehalt ergeben sich 3,9 Prozentpunkte.

6 Kombinatorik der Einzeleffekte und Validierung im HD-RTM

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen kombiniert und gesamthaft im 3D-HD-RTM validiert. Dabei wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Zunächst werden die textilen Einzeleffekte (vgl. Kap. 4) zusammengeführt und untersucht. Darauf aufbauend erfolgt in einem zweiten Schritt dann die Bestätigung der gesamthaften Wirksamkeit der identifizierten Prozessstellhebel (vgl. Kap. 5).

Tab. 6-1 stellt die variierten Stellgrößen der Kombinatorik gegenüber. Gemäß dem oben erläuterten Vorgehen gliedert sich die Optimierung in „Modifikation I: Textil“ und „Modifikation II: Textil und Prozess“:

Tab. 6-1: Übersicht der variierten Stellgrößen von CF-NCF bzgl. Produkt und Prozess.

Stellhebel	Ausgangsbasis	Modifikation	
		I: Textil	II: Textil + Prozess
<ul style="list-style-type: none"> • Textil (0°- und 45°-Gelege): <ul style="list-style-type: none"> ○ Fadenspannung / Fließkanalbreite (0°- und ±45°-Gelege) beliebig maximal maximal ○ Bindungsart (0°-Gelege) Franse-Teilschuss Trikot Trikot ○ Stichanzahl/-breite (±45°-Gelege) E 3,5 E 5 E 5 • Prozessebene (Preform und RTM): <ul style="list-style-type: none"> ○ Preformspalt - - ✓ ○ RTM-Spalt - - ✓ 			

Um die Wirksamkeit der Modifikation I (Textil) nachzuweisen, werden zwei unterschiedliche fünfplagige Aufbauten (5,6,2,6,5) generiert, bestehend aus den Ausgangsmaterialien (NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-6.1) auf der einen Seite und den hinsichtlich Permeabilität optimierten Materialien auf der anderen Seite: Aufsetzend auf den Erkenntnissen aus Kap. 4.1 wird für das 0°-Gelege eine Trikotbindung (NCF-2.4) und für die ±45°-Textilien die Teilung E5 (NCF-5.2 und NCF-6.2) gewählt. Alle Gelege werden mit größtmöglicher Fließkanalbreite hergestellt, um den in Kap. 4.1.1 herausgearbeiteten Effekten Rechnung zu tragen.

Die Herstellung des Preforms erfolgt bei 215 °C Heizfeldtemperatur, dem in Kap. 5.1.1 definierten Optimum. Ebenso verbleiben Preformspalt und der Spaltindex t_i bei der Injektion konstant bei $V_{f,tar} = 53 \%$ (hier 1,76 mm), um die materialinduzierten Einflussfaktoren unabhängig von den prozessualen Parametern zu betrachten.

Im Anschluss erfolgt die Injektion der Preforms im Bodenelement. Abb. 6-1 fasst die aufgezeichneten Innendruckverläufe der Ausgangsbasis und der Modifikation I (Textil) inklusive deren Streuweite zusammen:

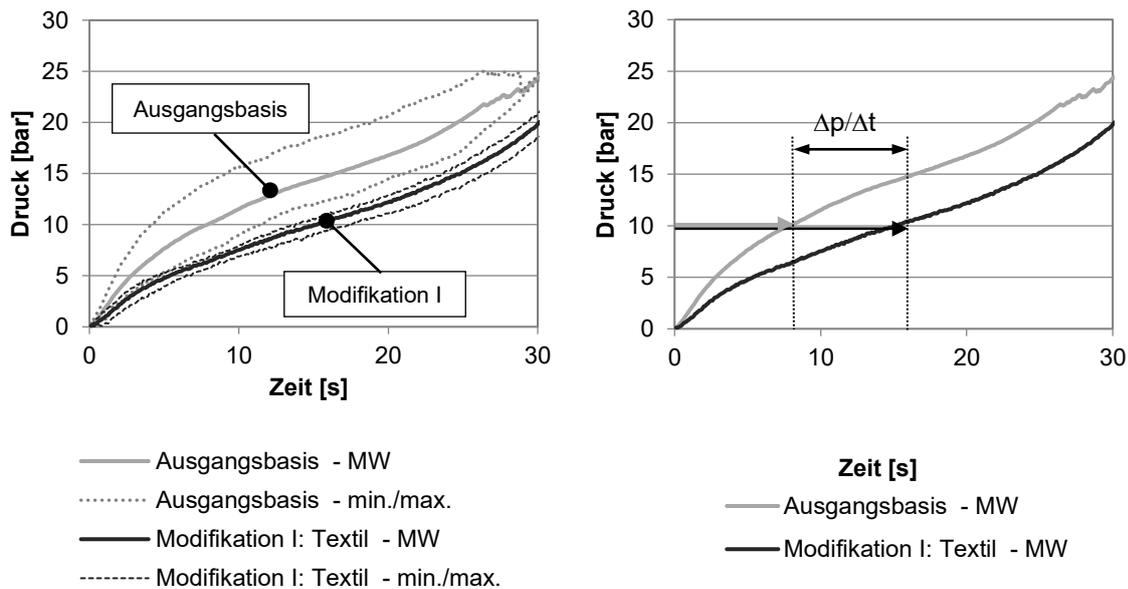
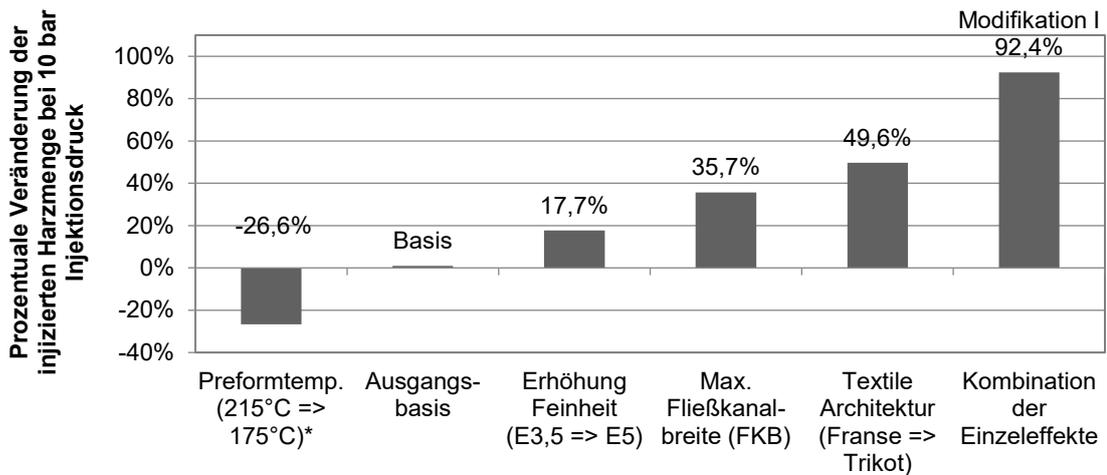


Abb. 6-1: Vergleich des Forminnendruckanstiegs der Ausgangsbasis und der Modifikation I (Textil) am fünflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM.

Der sich einstellende Unterschied ist signifikant. Sowohl Druckanstieg als auch Streubreite der optimierten Materialvarianten (Modifikation I) bewegen sich durchwegs auf einem geringeren Niveau (Basis sind dabei 20 Versuchsteile) als diejenigen der Ausgangsmaterialien. Um die Wirksamkeit in Zahlen zu fassen, wird die notwendige Zeit zum Erreichen des Forminnendruckes von 10 bar verglichen (siehe Abb. 6-1, rechts). Die Basisvariante überschreitet 10 bar im Mittel bereits nach 7,9 s, die Kombinatorik erst nach 15,2 s. Wird das konstante Austragsvolumen von 25 g/s zugrunde gelegt, lässt sich das injizierte Harzvolumen beziffern: 197,5 g beim Ausgangsmaterial und 380 g bei der optimierten Variante bei einem Forminnendruck von 10 bar. Dies entspricht einer Verbesserung von 92,4 %.

Abb. 6-2 generiert eine Übersicht der in dieser Arbeit untersuchten Parameter. Auf Basis des sich einstellenden Kavitätinnendrucks bezogen auf das Harzaustragsvolumen können die Einzeleffekte quantifiziert und gewichtet dargestellt werden. Nachfolgend sind die Einzeleffekte der Modifikation I: Textil gegenübergestellt:



* Die Preformtemperatur nimmt direkten Einfluss auf den Pulverbinder und wird daher zu den materialeseitigen Parametern gezählt.

Abb. 6-2: Gewichtung der Einzeleffekte (Modifikation I: Textil).

Prozentuale Veränderung der injizierten Harzmenge bei 10 bar Injektionsdruck in Abhängigkeit der untersuchten Varianten.

Dadurch, dass die Reduktion der „Preformtemperatur“ (eigentl. Heizfeldtemperatur beim Preformen) von 215 °C auf 175 °C direkten Einfluss auf den Pulverbinder nimmt, wird diese in obiger Abbildung zu den materialeseitigen Parametern gezählt. Infolge des negativen Effekts bezogen auf die Imprägnierung der Preforms, findet dieser Faktor keine Anwendung in der Modifikation I.

Analog zu den zuvor aufgezeigten Materialeffekten lassen sich ebenfalls die in Kap. 5 gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich „Preformspalt“ und RTM-Spalt“ zu „Modifikation II: Textil und Prozess“ kombinieren. Beide Parameter beeinflussen die Permeabilität und müssen demnach den Forminnendruckanstieg bei der Injektion, der mit den modifizierten Textilien hergestellten Preforms weiter absenken. Um die Erwartungshaltung auch im HD-RTM zu bestätigen, werden entsprechende fünfplagige Preforms (5,6,2,6,5: NCF-5.2, NCF-6.2 und NCF-2.4) präpariert und im 3D-HD-RTM-Prozess (Bodenelement) injiziert. Der Versuchsraum untergliedert sich wie in Abb. 6-3 veranschaulicht.

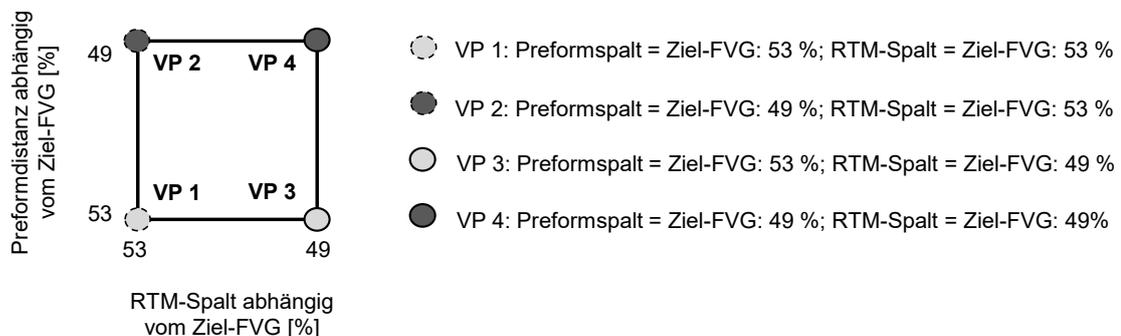
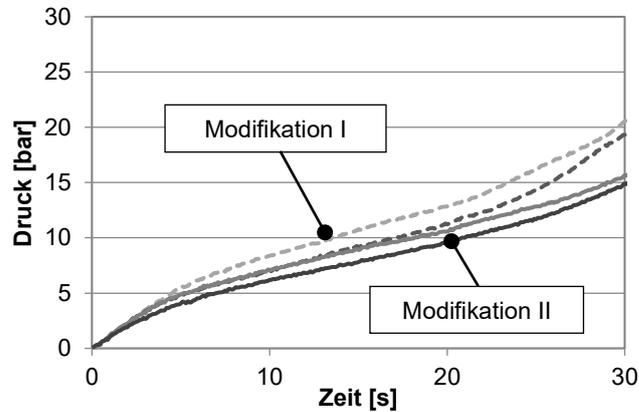


Abb. 6-3: Versuchsraum der Prozessparameter Preformspalt und RTM-Spalt.

Dieser stellt eine Erweiterung der Versuche hinsichtlich „Preformspalt“ (VP 1 und VP 2) aus dem vorangegangenen Kap. 5.1.2 Abb. 5-9 dar. Es werden zwei Versuchspunkte ergänzt: Injektion „mit“ und „ohne“ Spaltindex (VP 3 und VP 4). Abb. 6-4 visualisiert die aufgenommen Innendruckprofile.



- VP 1: Preformspalt = Ziel-FVG: 53%; RTM-Spalt = Ziel-FVG: 53%
- VP 2: Preformspalt = Ziel-FVG: 49%; RTM-Spalt = Ziel-FVG: 53%
- VP 3: Preformspalt = Ziel-FVG: 53%; RTM-Spalt = Ziel-FVG: 49%
- VP 4: Preformspalt = Ziel-FVG: 49%; RTM-Spalt = Ziel-FVG: 49%

Abb. 6-4: Vergleich des Forminnendruckanstiegs von Modifikation I (Textil) und Modifikation II (Textil und Prozess) am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im 3D-HD-RTM. Erzielte Druckverläufe der Parametervariation „Preformspalt“ und „RTM-Spalt“.

Die Spaltinjektion senkt das Druckniveau während der HD-Injektion. Der Kavitätssinnendruck von 10 bar wird im VP 1 (Modifikation I: ohne Preformspalt und ohne RTM-Spalt) nach 13,5 s erreicht. Die Zugabe des RTM-Spalts (VP 3) verzögert das Erreichen des 10 bar-Druckniveaus (18,2 s). Dies entspricht einer Erhöhung der injizierten Menge von 34,8 %. In Kombination mit der in Kap. 5.1.2 untersuchten Variante „Preformspalt“ VP 4 (Modifikation II: mit Preformspalt und mit RTM-Spalt) stellt sich sogar eine Verbesserung von 54,8 % ein (der Kavitätssinnendruck von 10 bar wird erst nach 20,9 s erreicht). Abb. 6-5 veranschaulicht diese Zusammenhänge (Modifikation II: Textil und Prozess) quantitativ:

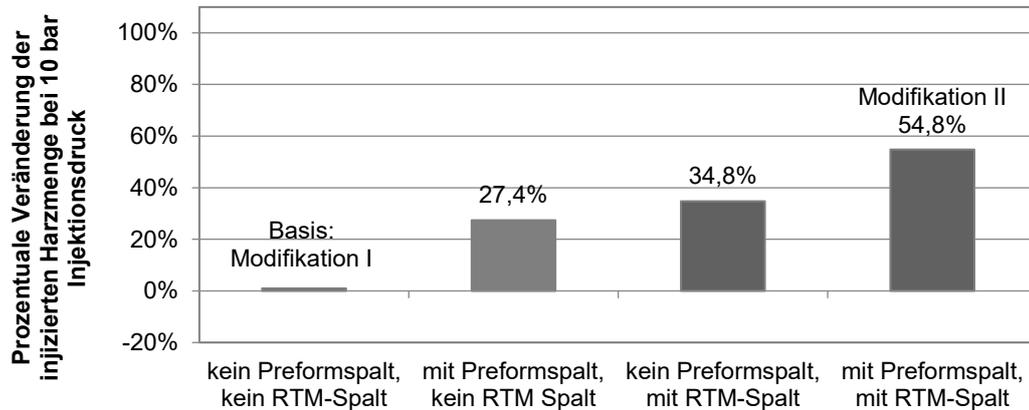


Abb. 6-5: Gewichtung der Einzeleffekte (Modifikation II: Textil und Prozess).
 Prozentuale Veränderung der injizierten Harzmenge bei 10 bar Injektionsdruck in Abhängigkeit der untersuchten Varianten.

Abschließend können die Forminnendruckanstiege der Ausgangsbasis, der Modifikation I (Textil) und der Modifikation II (Textil und Prozess) gegenübergestellt werden. Die sukzessive Reduktion des Druckniveaus in der Kavität ist deutlich sichtbar, siehe Abb. 6-6:

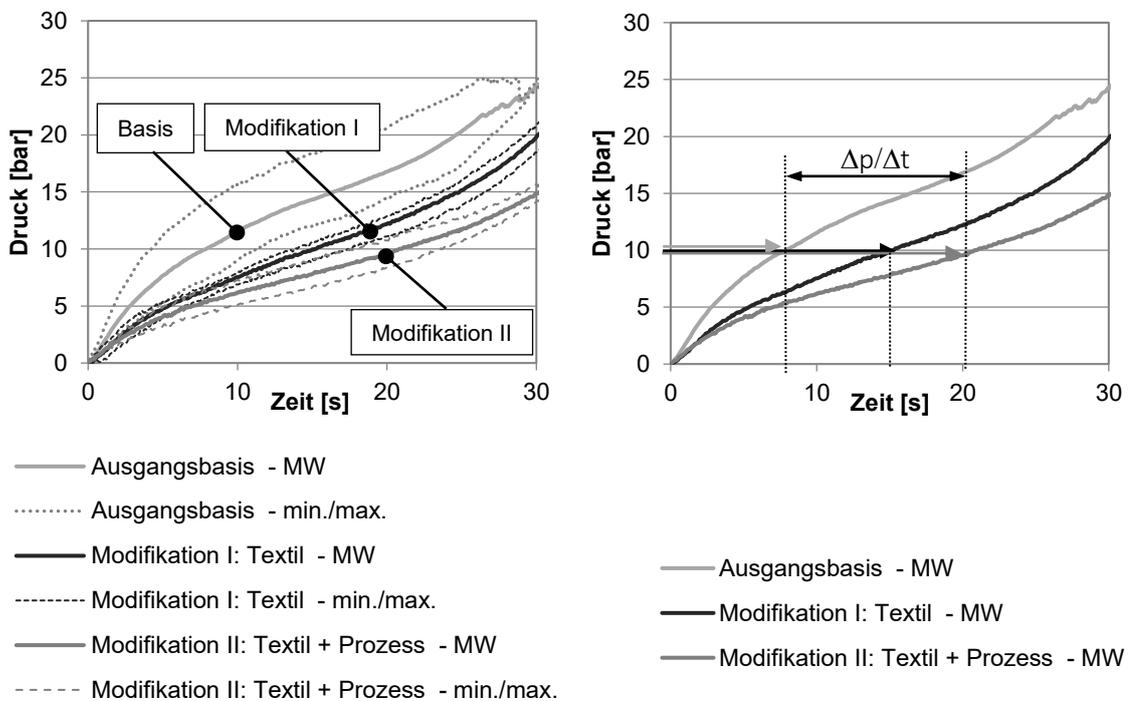


Abb. 6-6: Vergleich des Druckniveaus: Ausgangsbasis und Modifikation I und II.

Die Betrachtung der Bauteilfüllung mit der Matrix verdeutlicht die erzielte Verbesserung. Die Versuchsteile der Ausgangsmaterialien (NCF-2.1, NCF-5.1 und NCF-6.1) zeigen unterschiedliche Auffälligkeiten: Oberflächliche Poren und Lufteinschlüsse, Lagenverschiebungen, Welligkeiten im Laminat oder Randbereiche, in denen der Preform infolge des Fließwiderstands der Matrix aus der Werkzeugklemmung gespült wird (sog. „Klemmungsverluste“). Zusätzlich lassen sich weitreichende unbenetzte Bereiche feststellen (siehe Abb. 6-7, oben).

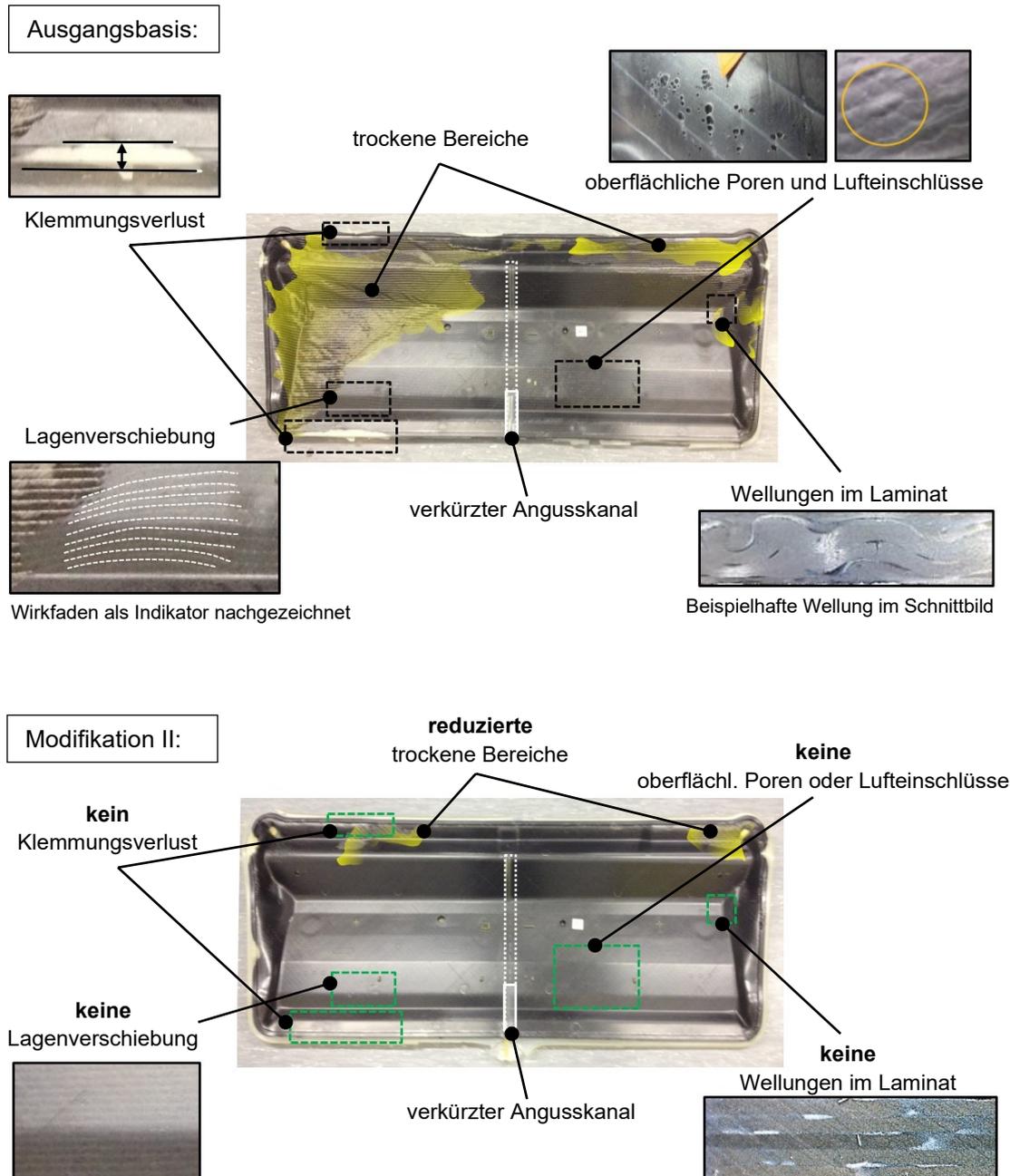


Abb. 6-7: Vergleich der erzielbaren Bauteilgüte am fünfflagigen Aufbau (5,6,2,6,5) im Versuchswerkzeug „Bodenelement“.

Ausgangsbasis mit typischen Fehlstellen (oben) und optimierter Zustand (Modifikation II) mit reduziertem Fehlerbild (unten).

Demgegenüber bleiben diese Beobachtungen bei der Verwendung der Materialien NCF-2.4, NCF-5.2 und NCF-6.2 in Kombination mit der Spaltinjektion (Modifikation II) aus. Klemmungsverluste, Lagenverschiebungen sowie oberflächliche Poren sind nicht zu detektieren (siehe Abb. 6-7, unten). Allein in den angussfernen Bereichen verbleiben teilweise trockene Bereiche; verglichen mit der Bezugsbasis sind diese jedoch signifikant reduziert.

Eine abschließende Studie mit prozessoptimaler Angussstrategie (d. h. vollständig geöffnet, siehe auch „gepunktet“ dargestellter Angusskanal in Abb. 6-7) bestätigt die optimierten Parameter nachhaltig. Alle Komponenten dieser Versuchsreihe (Losgröße: > 20 Stück) werden vollumfänglich gefüllt. Nachgelagerte Schliffuntersuchungen weisen keine Störungen in der Imprägnierung auf, wie Abb. 6-8 darstellt.

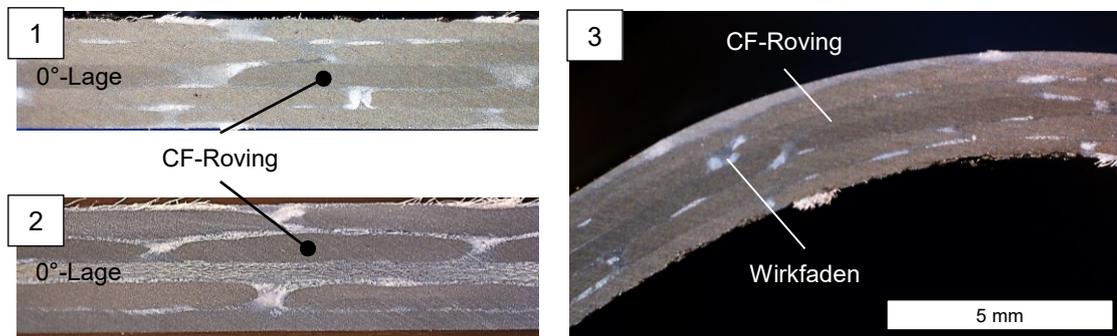


Abb. 6-8: Repräsentative Schliffbilder eines „Bodenelements“. Fünflagiger Aufbau, Modifikation II: Textil und Prozess.

Abb. 6-8 (1) und (2) zeigt Schnitte durch einen ebenen Bauteilbereich. In (1) wurde die Probe orthogonal und in (2) parallel zur 0°-300 g/m²-Lage präpariert. Es sind keine Störungen in der Laminatfüllung nachzuweisen. Ebenso zeigen sich die Radienbereiche der injizierten Komponenten vollständig gefüllt, siehe Abb. 6-8 (3).

Mit der Kombination der produkt- und prozessseitigen Faktoren lässt sich nach Abschluss der Untersuchungen die eingangs (Kap. 1.2) aufgestellte Forderungen nach fähigen und beherrschten Herstellprozessen bewerten. Das „Prinzip des robusten Prozesses“ (in Anlehnung Abb. A-12 im Anhang) angewandt auf die vorliegende, untersuchte Prozesskette lässt sich wie in Abb. 6-9 skizziert schematisch darstellen.

In der Ausgangsbasis (1) zu Beginn der Analysen liegen die verarbeitungsrelevanten Eigenschaften der untersuchten Halbzeuge unter dem geforderten Prozessfenster des Verarbeitungsprozesses. „n“ zeigt dabei die Verkettung der einzelnen Prozessschritte an: Textilherstellung, Stack-Prozess, Preformen und RTM-Prozess verarbeiten jeweils das Ausgangsprodukt des vorangegangenen Prozesses und generieren damit das Eingangsprodukt für den Folgeprozess. Ist diese Prozessfolge nicht aufeinander abgestimmt, kommt es zu Abweichungen von der Spezifikation. Im vorliegenden Fall sind das Ergebnis vollständig wie auch nur teilweise gefüllte Komponenten, hier gekennzeichnet mit „i.O.“ und „n.i.O.“

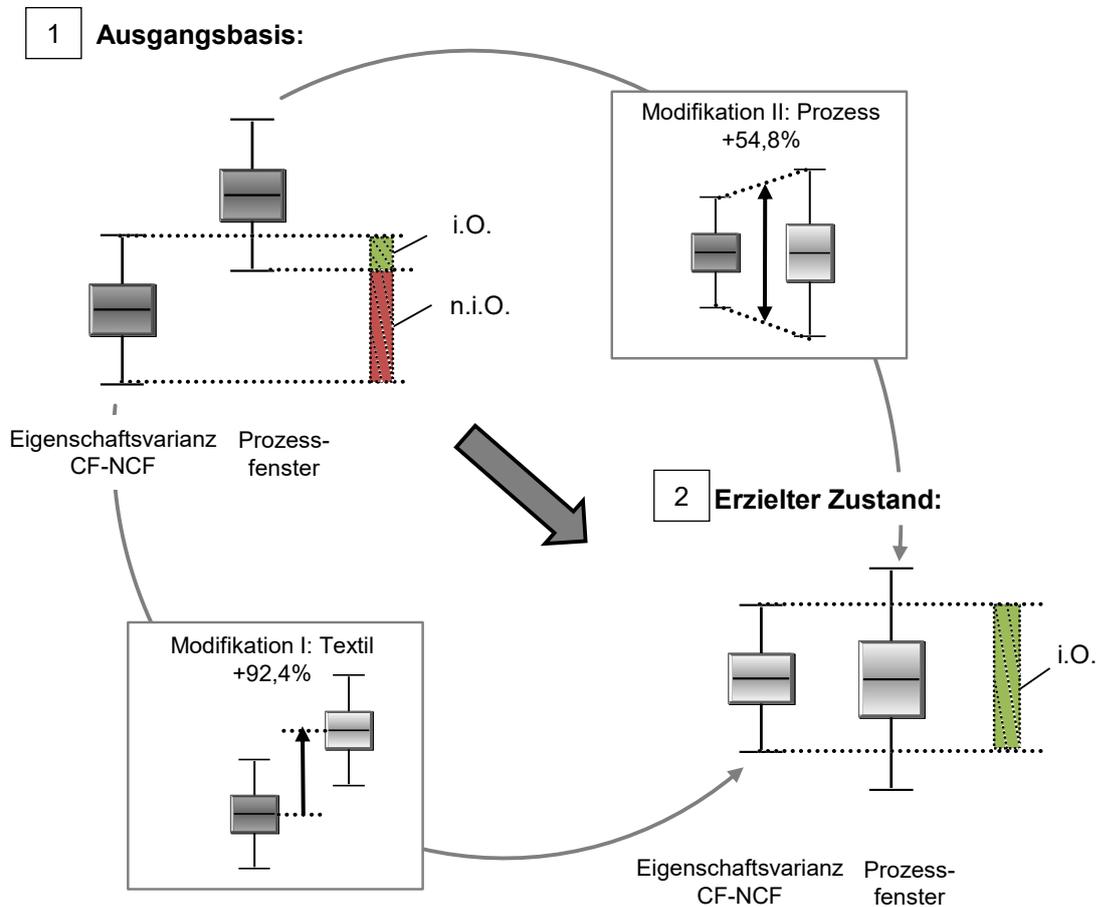


Abb. 6-9: Prinzip eines robusten Prozesses: erzielter Zustand nach Produkt und Prozessoptimierungen.

Durch die aufgezeigten Materialoptimierungen „Modifikation I: Textil“ konnte der Mittelwert der relevanten Materialeigenschaften in die Mitte des Verarbeitungsfensters (+92,4 %) bewegt werden. Weiterhin wurde durch die Optimierung der eingesetzten CF-NCF das Prozessfenster zur optimalen Prozessführung im Preforming und RTM eröffnet. „Modifikation II: Prozess“ stellt die Erweiterung des Verarbeitungsfensters um +54,8 % dar. Im dadurch erzielten Zustand (2) sind nach Abschluss der Untersuchungen die Eigenschaften des Eingangsprodukts auf das nachfolgende Prozessfenster abgestimmt. Es werden Bauteile innerhalb der festgelegten Toleranzen produziert und mit „i.O.“ gekennzeichnet. Damit ist die Grundlage für einen fähigen und stabilen Prozess geschaffen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das zentrale Ergebnis der vorliegenden Arbeit besteht darin, dass die Imprägnierung von Carbonfaserbasierten Gelegen (CF-NCF) im Hochdruck-RTM-Prozess (HD-RTM) maßgeblich von der Architektur der eingesetzten Textilien sowie der Prozessführung beim Umformen und bei der Injektion abhängt. Der Imprägnierprozess kann auch unter den Vorgaben einer automobilen Großserienproduktion (vgl. Kap. 2.1.5 Tab. 2-2) gezielt beeinflusst werden. Dabei legt die Materialstruktur der unidirektionalen Einzelgelegelagen (UD-NCF) sowie der Aufbau der multidirektionalen Gelegestapel (MD-Stack) die Grundlage für das Niveau der injektionsrelevanten Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung dieser Halbzeuge. Beide Eigenschaften lassen sich im Anschluss bei der Weiterverarbeitung zum Faserverbundkunststoff (FVK) zielgerichtet durch die Wärmezufuhr oder den gewählten Kavitätsspalt beim Preformen und/oder beim RTM-Prozess modifizieren, d. h. reduzieren oder intensivieren.

Dies eröffnet die Möglichkeit, die relevanten Produkteigenschaften der textilen Halbzeuge und das Prozessfenster der Verarbeitungsprozesse systematisch aufeinander abzustimmen. Dadurch kann eine Steigerung der Prozessfähigkeit der Werkstoffverfahrenskombination CF-NCF-RTM erreicht werden. Dies zeigt sich in einer reproduzierbaren Komponentenfüllung und führt zur Ausschussminderung.

Der Indikator für eine solche Optimierung der Bauteilimprägnierung ist der über piezoelektrische Sensoren erfasste Verlauf des Werkzeuginnendruckes bei der Imprägnierung des Formnests mit der Matrix. Die Tatsache, dass der Forminnendruckanstieg direkt mit der Permeabilität des injizierten Preforms korreliert, erlaubt es, die subjektive, visuelle Beschreibung der Füllungsqualität einer Komponente durch die objektive sensorgestützte Messung zu quantifizieren. Dies wiederum ermöglicht erst die Verifizierung und Validierung der unternommenen Modifikationen im HD-RTM-Prozess.

Um aber die Stellhebel, welche die relevanten Produktparameter (Permeabilität und Kompaktierungsverhalten) entlang der Prozesskette signifikant beeinflussen, vollständig zu detektieren, war darüber hinaus die Weiter- und teilweise Neuentwicklung geeigneter Prüfmethode notwendig. So bieten der konzipierte H₂O-Permeabilitätsprüfstand und die modifizierte Kompaktierungsprüfung das Potenzial, die Durchlässigkeit und die Kompressibilität des textilen Halbzeugs nach jedem Prozessschritt (Textilherstellung, Stackaufbau und Preformen) - wenn auch zerstörend - zu prüfen. Demgegenüber besteht mit dem weiterhin realisierten NCF-Scanner die Möglichkeit, die textile Struktur des Geleges im ebenen Fall detailliert zu erfassen und direkt mit den Ergebnissen der Imprägnierversuche zu korrelieren. Die Kombination aus den o. g. Prüftechnologien (optische Gelegebewertung, Permeabilitäts- und Kompaktierungsprüfung, ebener Platteninjektion sowie Bauteilhochdruckinjektion) und die daraus abgeleitete Qualifizierungslogik (Laborebene → Technikumsebene → Serienebene, siehe Kap 3.2.3) erlauben Effek-

te diskreter Optimierungsmaßnahmen entlang der Prozesskette zu „verfolgen“ und die entdeckten Wirkzusammenhänge zu beschreiben und zu bewerten.

Darauf aufbauend konnte im Rahmen der Materialanalysen den sog. „Engineered Gaps“ (Fließkanäle in der Gelegestruktur) im CF-NCF ein messbarer Einfluss auf dessen Permeabilität nachgewiesen werden. Im Verlauf der Untersuchungen hat sich neben der Größe der Fließkanäle, also die Länge, Breite und Höhe, mitunter auch deren Form als maßgeblicher Faktor mit Einfluss auf die Injektionsfähigkeit dieser textilen Halbzeuge herauskristallisiert. Vor allem die Trikotbindung in Kombination mit einer reduzierten Nadelteilung (Stichbreite) erwies sich als signifikanter Stellhebel, um Kompaktierung und Permeabilität zu beeinflussen. Weiterhin konnte dargestellt werden, dass auch bei den hier untersuchten Schalenbauweisen mit Wandstärken ≤ 5 mm die Durchlässigkeit in transversaler Richtung einen wesentlichen Einfluss auf die Imprägniereigenschaft aufweist. Diese wiederum wird maßgeblich vom Lagenaufbau des Halbzeugs beeinflusst. Denn sog. Nestingeffekte, also das Ineinandergleiten einzelner CF-Rovings von UD-Gelegetagen gleicher Orientierung in einem Lagenaufbau, erschweren den Harzfluss in z-Richtung.

Als wesentliche Komponente des Textils wurde der Einfluss des Binders im festgesetzten Arbeitsbereich (vgl. Kap. 2.1.5 Tab. 2-2) analysiert. Dabei ergab sich ein direkter Einfluss auf die Strukturstabilität (Steifigkeit und Lagenhaftung) eines CF-NCF-Stack abhängig von der eingesetzten Pulvermenge. Weiterhin wirkt das beim Preformen und RTM realisierte Verarbeitungsfenster hinsichtlich Wärmeeintrag und Maß der Kompression der Halbzeuge (Prozessparameter: „Preformspalt“ und „RTM-Spalt“) direkt auf den schmelzbaren Pulverbinder im Halbzeug. Diese Stellhebel beeinflussen die resultierende Lage des Epoxids im Preform (im Rovingbündel eines NCF oder im Zwischenlagenbereich eines Stacks) und dadurch die Durchlässigkeit und Strukturstabilität des umgeformten Halbzeugs.

Die Kombinatorik der Einzelergebnisse der Materialmodifikation konnte abschließend im serienäquivalenten Injektionsprozess bestätigt werden. Im untersuchten Fall steigt das injizierte Matrixvolumen durch die optimierte Bindung (Franse Teilschuss \rightarrow Trikot), die Erhöhung der Stichteilung (E 3,5 \rightarrow E 5) und der Maximierung der Fließkanalbreiten bei den UD-NCF im Vergleich zur Ausgangsbasis um 92,4 %²⁹. Dementsprechend erhöhen die Zugabe des Umformspalts beim Preformen ($V_{f,tar} = 53 \% \rightarrow 49 \%$) und der Einsatz der Spaltimprägnierung ($V_{f,tar} = 53 \% \rightarrow 49 \%$) beim RTM das Injektionsvolumen um weitere 54,8 %. Gleichzeitig konnten die zu Beginn der Untersuchungen auftretenden Fehlerbilder, wie zum Beispiel Porenbildung, unter dem Injektionsdruck verschobene Lagen, nicht imprägnierte Bereiche am Preform etc. sichtbar reduziert werden.

²⁹ Bezogen auf die injizierte Matrixmenge bei einem Werkzeuginnendruck von 10 bar im 3D-HD-RTM.

Zusammenfassend stellt Tab. 7-1 die untersuchten Parameter (Stellhebel) dar. Diese bewertet darüber hinaus deren Einflussnahme auf die relevanten Produkteigenschaften von CF-NCF (Permeabilität und Kompaktierung) hinsichtlich Imprägnierungsverhalten unter den für diese Arbeit definierten Vorgaben qualitativ. Es stellt das Eigenschaftsprofil von Carbonfasergelegen und deren Wirkzusammenhänge im Hochdruck-RTM-Prozess dar.

Tab. 7-1: Wirkzusammenhänge von Carbonfasergelegen im HD-RTM-Prozess.
Übersicht der Wirkzusammenhänge der untersuchten textilen Stellgrößen von CF-NCF bzgl. der Produkteigenschaften Permeabilität und Kompaktierung.

Stellhebel	Produkt-eigenschaft		Kompaktierung
	Permeabilität		
	K ₁₂	K ₃	
UD-Gelege (Textile Architektur):			
• Flächengewicht der Verstärkungstextilien	↑	↑	↓
• Fadenspannung (Fließkanalbreite)	↑	↑	↗
• Bindungsart (Wechsel von Franse zu Trikot)	→	↑	→
• Stichanzahl/-breite (Kehrwert ist die Stichtlänge)	↗	↑	→
MD-Stack (Lagenaufbau):			
• Lagenanzahl	↓	↓	→
• Lagenfolge, (Wechsel von 0°/0° zu 0°/90°)	↑	↑	→
Prozessführung (beim Preformen und RTM):			
• Pulverbinder (Bindermenge)	↓	↓	↑
• Wärmeeintrag beim Preformen	↑	↗	Steifigkeit: ↑ Lagenhaftung: ↓ Kompaktierung: ↑
• Umformspalt beim Preformen („Preformspalt“)	↑	↑	↑
• Spaltimprägnierung beim RTM („RTM-Spalt“)	↑ reduziert das Druckniveau		

Dargestellt ist der qualitative Einfluss von Stellgröße auf Eigenschaft, wenn sich numerische Parameter erhöhen oder die kategorialen Parameter ändern.

In Anbetracht der Tatsache, dass sich der Effekt auf die Komponentenfüllung all dieser aufgeführten Faktoren (Tab. 7-1) über den Forminnendruck im HD-Prozess nachweisen lässt, zeigt auch, dass sich die auf Laborebene (Niederdruckbereich, ≤ 5 bar) identifizierten Stellhebel und Wirkmechanismen auf die Technikumsebene (Hochdruckbereich, ≤ 30 bar) bis hin zur Serienanwendung (Hochdruckbereich, ≤ 100 bar) übertragen lassen.

Zudem bestätigen die erzielten Ergebnisse auch die eingangs festgesetzten Randbedingungen. Die Prämissen einer gleichbleibenden Merkmalsbildung beim Umformen und einer konstanten Einflussnahme des C-Fasertyps erwiesen sich im hier vorliegenden Fall als zulässig.

Die aufgezeigten Modifikationen reichen im untersuchten Fall aus, um eine robuste Füllung des CF-NCF-Preforms mit der Matrix dazustellen. Somit ist das Ziel der vorliegenden Arbeit erreicht. Allerdings ist die detektierte Streuung in den erzielten Versuchsergebnissen (bis zu $\pm 10\%$ ³⁰) kritisch zu hinterfragen. Ursache für die Varianz ist u. a. die bereits auf makro- und mikroskopischer Ebene feststellbare Variabilität des Textils, des Stacks und des Preforms hinsichtlich ihrer Struktur (z. B.: Fließkanäle, Flächengewicht, Umformverhalten etc.). Diese Störgröße weiter zu quantifizieren und zu reduzieren und damit die Prozessfähigkeit noch weiter zu steigern, muss die Intention weiterführender Untersuchungen sein, siehe auch [165], [31], [199].

Um die Fähigkeit des Fertigungsprozesses vor diesem Hintergrund zu überwachen und abzusichern, ist die messtechnische Erfassung der injektionsrelevanten Produkteigenschaften (Permeabilität und Kompaktierung) erforderlich. Hierzu sind jedoch Fortschritte in der Prüftechnologie notwendig, da aktuell die Prüfung infolge der aufwendigen Probenpräparation offline und zudem zerstörend erfolgt. Können diese Charakteristika zukünftig zerstörungsfrei, inline ermittelt werden, ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit einer aktiven Prozesskontrolle unabhängig von der Fähigkeit des vorliegenden Prozesses. Die Bewertung eines Luftstroms durch einen Preform zum Beispiel bei der Evakuierung der RTM-Kavität oder in einem vorgelagerten Prozessschritt kann dazu herangezogen werden, eine „Permeabilität“ zu ermitteln. Dies wird die Möglichkeit eröffnen bei der Konsolidierung regelnd einzugreifen, d. h. Injektionsdrücke und -profile des Imprägniervorgangs zu justieren oder aber nicht vollständig imprägnierbare Preforms auszuschleusen und Ausschuss und damit Kosten zu vermeiden. Die für die vorliegenden Analysen eingesetzte Messgröße „Forminnendruck“ kann das nicht leisten, da diese als Konsequenz der obigen Parameter erst nach Abschluss der Injektion zur Verfügung steht.

Aber mit der Identifikation der „Stellhebel“, welche die Permeabilität und die Kompaktierung der textilen Halbzeuge beeinflussen (vgl. Tab. 7-1), eröffnet sich bereits die Möglichkeit der Prozessüberwachung. Denn das Verständnis der Wirkweise dieser Pa-

³⁰ Bezogen auf das injizierte Harzvolumen bei 10 bar Forminnendruck im 3D-HD-RTM (optimierter Fall: Modifikation II)

parameter erlaubt nunmehr deren Spezifikation in definierten Grenzen. Zudem ermöglicht die sensorgestützte Erfassung von Prozesstemperaturen und Wegprofilen von Formwerkzeugen oder optischer Überwachung von textilen Herstellprozess hinsichtlich Flächengewicht, Bindergehalt oder Gelegestruktur etc. das Erkennen von Abweichungen ggü. der gesetzten Toleranzen bei der Herstellung des Faserverbundkunstoffs (FVK) [187]. Damit ist die indirekte Kontrolle des Fertigungsprozesses und das Eingreifen zur Prozesslenkung Stand der Technik. Nachgelagerte Qualitätsprüfungen der fertigen Komponente, z. B. durch Ultraschallprüfung, können in die Stichprobe überführt und auf ein Minimum reduziert werden.

Die bisherigen Untersuchungen haben sich im Rahmen festgelegter Randbedingungen bewegt. Mit den gesammelten Erkenntnissen und dem Verständnis der Wirkweise der eingesetzten CF-NCF eröffnen sich für zukünftige Anwendungsszenarios Handlungsempfehlungen und Möglichkeiten bei der Verarbeitung dieser Textilien im RTM-Verfahren. So kann z. B. eine mangelnde Durchlässigkeit eines Preforms infolge einer gewählten Materialarchitektur durch einen alternierenden Lagenaufbau (0° - und 90° -Orientierung im Wechsel) signifikant verbessert werden (und umgekehrt). Weiterhin kann die Füllung von konfektionierten Bauteilen (d. h. Bauteilen, die aus mindestens einem Preform bestehen) durch den Lagenaufbau und die daraus resultierende Permeabilität, je nach Anforderung, individuell beeinflusst werden. Dies muss bereits bei der funktionalen Auslegung berücksichtigt werden. Hat der Konstrukteur aber hierbei neben den funktionalen Anforderungen auch Kenntnis über die Wirkzusammenhänge der eingesetzten CF-NCF und steht ihm ein Materialkatalog unterschiedlicher Gelegearchitekturen zur Verfügung, kann die herzustellende CF-NCF-Komponente sowohl aus funktionaler wie auch aus fertigungstechnischer Sicht optimal ausgelegt werden. Zur Komponentenfüllung notwendige Forminnendrucke werden sich reduzieren und infolgedessen, bei gleichbleibendem Prozessfenster des Verarbeitungsprozesses, die Prozessfähigkeit erhöht, Ausschuss vermieden und Produktionskosten gesenkt. Alternativ kann diese „Reserve“ auch gezielt zur Kostenersparnis bei der Dimensionierung des Produktionssystem selbst (Werkzeugauslegung, Injektionsanlagen oder RTM-Pressen) unter dem Stichwort „Downsizing“ genutzt werden und so die Investitionskosten vermindert werden.

Ebenso ist die Anwendung der gesammelten Erkenntnisse in anderen CF-NCF verarbeitenden Prozessen, wie z. B. dem Nasspressprozess (engl. Liquid Composites Compression Molding, LCCM), denkbar. Die Matrix wird hier vor Schließen der Kavität direkt auf den umzuformenden CF-Stack appliziert. Konsequenterweise erfolgt die Imprägnierung beim Konsolidieren entlang der vertikalen Richtung durch das Halbzeug. In der Folge muss hier die Permeabilität in z-Richtung einen wesentlichen Beitrag zur Füllqualität leisten und kann auch hier über die herausgearbeiteten Materialstellhebel zielorientiert variiert werden.

Ebenso ist die Adaption auf andere textile Halbzeuge durchaus vorstellbar. So bieten z. B. Rund- oder Flachgeflechte („Litze“) interessante Anwendungsgebiete. Denn auch hier wird beim schichtweisen Aufbau der Materialien durch die Prozessführung die Ab-

lage der einzelnen Rovings in deren Form und Lage zueinander beeinflusst. Die im Bereich CF-NCF gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Fadenspannung, Grammatik, „Lagenfolge“ etc. müssen auch hier Bedeutung haben. Werden diese Halbzeuge im RTM-Verfahren imprägniert, gelten auch hier die bereits dargestellten Zusammenhänge hinsichtlich Spaltinjektion.

Diese Überlegungen legen den Schluss nahe, dass sich die gesammelten Erkenntnisse allgemein auf die Konsolidierung von Faserverbundwerkstoffen übertragen lassen; immer dann, wenn ein CF-Textil in einer Werkzeugkavität mit einer Matrix, unabhängig ob duro- oder thermoplastisch, imprägniert werden soll.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Heuss and N. Müller et al, Lightweight, heavy impact: How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive. Available: http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/Automotive%20and%20Assembly/PDFs/Lightweight_heavy_impact.ashx (2014, Feb. 23).
- [2] T. Kraus and M. Kühnel, “Composites-Marktbericht 2016: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen,” Der globale CFK-Markt, CCeV - Carbon Composites e.V, Nov. 2016.
- [3] R. Stegner and M. Küpper, “Leichtbau trifft Großserie - GMs Vision globalen Leichtbaus,” in Karosseriebautage Hamburg, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, pp. 13–22.
- [4] M. Hillebricht, “Energieeffizienter Leichtbau durch Multimaterialsysteme - oder darf es etwas mehr Fahrdynamik sein?,” in Karosseriebautage Hamburg, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, pp. 23–34.
- [5] S. Böll, “Aus für Verbrennungsmotoren,” Der Spiegel, no. 41, p. 69, 2016.
- [6] M. Basler and J. Kelnberger, Manipulierte VW-Diesel sollen von den Straßen verschwinden: Abgasskandal. Available: <http://www.sueddeutsche.de/auto/abgasskandal-manipulierte-vw-diesel-sollen-von-den-strassen-verschwinden-1.3596033> (2017, Aug. 21).
- [7] N. N, Paris will Benzin- und Dieselautos aus der Stadt verbannen: Ab dem Jahr 2030. Paris: Reuters, 2017.
- [8] K. Drechsler, “CFK – Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann,” Neckarsulm, 2010.
- [9] B. Heißing, “Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus,” Skriptum zur Vorlesung, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU-München, Garching, 2006.
- [10] H. Friedrich, O. Deißer, and R. Schöll, “Werkstoff- und Leichtbauarchitekturen für die Fahrzeugkonzepte der Zukunft,” Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR Stuttgart, CCeV Automotive Forum 2011, Ingolstadt, Jun. 2011.
- [11] B. Heißing and M. Ersoy, Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven: Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [12] Schröder Nico, “Titelthema - Plan E,” Automobil Produktion, vol. 26, no. Sonderausgabe, pp. 6–13, Apr. 2012.
- [13] R. Seiffert, “Das Genie und sein Auftrag für eine Technik, die sich nicht durchsetzte. Ferdinand Porsche und der Lohner-Porsche: Mit Frontantrieb und Radnabenmotoren,” Frankfurter Allgemeine Zeitung, 30 May, p. 4, 2000, <https://web.archive.org/web/20080331224434/http://de.geocities.com/jayedelman/porsche.html>.
- [14] T. Günnel, Was bringt Leichtbau beim Elektrofahrzeug? Available: <http://www.automobil-industrie.vogel.de/was-bringt-leichtbau-beim-elektrofahrzeug-a-588846/> (2017, Mar. 13).
- [15] J. Becker, Warum BMW am teuren Karbon festhält: Leichtbau im Auto. Available: <http://www.sueddeutsche.de/auto/2.220/leichtbau-im-auto-warum-bmw-am-teuren-karbon-festhaelt-1.3232580> (2016, Feb. 01).

- [16] H. Baier, "Faserverbundwerkstoffe: Skriptum zur Vorlesung," Garching, Oct. 2007.
- [17] M. Sauer and M. Kühnel, "Composites-Marktbericht 2018: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen," Der globale CF- und CC-Markt, CCeV - Carbon Composites e.V, Nov. 2018.
- [18] E. Witten, "Composites-Marktbericht 2017: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen," Der GfK-Markt Europa 2017, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Sep. 2017.
- [19] K. Drechsler, "Composites Materials and Structure-Property Relationship: Vorlesungsskript & Übungsmaterial," Skriptum zur Vorlesung. Garching, Dec. 2011.
- [20] T. Passreiter, "Project i: Die Antwort der BMW Group auf die zukünftigen Herausforderungen nachhaltiger und individueller Mobilität," Geschlossener Vortrag. Augsburg, Mar. 2014.
- [21] N. N., "Wir gestalten Mobilität der Zukunft: Geschäftsbericht 2017," BMW Group, München, 2017.
- [22] N. N., BMW auf der IAA Frankfurt 2015: Pressemappe. Available: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=bmw-auf-der-iaa-frankfurt-2015&outputChannelId=7&id=T0230862DE&left_menu_item=node__4217 (2015, Sep. 30).
- [23] N, N, Der BMW i3: Pressemappe. Available: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=der-bmw-i3&outputChannelId=7&id=T0143924DE&left_menu_item=node__6728 (2015, Sep. 30).
- [24] T. Göbel, B. Veihelmann, and M. Derks, "CFRP and multimaterial design for future electric vehicles," Geschlossener Vortrag. Mannheim, Mar. 2012.
- [25] Reuter Wolfram, "Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut," Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2002.
- [26] N. N., "Go carbon fiber 2011 - Automotive," TUT, The International Textile Magazin, no. 85, pp. 20–21, 2012.
- [27] F. Dirschmid and T. Weiss, "Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung," in Karosseriebautage Hamburg, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, pp. 217–231.
- [28] R. Schedel, "Grenzen Erweitern mit CFK," ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, vol. 114, no. 3, pp. 206–209, Mar. 2012.
- [29] B. Marx, D. Kalka, and U. Jankowski, "Crash-Sicherheit von Elektrofahrzeugen: Herausforderungen und Lösungsansätze: TECOSIM Technische Simulation GmbH," in Karosseriebautage Hamburg, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, pp. 43–52.
- [30] M. Derks, "CFK-Technologien im Automobilbau," Braunschweig, Oct. 2007.
- [31] A. Nonn, C. Koch, T. Maurer, S. Bickerton, C. Greb, and T. Gries, "Investigation into the Variability of Carbon Fiber Non-Crimp Fabrics and its Influence on the RTM-Process," in Proceedings of the 17th European Conference on Composite Material: ECCM17, 2016.
- [32] C. Sorg, "Data Mining als Methode zur Industrialisierung und Qualifizierung neuer Fertigungsprozesse für CFK-Bauteile in automobiler Großserienproduktion," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.

- [33] A. Kochan, "Untersuchung zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [34] P. Rosenberg, "Zerstörungsfreie Prüfmethode für die Produktion von CFK-Strukturbauteilen im Automobilbau: Untersuchungen zur Wirbelstromprüfung," Diplomarbeit, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2012.
- [35] N. N, SGL Group erwirbt Minderheitsbeteiligung der BMW Group am Gemeinschaftsunternehmen SGL Automotive Carbon Fibers (SGL ACF). Wiesbaden/München, 2017.
- [36] M. Sheahan, SGL to buy BMW's stake in carbon fiber joint venture. Frankfurt am Main: Reuters, 2017.
- [37] J. Toepker, "Einsatz von CFK im Fahrzeugbau als Befähiger der Elektromobilität," Geschlossener Vortrag, in 17. Nat. Symp. SAMPE Deutschland e.V., 2011.
- [38] H. Jäger and T. Hauke, Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe: Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung. München: Verlag Moderne Industrie, 2010.
- [39] P. Morgan, Carbon fibers and their composites: Practical guide to carbon fibers and their composites. Boca Raton: Taylor & Francis; Dekker/CRC Press, 2005.
- [40] J.-B. Donnet, Carbon fibers, 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [41] M. Flemming, S. Roth, and G. Ziegmann, Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices. Berlin [u. a.]: Springer, 1995.
- [42] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Ed, Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 3rd ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [43] SGL Automotive Carbon Fibers, Carbonfaser Gelege. Internetauftritt SGL ACF. Available: <http://www.sglacf.com/produkte/carbonfaser-gelege.html> (2015, Nov. 01).
- [44] N. N, Härtester Konkurrent kauft Liba. Available: <https://www.frankenpost.de/regional/wirtschaft/Haertester-Konkurrent-kauft-Liba;art2448,2986062> (2016, Aug. 18).
- [45] N. N, "Multiaxial-Technologie zur Herstellung textiler Halbzeuge aus Carbonfasern: Roadshow Composite, Carbon, Hybrid - LIBA Maschinenfabrik GmbH," Nov. 2011.
- [46] SGL Automotive Carbon Fibers, Produktionskette zur Herstellung der CFK-Bauteile für den BMW i3 und i8. Internetauftritt SGL ACF. Available: <http://www.sglacf.com/produktion/produktionskette.html> (2015, Nov. 01).
- [47] F. Denninger, Textil- und Modelexikon, 8th ed. Frankfurt am Main: Dt. Fachverl, 2006.
- [48] T. Gries, "Faserverbundwerkstoffe I," Vorlesungsfolien. Aachen, 2010.
- [49] C. Cherif, Ed, Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften: Springer-Verlag, 2011.
- [50] Stricken und Wirken - Grundbegriffe - Fachwörterverzeichnis, DIN EN 4921, 2002.
- [51] Verstärkungen - Spezifikation für Multiaxialgelege - Teil 1: Bezeichnung, DIN EN 13473-1, 2001.
- [52] Verstärkungen - Spezifikation für Multiaxialgelege - Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Produkthanforderungen, DIN EN 13473-2, 2001.

- [53] Verstärkungen - Spezifikation für Multiaxialgelege - Teil 3: Besondere Anforderungen, DIN EN 13473-3, 2001.
- [54] Näh- und Bekleidungsmaschinen – Begriffe der Nähtechnik – Teil 1: Nähen, Nähstich, Nähstichtyp, Nähnaht, DIN 5300-1, 2004.
- [55] Näh- und Bekleidungsmaschinen – Begriffe der Nähtechnik – Teil 3: Nähgut, Nähfaden, DIN 5300-3, 2004.
- [56] R. Bachmeier, “CFK Taschenhandbuch: unveröffentlichtes Handbuch,” BMW Group, München, Jun. 2011.
- [57] M. Dix, “Eine durchgängig virtuelle Faserverbundprozesskette am Beispiel des RTM Prozesses,” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching, 2016.
- [58] G. Deinzer, M. H. Kothmann, D. Roquette, and F. Diebold, “AUDI Ultra-RTM: A technology for high performance and cost effective CFRP parts for high volume production,” in Proceedings of the 17th European Conference on Composite Material: ECCM17, 2016.
- [59] N. N, Advanced Materials: Raising performance through fast processing. Available: http://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/a_MCED5570E284BD76EE040EBCD2B6B7A1B/Industries_MCEFD19E1A181BDB8E040EBCD2B6B77C9/Automotive_MD0A999A201D91CB6E040EBCD2B6B5378/files/EUR_HL_Automotive_Raising%20performance%20through%20fast%20processing.pdf (2015, Sep. 30).
- [60] N. N., “Leichtbau. Technologie und Prozess CFK. Project i. Status Joint-Venture SGL ACF: geschlossener Medienvortrag,” Medieninformation BMW, Feb. 2013.
- [61] R. Loendersloot, W. Groupe, R. Akkerman, and S. van den Berg, “Permeability prediction using a multigrid method,” in FPCM-9, 2008.
- [62] M. Dix, “Ermittlung prozessrelevanter Halbzeugkenngrößen für die Herstellung von CFK-Bauteilen in automobiler Großserienproduktion,” Diplomarbeit, Laboratorium für Fertigungstechnik, Helmut Schmidt Universität, Hamburg, 2011.
- [63] M. Flemming, G. Ziegmann, and S. Roth, Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin: Springer, 1999.
- [64] P. Ermanni, Composites Technologies. Skriptum zur Vorlesung. Zürich, Center of Structure Technologies, ETH Zürich, 2007.
- [65] H. Darcy, Les fontaines publiques de la ville Dijon. Paris: Dalmon, 1856.
- [66] N. N, The SI Metric System of Units and SPE Metric Standard. Available: http://www.spe.org/authors/docs/metric_standard.pdf (2015, Dec. 21).
- [67] C. C. Wong, “Modelling the Effects of Textile Preform Architecture on Permeability,” Dissertation, The University of Nottingham, Nottingham, 2006.
- [68] T. Young, “An Essay on the Cohesion of Fluids: Philosophical Transaction of the Royal Society of London,” The Royal Society, vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [69] C. Bischof and W. Possart, Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
- [70] M. Connor, S. Toll, and J.-A. E. Manson, “On surface energy effects impregnation in composite and consolidation,” Composites Manufacturing, vol. 6, pp. 289–295, 1995.
- [71] D. Meschede, Gerthsen Physik, 21st ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002.
- [72] R. Loendersloot, “The structure-permeability relation of textile reinforcements,” Dissertation, University of Twente, Twente, 2006.

- [73] T. D. Papathanasiou, "On the effective permeability of square arrays of permeable fiber tows," *International Journal of Multiphase Flow (IJMF)*, vol. 23, no. 1, pp. 81–92, 1997.
- [74] J. S. U. Schell, "Investigation of the influence of meso-scale flow effects in liquid composite moulding Processes on the laminate quality," Dissertation, ETH, Zürich, 2007.
- [75] D. Becker, M. Brzeski, D. Linster, and P. Mitschang, "Preform compaction and deformation during through-the-thickness impregnation," in *ICCM - 19*, 2013, pp. 6585–6596.
- [76] C. D. Rudd, A. Long, K. Kendall, and C. G. E. Mangin, *Liquid moulding technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques*, 1st ed. Cambridge: Woodhead; SAE Internat, 1997.
- [77] S. G. Advani and E. M. Sozer, *Process modeling in composites manufacturing*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [78] S. Bickerton, M. Buntain, and A. Somashekar, "The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, pp. 431–444, 2003.
- [79] P. A. Kelly, R. Umer, and S. Bickerton, "Compaction of dry and wet fibrous materials during infusion processes," *International SAMPE Technical Conference*, vol. 72 pp. 785 – 797, 2004.
- [80] P. A. Kelly, R. Umer, and S. Bickerton, "Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 6, pp. 868–873, 2006.
- [81] P. A. Kelly, S. Bickerton, and J. Cheng, "Transverse Compression Properties of Textile Materials," *Advanced Materials Research*, vol. 2011, pp. 697–701.
- [82] S. H. Lee, Han, Kim, Youn, and Son, "Compression and Relaxation Behaviour of Dry Fiber Preforms for Resin Transfer Molding," *Journal of Composite Materials*, 2010.
- [83] A. Walbran, "Predicting and Monitoring local stresses and global tooling forces during LCM processes," Dissertation, Centre of Advanced Composite Materials, University of Auckland, Auckland, 2011.
- [84] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, "Compression in the processing of polymer composites 1: A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins," *Composites Science and Technology*, vol. 59, pp. 983–999, 1999.
- [85] S. Stanglmaier, "Monitoring the Compaction Response and Permeability of Carbon Fibre Textiles for Automotive Applications," Master Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching, 2013.
- [86] V. Shafi, "Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien," Dissertation, Kaiserslautern, 1996.
- [87] D. Becker, "Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde," Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015.
- [88] G. Rieber and P. Mitschang, "2D Permeability changes due to stitching seams," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 1, pp. 2–7, 2010.

- [89] T. S. Lundstrom, "The permeability of non-crimp stitched fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 12, pp. 1345–1353, 2000.
- [90] J. Klingele, "Binderapplikation: Festlegung Eigenschaftsprofil sowie Markt und Patentrecherche zu Bindermaterial," Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit der Firma BMW AG, München. Unveröffentlichter Bericht, 2013.
- [91] G. Rieber, "Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe," Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2011.
- [92] A. Endruweit, X. Zeng, M. Matveev, and A. Long, "Effect of yarn cross-sectional shape on resin flow through inter-yarn gaps in textile reinforcements," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 104, pp. 139–150, 2018.
- [93] A. Endruweit, "Investigation of the Influence of Local Inhomogeneities in the Textile Permeability on the Resin Flow in Liquid Composites Moulding Processes," Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2003.
- [94] J. Bergmann, "Analyse und anlagentechnische Verbesserung des Nasspressverfahrens," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [95] H. Grössing, E. Fauster, M. Weninger, and R. Schledjewski, "Influence of textile parameters on the in-plane permeability characteristics of non-crimped fabric preforms," *Polymer composites*, vol. 37, no. 6, pp. 1854–1863, 2016.
- [96] G. Rieber, "Die Rolle der Permeabilität für Injektionsprozesse," Jul. 2010.
- [97] B. Verleye, R. Croce, M. Griebel, M. Klitz, S. V. Lomov, G. Morren, H. Sol, I. Verpoest, and D. Roose, "Permeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2804–2810, 2008.
- [98] H. Talvensaari, E. Ladstätter, and W. Billinger, "Permeability of stitched preform packages," *Composites Structures*, vol. 71, pp. 331–377, 2005.
- [99] M. Floeck, H. Stadtfeld, P. Mitschang, and S. Bickerton, "Impact of Stitching Processes on the Compaction Behavior of Glass Fiber Reinforcements," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 36, no. 2, pp. 151–165, 2006.
- [100] S. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose, and M. Zako, "Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 993–1007, 2003.
- [101] H. Grössing and R. Schledjewski, "Optical permeability measurement of NCF: Influence of material properties on the 2d preform permeability," in *ICCM - 19*, 2013, pp. 5802–5809.
- [102] C. Lekakou, S. Edwards, G. Bell, and S. C. Amico, "Computer modelling for the prediction of the in-plane permeability of non-crimp stitch bonded fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 820–825, 2006.
- [103] S. Drapier, A. Pagot, A. Vautrin, and P. Henrat, "Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions," *Composites Science and Technology*, vol. 62, pp. 1979–1991, 2002.
- [104] V. Antonucci, M. Esposito, M. R. Ricciardi, M. Raffone, M. Zarelli, and M. Giordano, "Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors," *Express Polymer Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 1075–1084, 2011.

- [105] A. George, "Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies," Lehrstuhl für Flugzeugbau, Institute of Aircraft Design, Universität Stuttgart, Universität Stuttgart, 2011.
- [106] H. Grössing, M. Wolfahrt, A. Müller, and R. Schledjewski, "Comparison of permeability measurements of several fibre textiles using different measurement methods," in ECCM 15, 2012.
- [107] H. S. Chae, Y. S. Song, and J. R. Youn J, "Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding," *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 17–25, 2007.
- [108] E. Ladstätter, "Kompaktierungs- und Ermüdungsverhalten von RTM-Laminaten," Dissertation, Polymer Competence Center Leoben GmbH, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2013.
- [109] M. Dickert, D. C. Berg, and G. Ziegmann, "Influence of Binder Activation and Fabric Design on the permeability of non-crimp Carbon Fabrics," in FPCM-11 Flow process at Auckland, 2012.
- [110] G. Estrada, C. Vieux-Pernon, and S. G. Advani, "Experimental Characterization of the Influence of Tackifier Material on Preform Permeability," *Journal of Composite Materials*, vol. 36, no. 19, pp. 2297–2310, 2002.
- [111] W. Wu, B. Jiang, L. Xie, F. Klunker, S. Aranda, and G. Ziegmann, "Effect of Compaction and Preforming Parameters on the Compaction Behavior of Bonded Textile Preforms for Automated Composite Manufacturing," *Applied Composite Materials*, vol. 20, no. 5, pp. 907–926, 2013.
- [112] M. Tanoglu and A. T. Seyhan, "Compressive mechanical behaviour of E-glass/polyester composite laminates tailored with a thermoplastic preforming binder," *Materials Science and Engineering A*, vol. 363, pp. 335–344, 2003.
- [113] M. Mägel, B. Bieber, and U. Fried, "Prüfverfahren in der Textilindustrie (Teil I): Textilphysikalische Prüfverfahren für Fasern, Filamente und Fäden," in *Taschenbuch für die Textilindustrie*, W. Loy, Ed, Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 2001, pp. 37–43.
- [114] M. Mägel, B. Bieber, and U. Fried, "Prüfverfahren in der Textilindustrie (Teil II): Textilphysikalische Prüfverfahren für textile Flächengebilde," in *Taschenbuch für die Textilindustrie*, W. Loy, Ed, Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 2002, pp. 17–28.
- [115] *Textile Flächengebilde - Bestimmung der flächenbezogenen Masse unter Verwendung kleiner Proben*, DIN EN 12127, 1997.
- [116] Schneider M, Edelmann K, and Tiltmann U, "Quality Analysis of Reinforcement Structures for Composites by Digital Image Processing," in *SAMPE Europe (Hg.) 2004 – Proceedings of 25th International SAMPE*, pp. 1–6.
- [117] S. Bickerton and S. G. Advani, "Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 15, pp. 2215–2229, 1999.
- [118] W. Palfinger, S. Thumfart, and C. Eitzinger, "Photometric stereo on carbon fiber surfaces," http://profit-project.org/files/2011/08/Palfinger_PotometricStereoCFS_camera_ready.pdf, 2011.
- [119] S. Thumfart, "Inspektion von CF: Unveröffentlichter Vortrag," Landshut, 2012.
- [120] R. Schmitt and C. Mersmann, "Kamera prüft Faserorientierung großer CFK-Strukturen: Fertigungsintegriertes Messen im Faserverbundleichtbau," *VDI-Z Integrierte Produktion*, vol. 152, no. 10, pp. 53–55, 2010.

- [121] C. Mersmann, "Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundeichtbau," Dissertation, WZL, RWTH, Aachen, 2012.
- [122] Apodius GmbH, Apodius Vision System (AVS). Internetauftritt. Available: <http://apodius.de/wp-content/uploads/2015/07/AVS-3D-de.pdf> (2017, Feb. 01).
- [123] A. Miene, A. Herrmann, and M. Göttinger, "Quality assurance by digital image analysis for the preforming and draping process of dry carbon fiber material," in Proceedings of 27th International SAMPE Europe Konferenz, 2008.
- [124] M. Göttinger, C. Weimer, and A. Miene, "In-Line Preform-Prozesskontrolle in der CFK-Fertigung," Aachen, Sep. 2009.
- [125] H. Heuer, M. Schulze, M. Pooch, S. Gäbler, S. Nocke, G. Bradl, C. Cherif, M. Klein, R. Kupke, R. Vetter, F. Lenz, M. Kliem, C. Bülow, J. Goyvaerts, T. Mayer, and S. Petrenz, "Review on quality assurance along the CFRP value chain - Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques," *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, pp. 494–501, 2015.
- [126] H. Heuer, M. Schulze, and M. Klein, "Abbildende Wirbelstromsensoren zur hochauflösenden berührungslosen Abbildung von elektrischen Eigenschaften schlecht leitender Objekte," Nürnberg, 16. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 2012.
- [127] M. Schulze, H. Heuer, M. Küttner, and N. Meyendorf, "High-resolution eddy current sensor system for quality assessment of carbon fiber materials," *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 5, pp. 791–797, 2010.
- [128] S. Sharma and D. A. Siginer, "Permeability Measurement Methods in Porous Media of Fiber Reinforced Composites," *Appl. Mech. Rev*, vol. 63, no. 2, pp. 1–19, 2010.
- [129] R. Arbter, J. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona, C. Demaria, A. Endruweit, P. Ermanni, F. Gommer, S. Hasanovic, P. Henrat, F. Klunker, B. Laine, S. Lavanchy, S. Lomov, A. Long, V. Michaud, G. Morren, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgreffe, W. Wu, and G. Ziegmann, "Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 9, pp. 1157–1168, 2011.
- [130] P. C. Carman, "Fluid Flow through Granular Beds," *Transaction of the Institution of Chemical Engineers*, vol. 15, pp. 32–48, 1937.
- [131] T. G. Gutowski, T. Morigaki, and Zhong Cai, "The Consolidation of Laminate Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 172–188, 1987.
- [132] T. G. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer, D. Boucher, J. Kingery, and S. Wineman, "Consolidation Experiments for Laminate Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 650–669, 1987.
- [133] B. R. Gebart, "Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM," *Journal of Composite Materials*, vol. 26, no. 8, pp. 1100–1133, 1992.
- [134] S. Lomov, Wise Tex software suit. Available: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex> (2017, Jun. 01).
- [135] A. Ullah, "Recent Patents on In-Plane Permeability Measurement of LCM Composite Reinforcements," *Recent Patents on Engineering*, vol. 3, pp. 109–116, 2009.
- [136] I. Crivelli Visconti, A. Langella, and M. Durante, "Analysis of Transversal Permeability for Different Types of Glass Fiber Reinforcement," *Applied Composite Materials*, vol. 10, pp. 119–127, 2003.

- [137] P. J. Bates, D. Taylor, and M. F. Cunningham, "Compaction and Transverse Permeability of Glass Rovings," *Applied Composite Materials*, vol. 8, pp. 163–178, 2001.
- [138] R. Meier, A. Walbran, C. Hahn, S. Zaremba, and K. Drechsler, "Methoden zur Bestimmung der Permeabilität von Verstärkungstextilien," *Journal of Plastics Technology*, vol. 4, no. 10, pp. 90–116, 2014.
- [139] M. J. Buntain and S. Bickerton, "Compression flow permeability measurement: a continuous technique," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 5, pp. 445–457, 2003.
- [140] S. Bickerton and M. J. Buntain, "Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part B: Numerical analysis," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 7, pp. 1742–1754, 2007.
- [141] *Textilien - Bestimmung der Zusammendrückbarkeit von Textilien und textilen Erzeugnissen*, DIN 53885, 1998.
- [142] Seung Hwan Lee, Jeong Hwa Han, Seong Yun Kim, Jae Ryoun Youn, and Young Seok Song, "Compression and Relaxation Behavior of Dry Fiber Preforms for Resin Transfer Molding," *Journal of Composite Materials*, vol. 44, no. 15, pp. 1801–1820, 2010.
- [143] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, "Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, pp. 443–454, 1998.
- [144] D. C. Berg, M. Dickert, S. Aranda, G. Ziegmann, and M. Drechsel, "Influence of shear on the permeability tensor and compaction of a non-crimp fabric," in *ECCM 15*, 2012.
- [145] A. Endruweit and P. Ermanni, "The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 4, pp. 439–451, 2004.
- [146] R. Oster, "Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen," *Center of Excellences Air Vehicles - Laboratory Materials and Processes*, 2013.
- [147] B. Laine, S. Lomov, P. Henrat, C. Binetruy, P. Ermanni, F. Michaud, F. Trochu, H. Sol, A. Long, M. Wietgreffe, P. Beauchene, A. Endruweit, F. Gommer, E. Ruiz, S. Comas-Cardona, S. Hasanovic, G. Morren, L. Bizet, and J. Bréard, "International Permeability Benchmark: ONERA - The French Aerospace LAB,"
- [148] B. Laine, R. Arbter, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, J. Beraud, C. Demaria, A. Endruweit, F. Gommer, S. Hasanovic, F. Klunker, S. Lavachy, A. Long, S. Lomov, V. Michaud, G. Morren, P. Henrat, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgreffe, G. Ziegemann, A. Vautrin, W. Wu, and P. Beauchene, "Experimental determination of textile permeability: A benchmark exercise," in *FPCM-10*, 2010.
- [149] G. Morren, M. Bottiglieri, S. Bossuyt, H. Sol, D. Lecompte, B. Verleye, and S. V. Lomov, "A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 3, pp. 244–250, 2009.
- [150] Y. Luo, I. Verpoest, K. Hoes, M. Vanheule, H. Sol, and A. Cardon, "Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 11, pp. 1497–1504, 2001.

- [151] A. Endruweit, P. McGregor, A. C. Long, and M. S. Johnson, "Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 11-12, pp. 1778–1792, 2006.
- [152] K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, R. Parnas, and S. Lomov, "Study of nesting induced scatter of permeability values in layered reinforcement fabrics Study of nesting induced scatter of permeability values in layered reinforcement fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 12, pp. 1407–1418, 2004.
- [153] N. N, "Technisches Datenblatt: Carbonfaser 50K ACF 50-02," Version 2, Aug. 2015.
- [154] N. N, Zoltek PX35 Continuous Tow: Technical Data Sheet. Available: <http://zoltek.com/wp-content/uploads/2011/06/PX35-Continuous-Tow1.pdf> (2015, Nov. 06).
- [155] N. N, "Grundbindungen: Textiltechnische Ausbildung, Liba Maschinenfabrik GmbH" 2011.
- [156] N. N, "Grundlehrgang Wirkerei: Textiltechnische Ausbildung, Liba Maschinenfabrik GmbH" 2011.
- [157] N. N, "Kombinationsbindungen: Textiltechnische Ausbildung," 2011.
- [158] N. N, "Musterketten und Musterscheiben: Textiltechnische Ausbildung, Liba Maschinenfabrik GmbH" 2011.
- [159] N. N, "Fadenzuführungen: Textiltechnische Ausbildung, Liba Maschinenfabrik GmbH" 2011.
- [160] N. N, "Fadeneinlaftabellen: Textiltechnische Ausbildung, Liba Maschinenfabrik GmbH 2011.
- [161] S. Hofer, "Analyse der prozesstechnischen und materialbedingten Einflussfaktoren auf den Drapierprozess von Carbonfaser-Gelegen," Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching, 2012.
- [162] C. Jagoda, "Erarbeitung einer Methodik zur Bewertung der Injektionseignung von CF-Halbzeugen für das RTM-Verfahren," unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Dortmund, Dortmund, 2011.
- [163] C. Koch, "Textil-Scanner: Bestimmung der Fließkanalbreite und Gassendurchgängigkeit von Kohlenstofffaser-Gelegen (Non-Crimp Fabrics)," BMW Group - Technologie CFK: Prüfvorschrift PA00111, Dec. 2012.
- [164] N. N, Flachbettscanner WideTEK 25 für Farbscans im Format bis DIN A2. Available: <http://www.imageaccess.de/index.php?lang=de&page=ScannersLargeFormat25> (2012, Aug. 08).
- [165] A. Nonn, "Untersuchung der Variabilität von Kohlenstofffasergelegen und Bewertung der Wechselwirkungen mit dem RTM-Prozess," Diplomarbeit, Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen, Aachen, März, 2014.
- [166] P. Pfister, N. Tretter, T. Koppenhöfer, and M. Ecker, "Bildformate: Gegenüberstellung verschiedener Bildformate hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten," Feb. 2002.
- [167] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital image processing using MATLAB*. Natick, Mass.: Gatesmark Publ, 2009.

- [168] M. Marquart, "Bewertung der Einflussgrößen auf die Infiltrierbarkeit von multi-axialen Carbonfasergelegen," Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching, 2012.
- [169] C. Koch, "H₂O-Permeabilität: Bestimmung der gesättigten Permeabilität von Kohlenstofffasergelegen und Recycling-Materialien," BMW Group - Technologie CFK: Prüfvorschrift PA00109, Dec. 2012.
- [170] N. Adams, "Einführung in die Dynamik der Fluide: Fluidmechanik I," Skriptum zur Vorlesung, Technische Universität München, Garching, 2008.
- [171] D. R. Lide, CRC Handbook of chemistry and physics. Boca Raton, Cambridge: CRC Press, 1990.
- [172] B. Hepp, "Bestimmung der Kompressibilität von Kohlenstofffasermaterial (komplexer Versuch)," BMW Group - Labortechnik: Prüfvorschrift AA-0597, Oct. 2012.
- [173] S. Fenske, "Analyzing the influence of binder activation on the properties of carbon fiber textile preforms," Diploma Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, Garching, 2013.
- [174] B. Hepp, "Bestimmung der Kompressibilität von Kohlenstofffasermaterial (einfacher Versuch)," BMW Group - Labortechnik: Prüfvorschrift AA-0539, Oct. 2012.
- [175] C. Koch, A. Nonn, F. Maidl, T. Maurer, J. Töpker, S. Bickerton, and E. Ladstätter, "Influence of Textile Architecture by Processing Carbon Fiber based Non-Crimp Fabrics in Automotive Serial Application using High-Pressure-RTM," in Proceedings of the 17th European Conference on Composite Material: ECCM17, 2016.
- [176] L. Peters and A. Stieglitz, Gekonnte Auslegung von RTM-Werkzeugen. Werkzeugbau
- [177] M. Neitzel, P. Mitschang, and U. Breuer, Eds, Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2nd ed.
- [178] G. Gardiner, HP-RTM on the rise. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>.
- [179] O. Pätzold, "Ermittlung Binderverteilung mittels CT," BMW Group - Labortechnik: Laborbericht, 2012.
- [180] B. Chen and T. Chou, "Compaction of woven-fabric preforms: single-layer deformation," Composites Science and Technology, vol. 59, pp. 1519–1526, 1999.
- [181] B. Chen and T. Chou, "Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation," Composites Science and Technology, vol. 60, no. 12-13, pp. 2223–2231, 2000.
- [182] J. Klingele, "Produktorientierte Auswahl von Verfahren zur Vorfixierung textiler Preforms," Dissertation, ITA, RWTH Aachen, Aachen, 2014.
- [183] J. Klingele, "Auftrag und Aktivierung von Bindern," Produktions- und Fertigungstechnik, pp. 54–61, Jun. 2011.
- [184] M. Dickert and G. Ziegmann, "Influence of binder on the mechanical properties and the permeability of a non-crimp carbon fabric preform," in ECCM 15, 2012.
- [185] C.-H. Shih and L. J. Lee, "Tackification of Textile Fiber Preforms in Resin Transfer Molding," Journal of Composite Materials, vol. 35, no. 21, pp. 1954–1981, 2001.
- [186] M. Tanoglu, S. Robert, D. Heider, S. H. McKnight, V. Brachos, and J. W. Gillespie, "Effects of thermoplastic preforming binder on the properties of S2-glass

- fabric reinforced epoxy composites,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 21, pp. 187–195, 2001.
- [187] S. Hennicken and D. Broichhausen, “100-Prozent-Kontrolle statt visuelles Prüfen: Inline-Prüfung von Carbonfaser-Gelegen,” *Plastverarbeiter*, vol. 67, pp. 52–53, <http://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/2016/06/Internet-PDF-PV-2016-06-Gesamt.pdf>, Jun. 2016.
- [188] N. N, Zoltek PX35 Uni-Directional Fabrics: Technical Data Sheet. Available: <http://zoltek.com/wp-content/uploads/2011/06/PX35-Uni-Directional-Fabrics.pdf>.
- [189] N. N, Epikote Resin 06000 / Epikure Curing Agent 06130: Technical Data Sheet. Datenblatt auf Anfrage. Available: <http://www.hexion.com/am/epoxy-resins-curing-agents-modifiers/technical-data-sheets/> (2016, Aug. 01).
- [190] N. N, Araldite LT 3366: Technical Data Sheet. vormals XB 3366. Available: http://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/a_MCED5570E284BD76EE040EBCD2B6B7A1B/Your%20Industry_MCEFD19E1A181BDB8E040EBCD2B6B77C9/Auto_M304939FAF45A67B2E053DA6BEBCCDD697/files/Araldite%20LT%203366_eur_e.pdf (2017, May. 01).
- [191] E. Witten, “Composites-Marktbericht 2016: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen,” *Der GfK-Markt Europa, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe*, Nov. 2016.
- [192] T. Roberts, “Materials Technology Publications: The Carbon Fibre Industry worldwide 2011-2020: An evaluation of current markets and future supply and demand,” 2011.
- [193] J. Verrey, M. D. Wakeman, V. Michaud, and J.-A. E. Manson, “Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 9–22, 2006.
- [194] C. D. Paulaskas, C. C. Warren, C. C. Eberle, A. K. Naskar, and S. Ozcan, “Novel precursor materials and approaches for producing lower cost carbon fiber for high volume industries: excitement about the potential for using carbon fiber reinforced composites during the last few years,” in *ICCM - 17*, 2009.
- [195] B. Jahn, D. Karl, and W. Elmar, “Composites-Marktbericht 2012: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen,” *AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe; CCEV*, Oct. 2012.
- [196] J. Toepker, “Ultraschallmesstechnik zur Online-Erfassung und Analyse des Injektions- und Härtungsablaufs beim Resin Transfer Moulding,” *Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen*, 2003.
- [197] J. Hausding, “Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik - Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung,” *Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden*, 2010.
- [198] C. Ronninger, “Taschenbuch der statistischen Methoden: Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis,” 2014.
- [199] C. Kracke, A. Nonn, C. Koch, M. Nebe, E. Schmidt, S. Bickerton, T. Gries, P. Mitschang. Interaction of textile variability and flow channel distribution systems on flow front progression in the RTM process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. vol. 108, pp. 70–81, 2018.
- [200] N. Otsu, A threshold selection method from gray-level histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9 (1), S. 62-66, 1979.

A Anhang

a Datenblätter der verwendeten Materialien

Technisches Datenblatt Carbonfaser 50K ACF 50-02	 <small>A BMW Group and SGL Group Joint Venture</small>
--	---

Version: 02
Gültig ab: 17.08.2015

Kurzbeschreibung

50k ACF-50-02 ist eine PAN-basierte HT/HS Carbonfaser die bei der Herstellung von textilen Flächegebilden in hochwertigen faserverstärkten Verbundwerkstoffe für die Automobilindustrie sowie anderen industriellen Anwendungen zum Einsatz kommt.

Typische Eigenschaften

Eigenschaft	Norm	Einheit	Wert
Zugfestigkeit	ISO 10618:2004 ASTM D 4018-11	MPa	4400
E-Modul	ISO 10618:2004 ASTM D 4018-11	GPa	255
Bruchdehnung	ISO 10618:2004 ASTM D4018-11	%	1,65
ILSS	ISO 14130:1998	MPa	80
Feinheit	ISO 1889:1997	g/m	3,45
Dichte	ASTM D5550-14	g/cm ³	1,80
Sizing-Anteil (epoxidharz- kompatibel)	ASTM D4018-11	%	1,0

Verpackung

	Einheit	Norm	Wert
Abmessungen Karton	mm	-	1150 x 1150 x 1000

© Angemeldetes Warenzeichen von SGL Automotive Carbon Fibers

Diese Information basiert auf unserem derzeitigen Wissensstand und ist lediglich ein allgemeines Merkblatt über unsere Produkte und deren Verwendung. Es gilt daher nicht als Garantie für spezifische Eigenschaften der beschriebenen Produkte oder deren Eignung für eine spezielle Anwendung. Jegliche bestehenden Patentrechte sind zu beachten. Die Qualitätsgarantie für unsere Produkte erfolgt gemäß unserer „Allgemeinen Verkaufsbedingungen“.

Abb. A-1: Datenblatt C-Faser (CF-1) 50K ACF-50-02, Fa. SGL ACF [153].

Technical Datasheet

ZOLTEK™ PX35 Continuous Tow



DESCRIPTION

ZOLTEK™ PX35 continuous carbon fiber is manufactured from polyacrylonitrile (PAN) precursor. The consistency in yield and mechanical properties that are provided by large filament count strands gives the user the ability to design and manufacture composite materials with greater confidence and allows for efficient and fast buildup of carbon fiber reinforced composite structures.

ZOLTEK™ PX35 50K fibers are available with a variety of sizing formats for different composite processing methods and for compatibility with a wide range of standard resin systems. ZOLTEK™ quality focuses on spool to spool consistency yielding low coefficients of variation.

Commercial Carbon Fiber for Industrial Applications



APPLICATIONS

Wind energy, automotive, petroleum production, aviation, marine, industrial, other transportation, medical (including X-ray), sports and recreation, etc.

RECOMMENDED USE

Any article or component benefiting from the unique properties of carbon fiber composites.

MATERIAL OVERVIEW	SI	US
Tensile Strength	4,137 MPa	600 ksi
Tensile Modulus	242 GPa	35 msi
Elongation	1.5%	1.5%
Electrical Conductivity	0.00155 ohm-cm	0.00061 ohm-in
Density	1.81 g/cc	0.065 lb/in ³
Fiber Diameter	7.2 microns	0.283 mils
Carbon Content	95%	95%
Yield	267 m/kg	397 ft/lb
Textile Units	267 m/kg	33700 denier
Spool Weight	5.5 kg, 11 kg	12 lb, 24 lb
Spool Length	1,500 m, 3,000 m	1,640 yd, 3,280 yd

The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.

ZOLTEK™ PX35



ZOLTEK™ Corporation | 3101 McKelvey Road | Bridgeton, MO 63044
P: 314-291-5110 | F: 314-291-8536 | www.zoltek.com

1

Abb. A-2: Auszug aus Datenblatt C-Faser (CF-2), Zoltek™ PX35, Fa. Zoltek [154].

Technical Datasheet

ZOLTEK™ PX35 Uni-Directional Fabrics



Stitch-Bonded Uni-Directional Carbon Fabrics

DESCRIPTION

ZOLTEK™ PX35 Stitch-Bonded Uni-Directional Carbon Fabrics are produced from our ZOLTEK™ PX35 50K Continuous Tow Carbon Fiber. Unique fiber spreading techniques are utilized to obtain a wide range of UD fabric weights for a varied set of composite part applications. Quick composite part build-up is cost effectively achieved with our diverse weight range of low-cost carbon fabric products.



MATERIAL OVERVIEW	UD150	UD200	UD300	UD400	UD500	UD600	UD900V
0° Carbon ZOLTEK™ S™ PX35 50K	158	200	309	403	500	600	865
90° Glass 34 dtex	10	10	10	10	10	10	—
Polyester Veil	—	—	—	—	—	—	30
Polyester Stitch 76 dtex	6	6	6	6	6	6	5
Total Fabric Weight	182 g/m² 5.37 oz/yd²	224 g/m² 6.61 oz/yd²	333 g/m² 9.82 oz/yd²	419 g/m² 12.36 oz/yd²	516 g/m² 15.22 oz/yd²	624 g/m² 18.40 oz/yd²	900 g/m² 26.54 oz/yd²

Average Values Shown
*Epoxy resin binder available upon customer request.

FABRIC CONSTRUCTION	UD150	UD200	UD300	UD400	UD500	UD600	UD900V
Stitch Length	A variety of stitch lengths are available to meet application requirements.						
Stitch Pattern	A variety of stitch patterns are available to meet application requirements.						
Cured Thickness/Ply	.21 mm	.25 mm	.37 mm	.46 mm	.57 mm	.69 mm	1.00 mm
Roll Width	30 cm - 61 cm - 122 cm						122 cm
Roll Length	100 m				50 m		30 m

Average Values Shown

The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.

ZOLTEK™ PX35



ZOLTEK™ Corporation | 3101 McKelvey Road | Bridgeton, MO 63044
P: 314-291-5110 | F: 314-291-8536 | www.zoltek.com

Abb. A-3: Auszug aus Datenblatt UD-Gelege (NCF-2.2) Zoltek™ PX35 Uni-Directional Fabrics, Fa. Zoltek [188].

Advanced Materials
Resin XB 3585 / Hardener XB 3458
WARM CURING EPOXY SYSTEM

Resin XB 3585 (epoxy resin)
Hardener XB 3458 is an amine

APPLICATIONS	Industrial composites, repair of composites (containers, pressure vessels etc.)		
PROPERTIES	Highly reactive system for industrial composites and repair		
PROCESSING	<ul style="list-style-type: none"> Resin Transfer Moulding (RTM) Wet lay-up 		
KEY DATA	Resin XB 3585		
Aspect (visual)	clear liquid		
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3		
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	6500 - 9000		[cps]
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.20		[g/cm ³]
Flash point (ISO 2719)	> 200		[°C]
	Hardener XB 3458		
Aspect (visual)	clear to slightly yellow / red liquid		
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	190 - 250		[cps]
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.98 - 1.02		[g/cm ³]
Flash point (ISO 2719)	>102		[°C]
PROCESSING DATA			
MIX RATIO	<i>Components:</i>	<i>Parts by weight:</i>	
	Resin XB 3585	100	
	Hardener XB 3458	19	
	We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process.		
	When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.		
INITIAL MIX VISCOSITY	[°F]		[cps]
(HOEPLER, ISO 12058-1B)	at 104		450 - 550
VISCOSITY BUILD-UP	[°F]	[cps]	[min]
(HOEPLER, ISO 12058-1B)	at 104	to 500 to 1500	- 5
POT LIFE	[°F]		[min]
(TECAM, 100 ML, 65 % RH)	at 73		14 - 18
GEL TIME	[°F]		[min]
(HOT PLATE)	at 104		23 - 29
	at 140		6 - 10
	at 176		2 - 4
TYPICAL CURE CYCLES	10 min 176 °F + 20 min @ 212°F		
	Optimum properties cannot be reached with room temperature cure.		
	The optimum cure cycle has to be determined case by case depending on the processing and the economic requirements.		

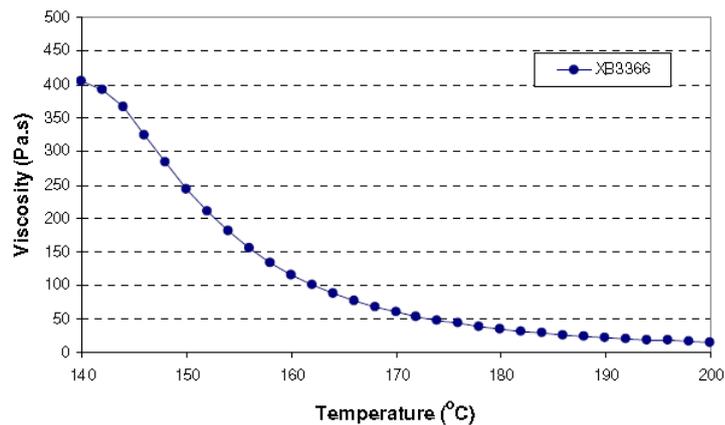
Abb. A-4: Auszug aus Datenblatt Harzsystem XB 3585 / XB 3458, Fa. Huntsman [189].

Advanced Materials

Araldite® LT 3366*

SOLID, BISPHENOL-A BASED, HIGH MOLECULAR WEIGHT EPOXY RESIN

APPLICATIONS	Binder for preforms.		
KEY DATA	Specified key data		
	Aspect (visual)	white powder	
	Epoxy index (ISO 3001)	0.34 - 0.42	[Eq/kg]
	Typical key data		
	Hydroxyl value (ISO/DIS 4629)	3.1	[Eq/kg]
Density at 25 °C (ISO 8130-3)	1.17 – 1.19	[g/cm ³]	
Flash point (ISO 2592)	≥ 215	[°C]	



	As-supplied form	powder
	Odour	none
	Shelf life (at storage temperature between 2-40 °C) (see expiry date on original container)	3 years
	Hazardous decomposition products	cf. safety data sheet
STORAGE	<p>Provided that the product described above is stored in a dry place in its original, properly closed container. At the above mentioned storage temperature it will have the shelf live indicated on the label.</p> <p>The product should not be stored exposed to direct sunlight.</p> <p>Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p>	

* In addition to the brand name product denomination may show different appendices, which allows us to differentiate between our production sites: e.g. BD = Germany, US = United States, IN = India, Cl = China, etc. These appendices are in use on packaging, transport and invoicing documents. Generally the same specifications apply for all versions. Please address any additional need for clarification to the appropriate Huntsman contact.

Abb. A-5: Auszug aus Datenblatt Bindersystem LT 3366 / XB 3366, Fa. Huntsman [190].



Technical Data Sheet

Most recent revision date: March 2012

EPIKOTE™ Resin 06000 EPIKURE™ Curing Agent 06130

Former lab code:
EPIKOTE Resin GCW-RD-0573-AT
EPIKURE Curing Agent GCW-RD-0574-AT

Product Description

EPIKOTE™ Resin 06000 is a medium viscous epoxy resin based on a blend of a bisphenol A resin (produced from bisphenol A and epichlorohydrin) and a bisphenol F resin (produced from bisphenol F and epichlorohydrin).

EPIKURE™ Curing Agent 06130 is a low viscous very fast amine hardener.

Application Areas/Suggested Uses

Low viscous resin system designed for RTM applications with excellent wetting and adhesion characteristics on fibreglass, carbon- or aramid-fibres, particularly in automotive.

Benefits

- o Non toxic
- o Bisphenol A free
- o Low viscosity
- o Longer injection time (> 1min)
- o Faster curing (2 min at 110°C)
- o Good demoulding in combination with IMR
- o Compatible with epoxy binder (EP 05390)
- o Crystallization-free
- o Good mechanical performance

Sales Specification

EPIKOTE™ Resin 06000

Property	Unit	Value	Test Method / Standard
Viscosity at 25°C	mPa-s	9000	DIN 53015
Color	Gardner	3 max	ISO 4630

® and ™ Licensed trademarks of Momentive Specialty Chemicals.
The information provided herein was believed by Momentive Specialty Chemicals ("Momentive") to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. All products supplied by Momentive are subject to Momentive's terms and conditions of sale. MOMENTIVE MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY MOMENTIVE, except that the product shall conform to Momentive's specifications. Nothing contained herein constitutes an offer for the sale of any product.

Abb. A-6: Auszug aus Datenblatt Harzsystem Epikote™ Resin 06000 und Epikure™ Curing Agent 06130, Fa. Momentive [189].

b Weiterführende Abbildungen

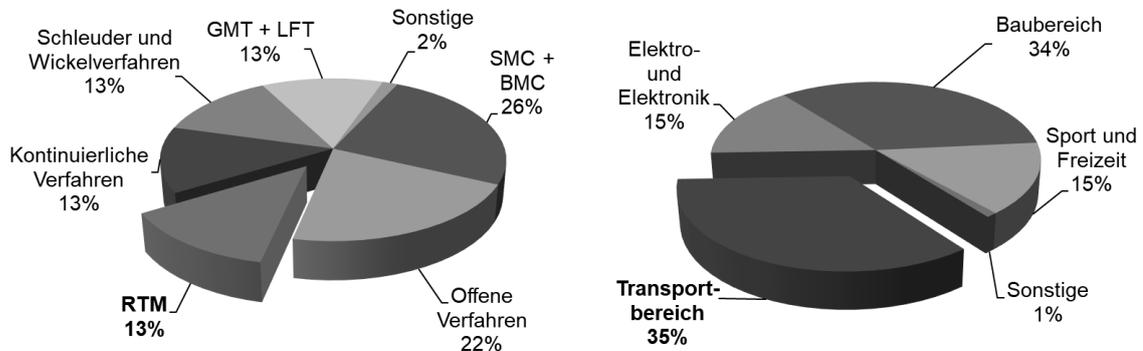


Abb. A-7: Einteilung GFK nach Herstellverfahren (links) und anwendungsbezogenem GF-Verbrauch (rechts) in Europa, in Anlehnung an [18].

Die GFK-Produktionsmenge im Jahr 2017 betrug in Europa 1,12 Millionen Tonnen. Somit stellt die Glasfaser über 95 % der Verstärkungsfasern von FVK [18]. Typische Anwendungsgebiete für GFK finden sich im Transportbereich (Pkw, Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Bootsbau, Luftfahrt), Baubereich (Leitungen, Windkraftflügel), Elektro- und Elektronik, Sport und Freizeit u. a., wie Abb. A-7 (rechts) auf Basis der Produktionsmenge 2017 in Europa veranschaulicht. Dabei dominieren die Anwendungen mittels duroplastischer Matrix bei flächigen Bauteilen. Eingesetzte Verfahren sind SMC- und BMC-Pressverfahren (Sheet Molding bzw. Bulk Molding Compound), kontinuierliche Verfahren (vornehmlich Pultrusion) und Schleuder- bzw. Wickelverfahren für Rohr- und Tankbauteile. Größere geometrische Freizügigkeit bieten die sog. offenen Verfahren (Handlaminieren oder Faserspritzen). Falls zusätzlich kürzere Produktionszyklen notwendig sind, kommt das RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) zum Einsatz. Die auf thermoplastischer Matrix basierenden Verfahren sind durch die glasmatten- oder langfaserverstärkten Thermoplaste (GMT bzw. LFT) vertreten, siehe Abb. A-7 (links). [2, 18, 191-192]

Als Matrizen werden, wie oben angedeutet, je nach Anwendungsfall duroplastische oder thermoplastische Kunststoffe (selten auch Elastomere) eingesetzt. Bewährte Systeme sind Epoxidharze und Polyesterharze auf der einen Seite, Polyamid, Polypropylen, Polyethylen und Polyvinylchlorid u. a. auf der anderen Seite [56]. Die Kosten für die Matrixwerkstoffe sind im Vergleich zu den Rohmaterialpreisen der Faser-(Halbzeuge) vernachlässigbar. So entfallen allein auf das textile Halbzeug etwa 50 % der Gesamtproduktionskosten. [193-194]

Ein Überblick über mögliche Prozessrouten zur Herstellung von FVK wird weiterhin im Anhang in Abb. A-9 gegeben.

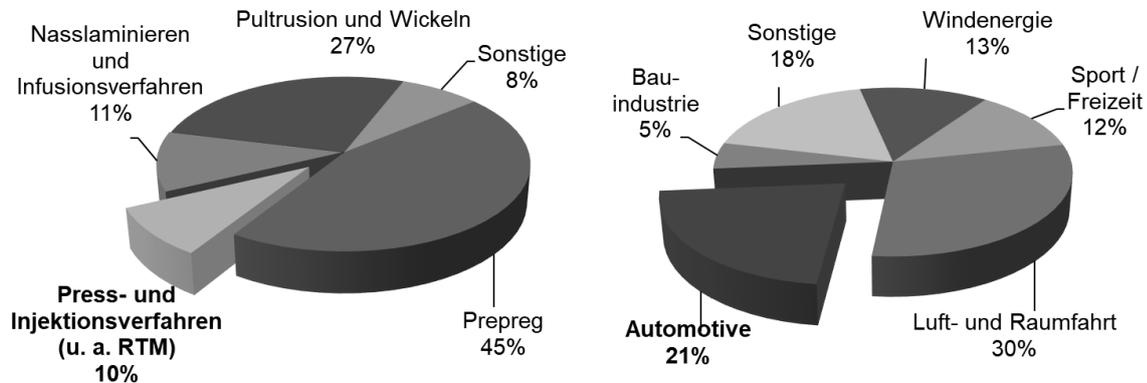


Abb. A-8: Einteilung CFK nach Herstellverfahren (links) und anwendungsbezogenem CFK-Verbrauch (rechts), in Anlehnung an [2, 17].

Abb. A-8 stellt den globalen, anwendungsbezogenen CFK-Verbrauch auf Basis der weltweiten Produktionsmenge im Jahr 2017 dar, (links) aufgeteilt nach Herstellverfahren und (rechts) kategorisiert nach Anwendungen.

Sind hohe gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften für strukturelle, sicherheitsrelevante Anwendungen gefordert, finden anstelle von Glasfasern überwiegend Kohlenstofffasern (CF) als Verstärkung Anwendung. Abhängig vom Produktionsverfahren für die angestrebte CF-Komponente wird die Faser direkt oder als textiles Faserhalbzeug eingesetzt. Der weltweite CFK-Bedarf betrug im Jahr 2017 geschätzte 112.000 Tonnen. [18], [2]

Das Prepreg-Verfahren dominiert dabei den globalen C-Faser-Verbrauch. Zusammen mit den Infusions- und Injektionsverfahren (u. a.) verarbeiten beide Verfahren als Eingangserzeugnisse die flächigen Faserhalbzeuge Gelege, Vliesstoffe, Gewebe, Matten, aber auch Gesticke oder Geflechte. Ein Überblick über typische textile Halbzeuge ist im Anhang Abb. A-10 dargestellt.

Die Fertigungsprozesse Wickeln und Pultrusion verarbeiten C-Fasern direkt als Garn (oder „Tow“). Faserkurzschnitt wird im Bereich verstärkter Kunststoff-Compounds (für Sport, Freizeit etc.), SMC oder der Bauindustrie u. a. eingesetzt. [2, 17, 195]

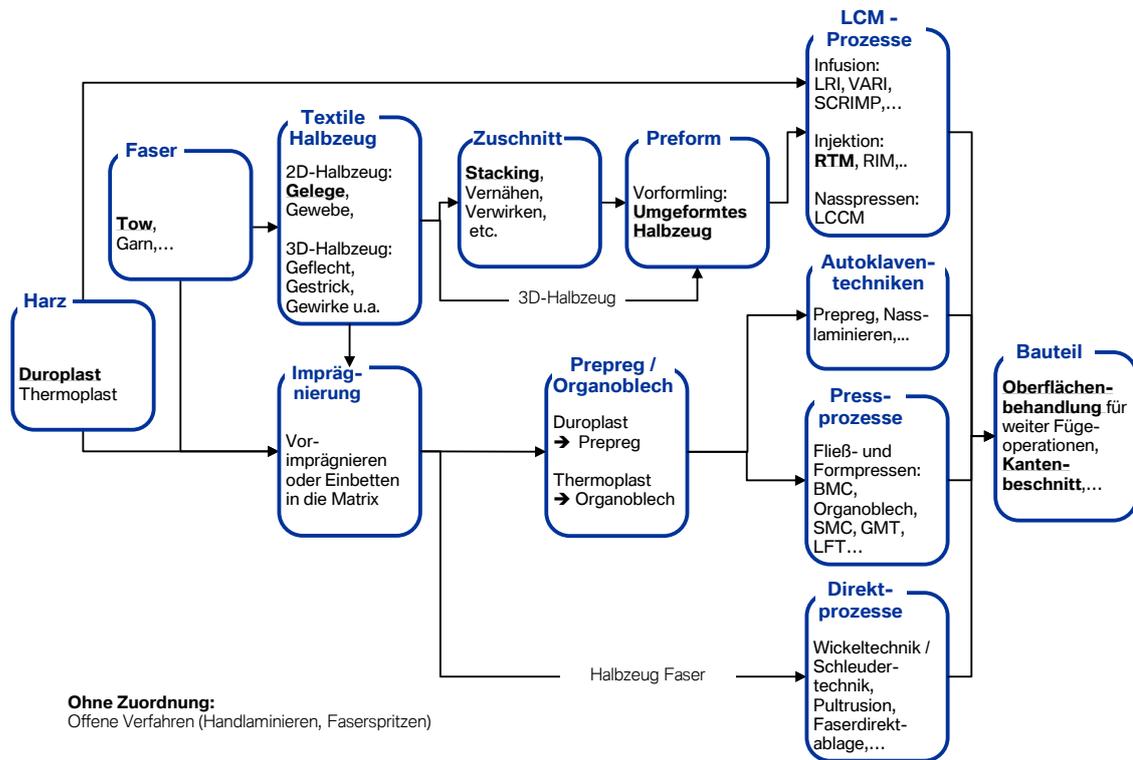


Abb. A-9: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Prozessrouten von FVK.

Unzählige RTM-Varianten, zumindest im Hinblick auf deren Namensgebung, sind in der Literatur bekannt: HS-RTM (Highspeed RTM), CRTM (Continuous RTM, kontinuierlicher Prozess der Hexcel Composites GmbH), SRTM (Structural RTM), VARTM (Vacuum Assisted RTM, Fa. Hardcore), VRTM (analog VARTM, Fa. Texas Instruments), ARTM (Advanced RTM – Injektion bei noch nicht vollständig geschlossenem Werkzeug, d. h. Spaltinjektion), DPRTM, FRTM (Flexible RTM, Verwendung zweier Diaphragmen als Werkzeughälften), TE-RTM (thermal-Expansion RTM, RTM mit expandierendem Kern für Hohlteile), RTM-light (RTM mit flexiblem Oberwerkzeug), u. v. m. [25, 64, 196]

Allen gemein ist die Verwendung zweier beliebig ausgeführter Werkzeughälften. Als Verstärkungstextil dient zumeist ein (oder mehrere) aus CF-Gelegen oder Geweben hergestellter Preformling. Die Injektion erfolgt bei geschlossenem Werkzeug, wobei durch die Variation der Kavitätshöhe, Bauteildicke und Faservolumengehalt (FVG) eingestellt werden können. Anschließend erfolgen die Entformung und nachgelagert die Aushärtung.

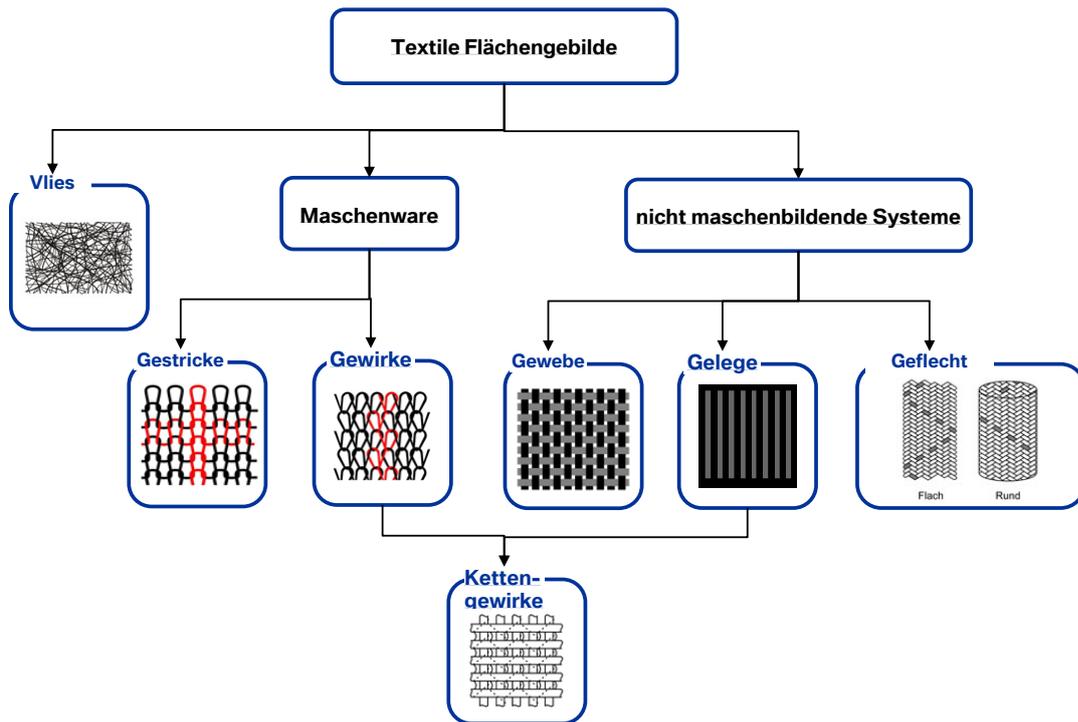


Abb. A- 10: Einteilung textiler Flächengebilde in Anlehnung an [64, 48].

Die Einteilung der gängigen Wirkmaschinen ist uneinheitlich und abhängig vom Hersteller, dem verwendeten Prozess und dem entstehenden Produkt. Grundsätzlicher Oberbegriff ist dabei die Kettenwirkmaschine, die sich wiederum in fließendem Übergang in Kettenwirkautomaten, Raschelmashinen, Nähwirkmaschinen etc. aufteilt. [197, 49]

Dementsprechend inkonsistent wie die Bezeichnung der Kettenwirkmaschinen ist die Namensgebung des durch diese Maschinen entstandenen Textils selbst. Bereits in Kap. 1.1 wurde die Bezeichnung NCF als Gelege vorgestellt. Dies beinhaltet unidirektionale, biaxiale oder multiaxiale Gelege (UDG, BAG, MAG). Diese Bezeichnung gibt jedoch erst mit dem Hinweis auf den Typ der Lagenverbindung die exakte Beschreibung des Textils wieder. So existieren die Begriffe Multiaxial Warp Knit (MWK), Biaxial- oder Multiaxialgewirk, verstärktes Gestick, nähgewirktes Gelege (NWG), verwirktes multiaxiales Gelege (WIMAG) oder einfach nur verwirktes Gelege. Das eingesetzte Grundmaterial wird aber auch hier nicht beschrieben [197]

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird der Begriff CF-NCF, also carbonfaserverstärktes Non-Crimp Fabric verwendet. Das Carbon bildet die vorgelegten Fadenschichten, die durch Maschenbildung eines Hilfsfadens in das Gewirke eingebunden werden. In der Folge werden die Begriffe CF-NCF oder nur Gelege oder NCF synonym benutzt, und nur wenn zum Verständnis notwendig detailliert beschrieben.

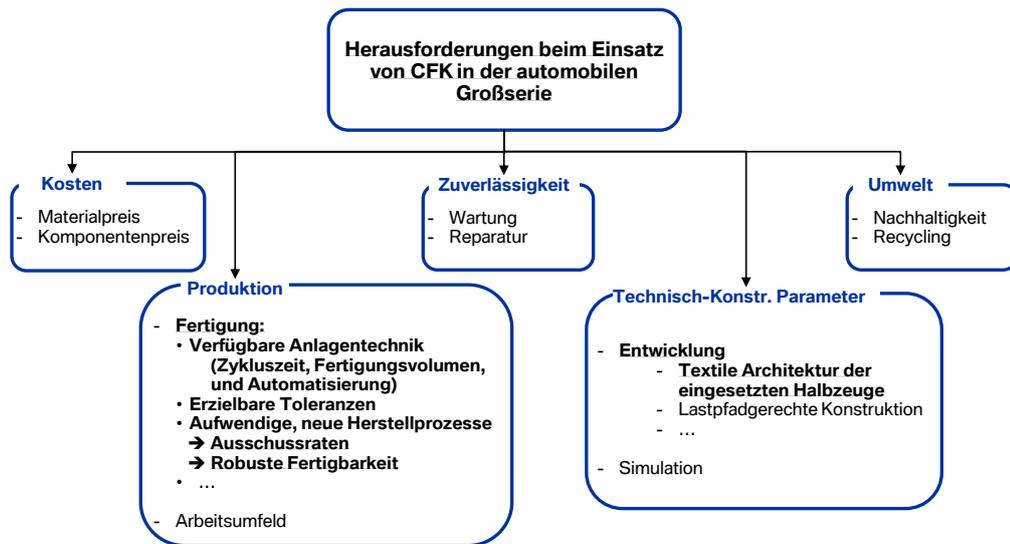


Abb. A-11: Schematische Darstellung der Herausforderungen bei der CFK-Verarbeitung im automobilen Umfeld [1, 3-4, 20, 25-30].

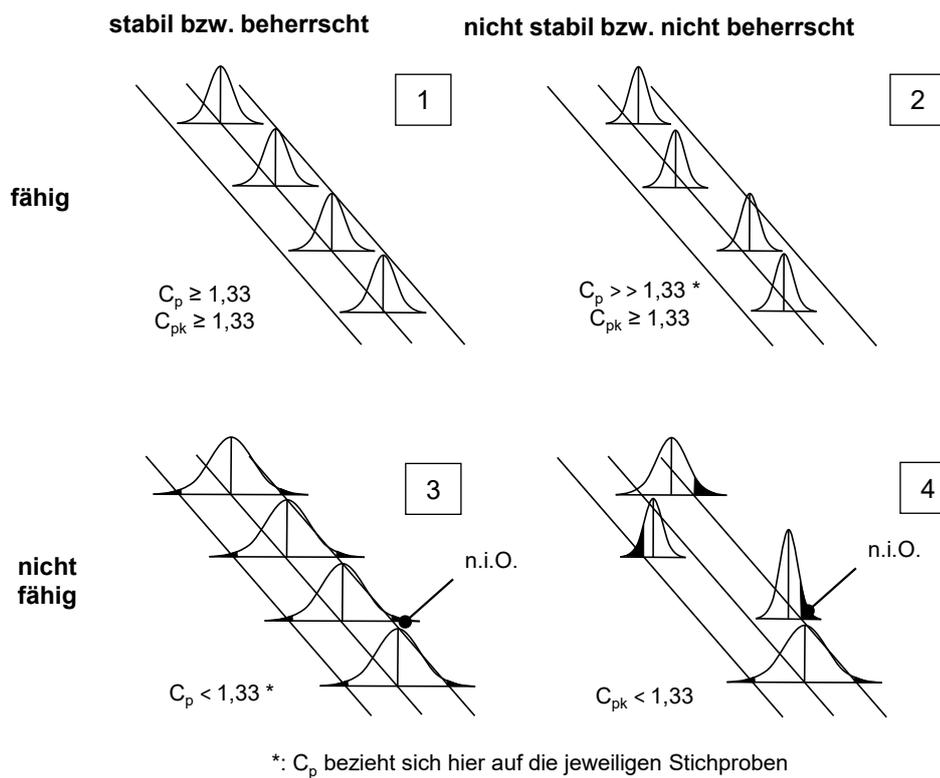


Abb. A-12: Prinzip des fähigen und stabilen Prozesses in Anlehnung an [198].

Die Gaußkurven stellen die jeweiligen Stichproben dar, eingefasst von den Prozessgrenzen: Bsp. (1) ist fähig und stabil, d.h. robust, (2) ist fähig, aber nicht stabil, (3) ist stabil, aber nicht fähig und (4) ist weder stabil noch fähig. Bei (3) und (4) kommt es zu Ausschuss (n.i.O.). Der Sachverhalt spiegelt sich in den jeweiligen cp und cpk-Werten wider.

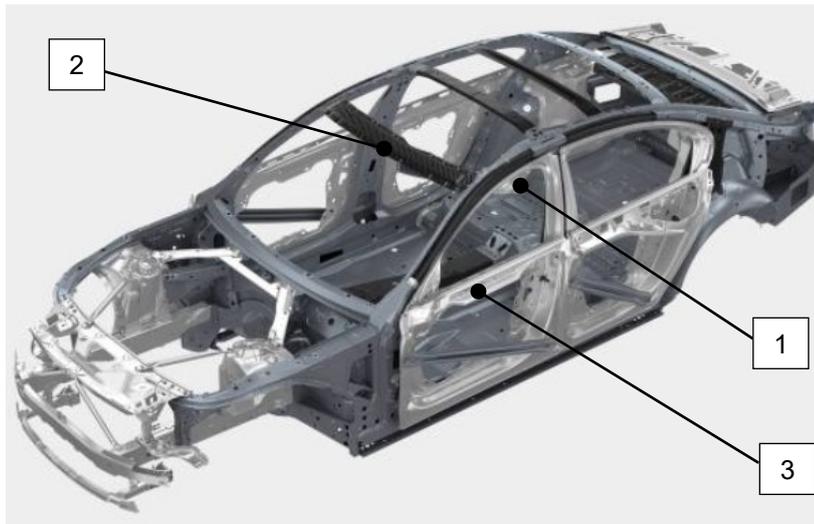


Abb. A-13: Karosseriestruktur der BMW 7er Baureihe (G11/G12, 2015) mit Carbon Core™ [22].

Zur Fertigung der CFK-Komponenten wird u. a. das RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) mit duroplastischer Matrix eingesetzt. Im Dachrahmen (1) befindet sich der sog. Carbon Core™. Dieser wird durch weitere CFK-Komponenten wie Windlauf (2) und Mittelunnel (3) u. a. ergänzt.

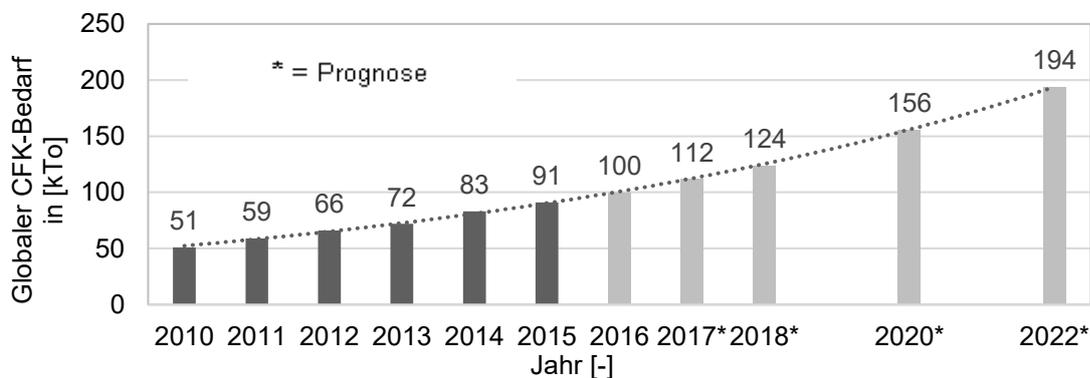


Abb. A-14: Globale CFK-Bedarfsentwicklung von 2010 bis 2020 nach [17].

Der Automotivbereich ist global betrachtet neben der Luft- und Raumfahrt der zweitgrößte Anwendungssektor von CFK [2, 17]. Aktuell zeichnet sich der CFK-Markt durch eine jährliche Wachstumsrate von 9 bis 12 % aus: Damit diese positive Entwicklung weiterhin auf diesem Niveau bleibt und die Prognose Realität wird, muss, bezogen auf den Automobilssektor, die Wirtschaftlichkeit dieses Werkstoffes weiter vorangetrieben werden. Erst dann kann der Übertrag von CFK-Anwendungen aus dem Luxus-, Sportwagen und Nischensegment auf weitere Großserienmodelle wie z. B. BMW 3er (F30, 2012) mit 409.005 Fahrzeugen im Jahr (2017 [21]) gelingen. Dazu sind eine Vielzahl an Herausforderungen aus unterschiedlichen Disziplinen, die eng miteinander verknüpft sind, zu meistern, wie z. B.: Kostenfaktoren (Material- und Komponentenpreise), Anforderungen im Produktionssystem (Automatisierungsgrad, erzielbare Zykluszeiten und Toleranzen etc.) und technisch-konstruktive Parameter (Fahrzeugarchitektur, aber auch die Architektur der textilen Halbzeuge etc.) u. a. [1, 3, 4, 20, 25-30], siehe auch Abb. A-11 im Anhang.

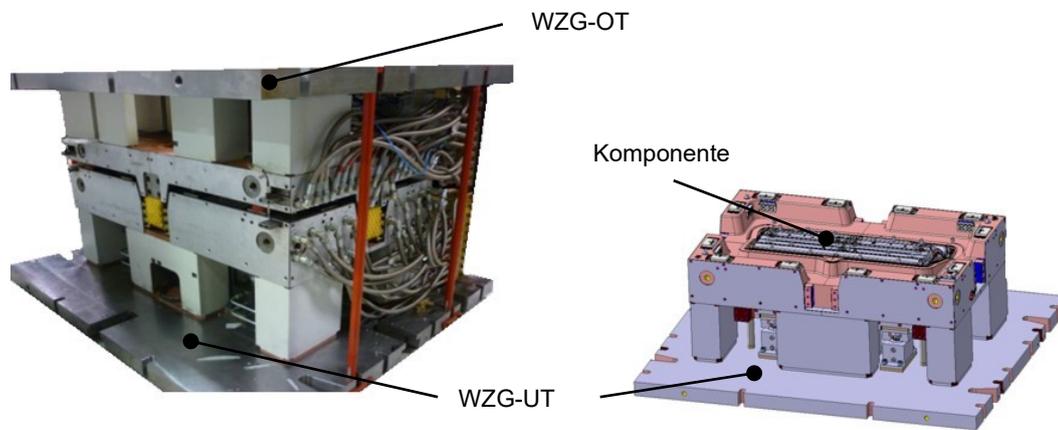


Abb. A-15: Ansicht Bodenwerkzeug.

Dargestellt ist die links das geschlossene und rechts das geöffnete Bodenwerkzeug. Werkzeugoberenteil (WZG-OT) und Werkzeugunterteil (WZG-UT) sind gekennzeichnet.

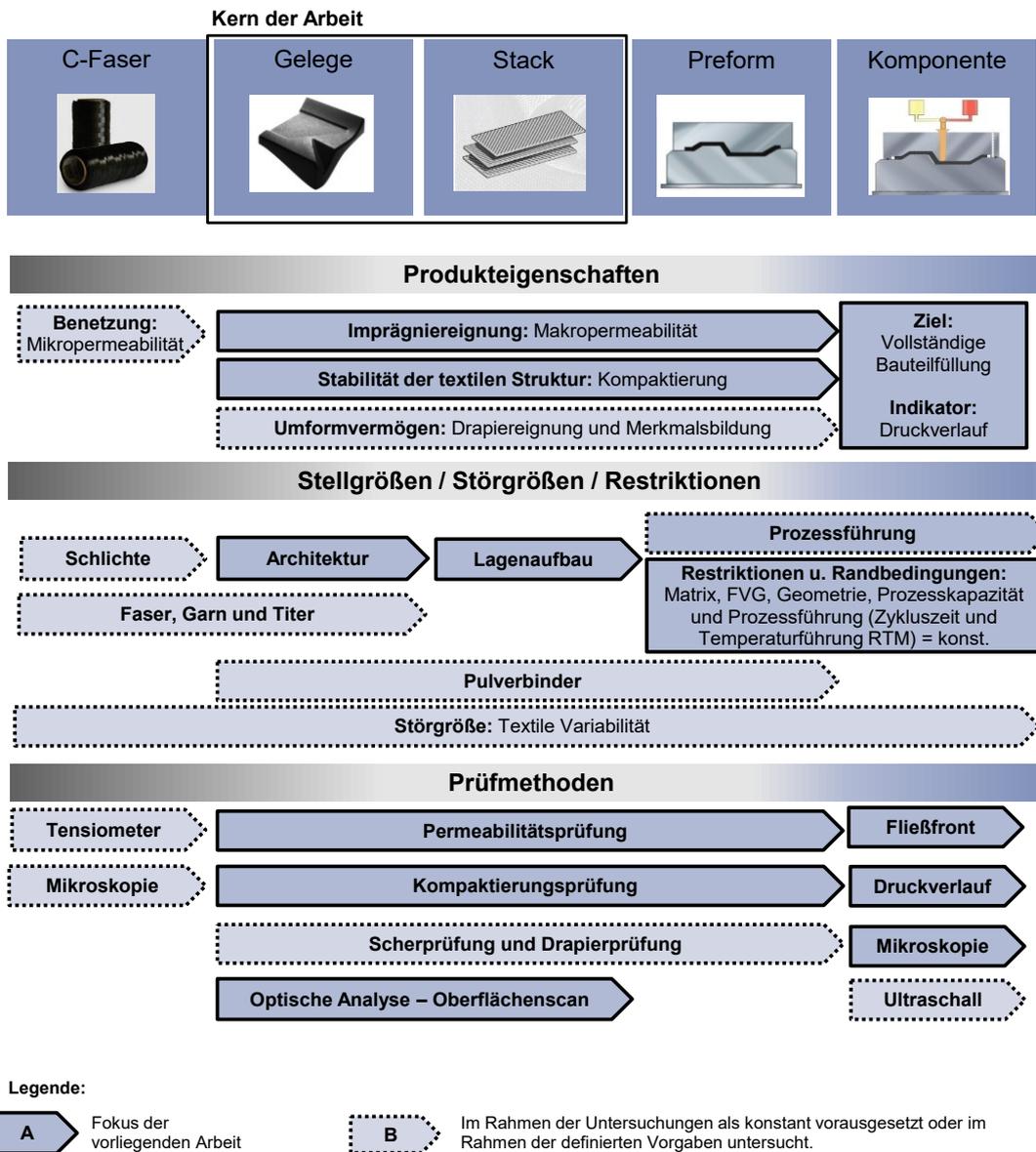


Abb. A-16: Produkteigenschaften, Stellgrößen und Prüfmethoden von CF-NCF.

Dargestellt ist die Zuordnung der relevanten Produkteigenschaften des Faserhalbzeugs zum jeweiligen Verarbeitungsschritt der untersuchten Prozesskette, die das Injektionsergebnis beeinflussen. Ferner sind die „Stellhebel“ und „Störgrößen“ abgebildet die das Eigenschaftsprofil beeinflussen können. Darunter sind ebenfalls die korrespondierenden Prüfmethoden visualisiert. Neben dem Fokus der vorliegenden Arbeit sind weiterhin Parameter abgebildet, die an anderer Stelle untersucht werden müssen.

c Experimentelle Daten

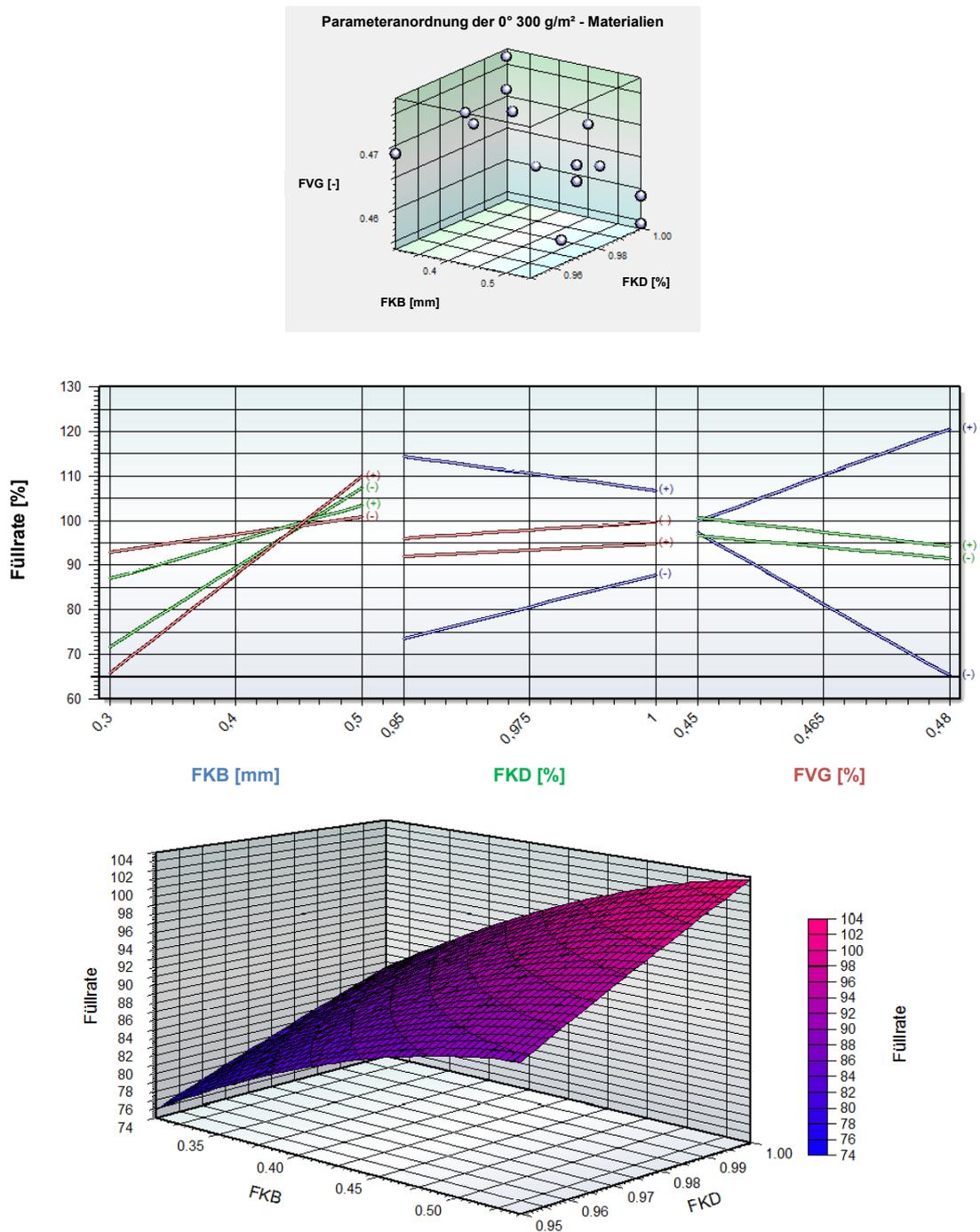


Abb. A-17: Füllrate im MD-RTM in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt für 0° 300 g/m²-Materialien.
Parameteranordnung (oben), Wechselwirkungen der Parameter (mitte) und Abhängigkeit der Parameter von der Zielgröße bei einem FVG von 46,5 % (unten).

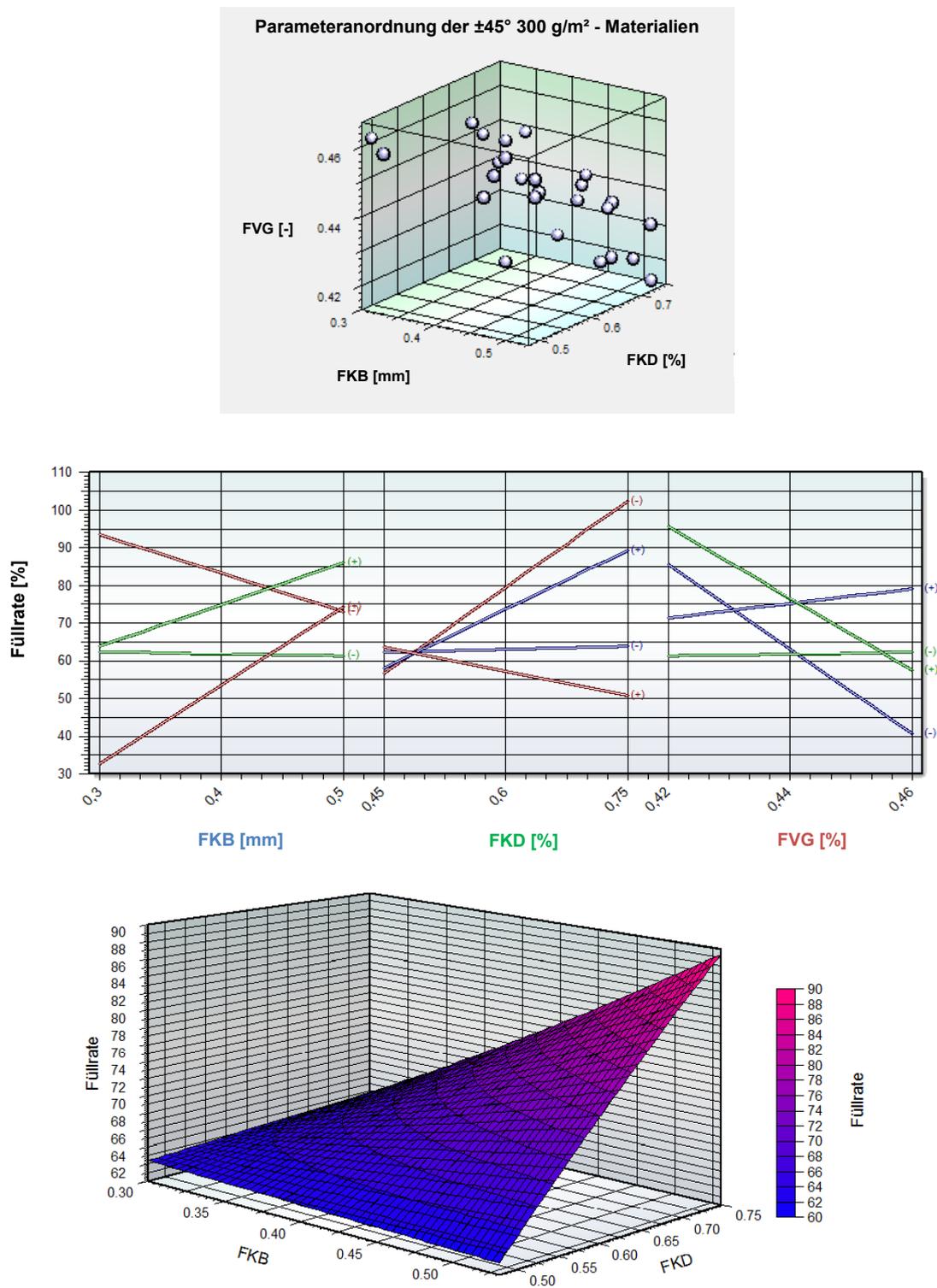


Abb. A-18: Füllrate im MD-RTM in Abhängigkeit der Parameter Fließkanalbreite, Fließkanaldurchgängigkeit und Faservolumengehalt für $\pm 45^\circ$ 300 g/m²-Materialien. Parameteranordnung (oben), Wechselwirkungen der einzelnen Parameter (mitte) und Abhängigkeit der Parameter von der Zielgröße bei einem FVG von 44 % (unten).

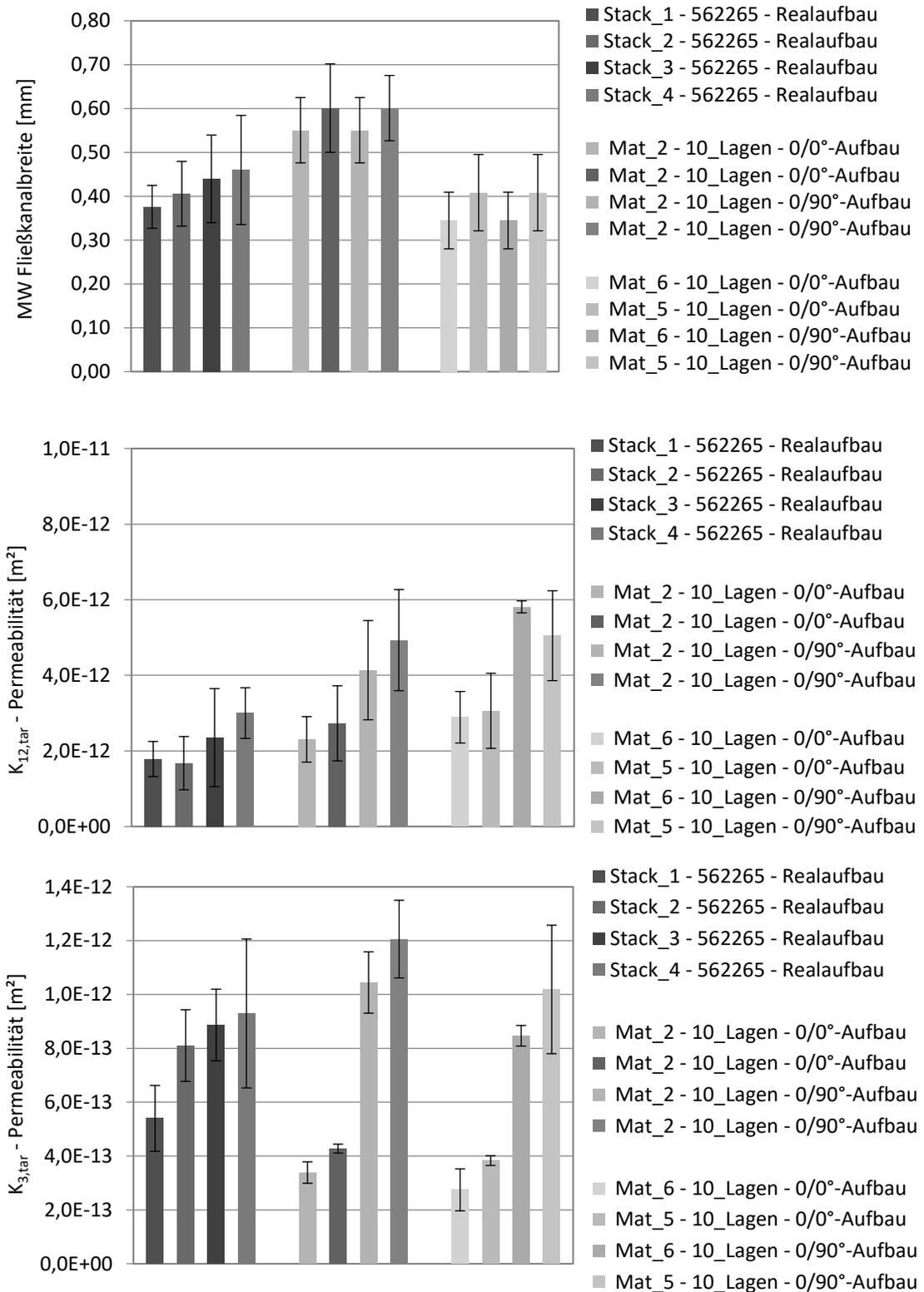


Abb. A-19: Einfluss von Fließkanalbreite und Lagenaufbau auf die Permeabilität K_{12} u. K_3 .
 Die eingesetzten Materialien sind: NCF-2.4, NCF-5.2 und NCF-6.2. $V_f = 0.53$.

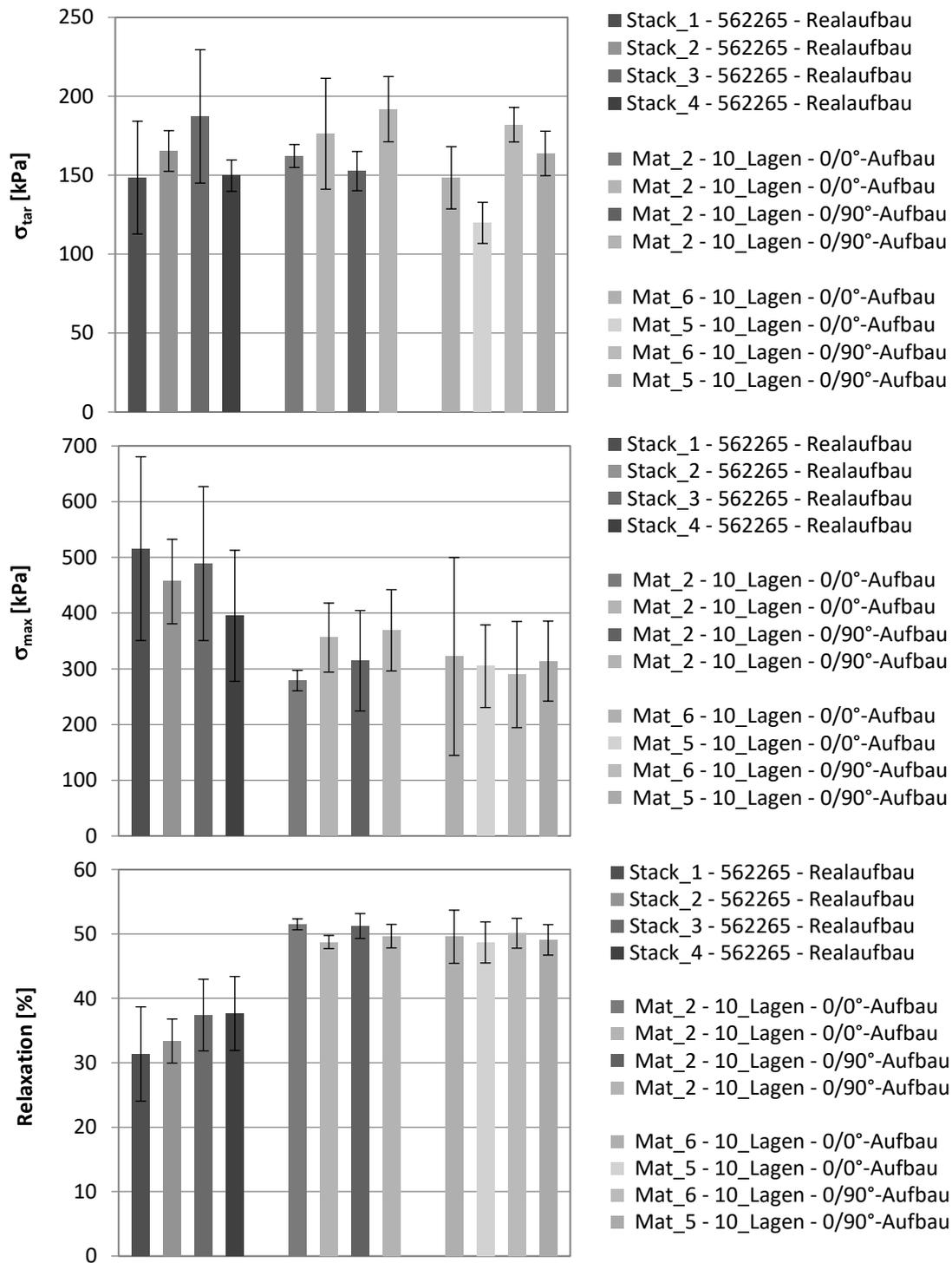


Abb. A-20: Einfluss von Fließkanalbreite und Lagenaufbau auf σ_{tar} , σ_{max} und σ_{rel} .

Die eingesetzten Materialien, Fließkanalbreiten und V_f sind Abb. A-19 zu entnehmen.

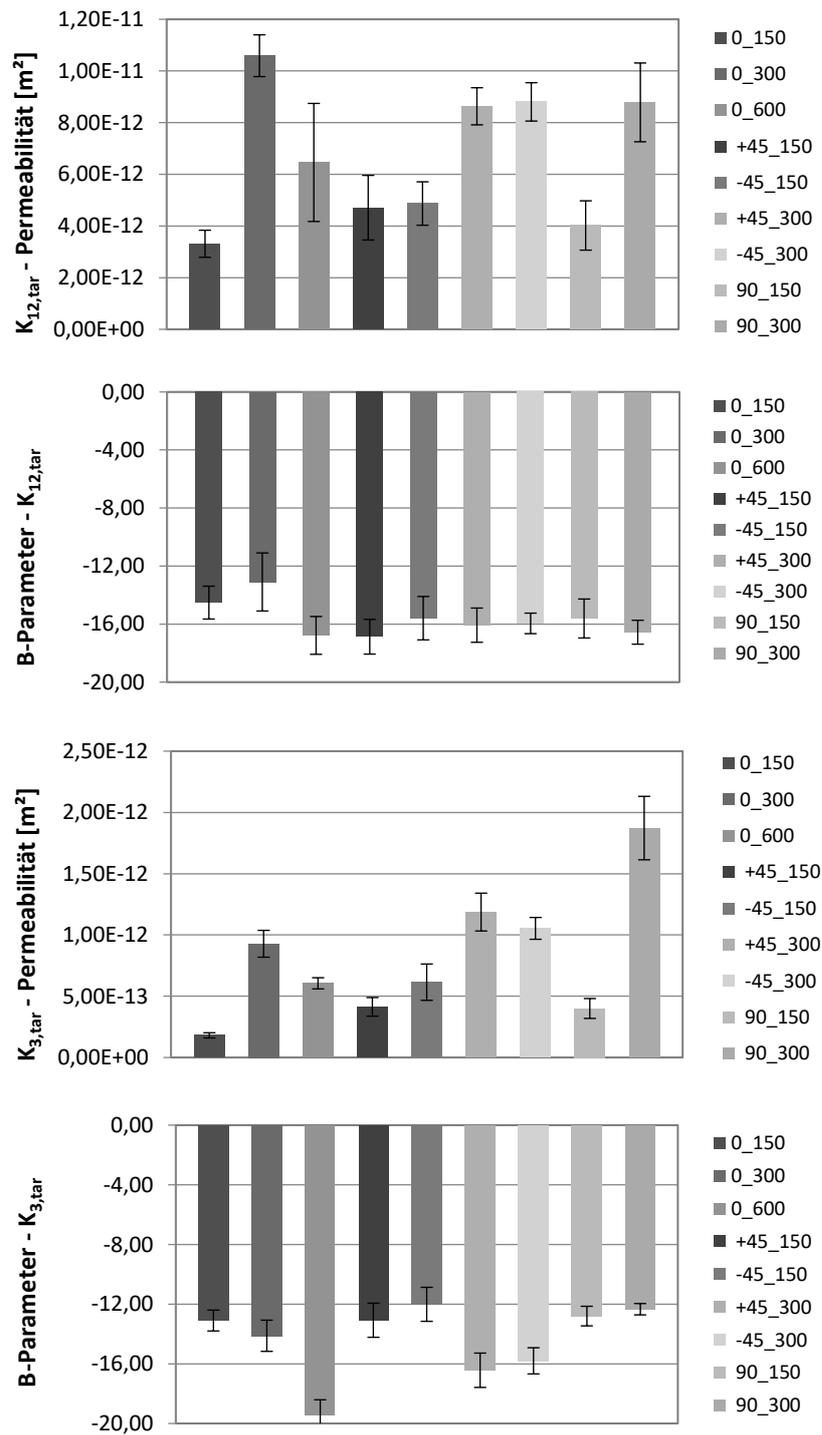


Abb. A-21: Gesättigte Permeabilität K_{12} , K_3 und B-Parameter bei $V_{f,tar} = 53\%$ unterschiedlicher textiler Architekturen.

Eingesetzte Materialien: NCF-1.1, NCF-2.4, NCF-3.2, NCF-4.2, NCF-5.2, NCF-6.2, NCF-7.2 und NCF-8.2.

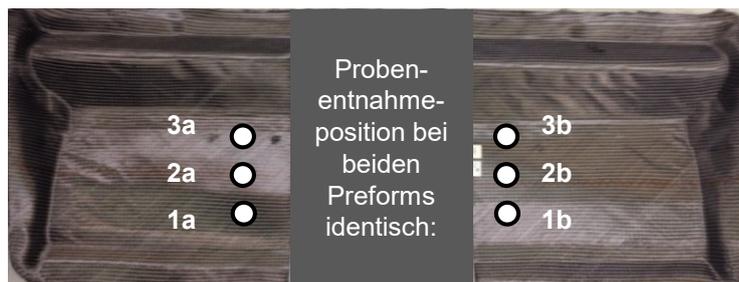
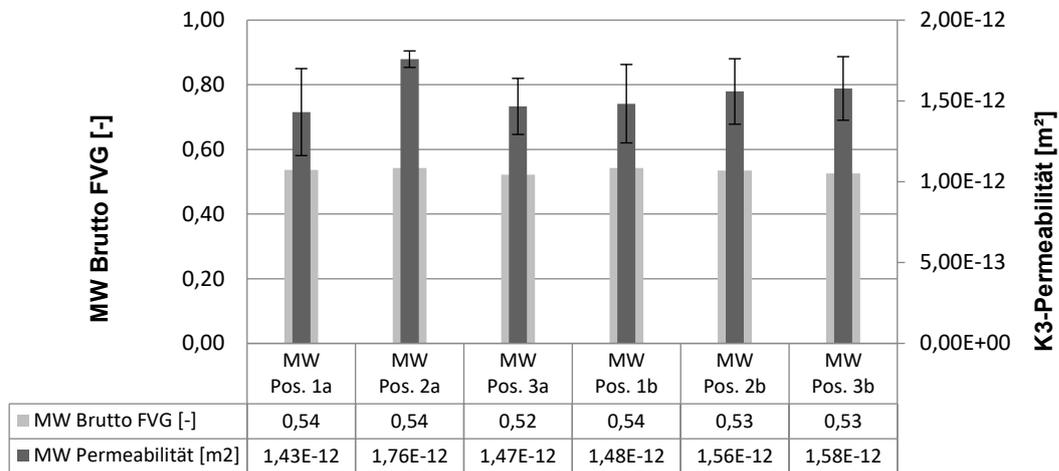
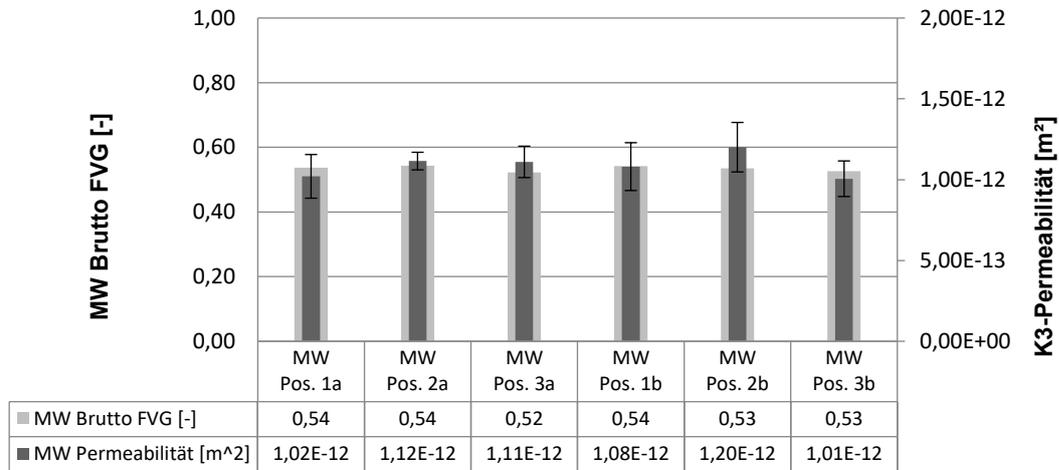


Abb. A-22: Einfluss des Preformspalts auf die Permeabilität K_3 .

„Ohne“ Preformspalt – „Überpressen“ (oben), „mit“ Preformspalt – „Unterpressen“ (mitte) und Probenentnahmeposition (unten). Mittelwert bezieht sich auf vier untersuchte Preforms.

B Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge

- [K1] C. Koch, A. Nonn, F. Maidl, T. Maurer, J. Töpker, S. Bickerton, E. Ladstaetter, Influence of textile architecture by processing carbon fiber based non-crimp fabric in automotive serial application using high-pressure-RTM. *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials - ECCM17*, Munich, June 26-30 2016.
- [K2] A. Nonn, C. Koch, T. Maurer, S. Bickerton, C. Greb, T. Gries, Investigation into the Variability of Carbon Fiber Non-Crimp Fabrics and its Influence on the RTM-Process, *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials - ECCM17*, Munich, June 26-30 2016.
- [K3] C. Koch, J. Töpker, S. Bickerton, K. Drechsler, C. Eisenhauer, Anforderungen an Messsysteme bei der Verarbeitung von Kohlenstofffasern zum CFK in der automobilen Serie. *Proceedings of the 6th Aachen-Dresden International Textile Conference*, Dresden, November 29-30 2012.
- [K4] C. Koch, Wirkzusammenhänge und deren Messbarkeit bei der Verarbeitung von C-Faser-Textilien zum CFK. *Materialica*, Munich, October 25 2012.

Zeitschriftenartikel

- [Z1] C. Kracke, A. Nonn, C. Koch, M. Nebe, E. Schmidt, S. Bickerton, T. Gries, P. Mitschang. Interaction of textile variability and flow channel distribution systems on flow front progression in the RTM process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. vol. 108, pp. 70–81, 2018.

Patente

- [P1] N. Schweizer, C. Koch, J. Eschl, Verfahren zur Herstellung eines Faser-Halbzeugs mit lokal definierter Permeabilität. Number 102014211016. November 26 2015.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [Z1], [K1], [K2], [K3], [P1]

C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Tätigkeit bei der BMW AG wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites die Betreuung der nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten unterstützt.

- [S1] M. Marquart, Bewertung der Einflussgrößen auf die Infiltrierbarkeit von multiaxialen Carbonfaser-Gelegen, nicht-öffentliche Diplomarbeit in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites, TUM, 2012 gesperrt bis 2022.
- [S2] S. Hofer, Analyse der prozesstechnischen Einflussfaktoren auf den Drapierprozess von Carbonfaser-Gelegen, nicht-öffentliche Diplomarbeit in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites, TUM, 2013 gesperrt bis 2023.

In Zusammenarbeit mit Prof. Simon Bickerton (University of Auckland) und seiner Tätigkeit in der Technologie CFK der BMW AG entstanden folgende Arbeiten, die vom Lehrstuhl für Carbon Composites betreut wurden und Eingang in diese Arbeit gefunden haben.

- [S3] S. Fenske, Analyzing the influence of binder activation on the properties of carbon fiber textile preforms, nicht-öffentliche Masterarbeit in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites, TUM, 2012 gesperrt bis 2022.
- [S4] S. Stanglmeier, Monitoring the Compaction Response and Permeability of Carbon Fibre Textiles for Automotive Applications, nicht-öffentliche Masterarbeit in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites, TUM, 2013 gesperrt bis 2018.

Weitere studentische Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen betreut und realisiert:

- [S5] E. Brinkmann, Konzeptionierung und Umsetzung einer RTM-Prozesskette zur Evaluierung von modularen Rapid-Tooling Werkzeugeinsätzen, nicht-öffentliche Diplomarbeit in Kooperation mit dem Institut für Kunststoff Verarbeitung, RWTH, 2013 gesperrt bis 2023.
- [S6] A. Nonn, Untersuchung der Variabilität von Kohlenstofffasergelegen und Bewertung der Wechselwirkungen mit dem RTM-Prozess, nicht-öffentliche Diplomarbeit in Kooperation mit dem Institut für Textiltechnik, RWTH, 2014 gesperrt bis 2024.
- [S7] H. Kallerhoff, Entwicklung eines Analysetools zur Klassifizierung und Kategorisierung nacharbeitsrelevanter Merkmale von CFK-Komponenten in der automobilen Großserienproduktion, nicht-öffentliche Bachelorarbeit in Kooperation mit dem Institut für Textiltechnik, RWTH, 2016 gesperrt bis 2021.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [S1], [S2], [S3], [S4], [S5], [S6].