

**Empirische Charakterisierung und Modellierung des
Imprägnierprozesses lokal verstärkter Kohlenstofffaserhalbzeuge
im RTM- und Nasspress-Verfahren für die Großserie**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
an der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie
genehmigte

Dissertation

von
Stefan Josef Stanglmaier M.Sc.
aus Mainburg

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Prof. Lothar Kroll

Tag der mündl. Prüfung: 23.02.2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im ProMotion-Doktoranden-Programm der BMW Group im Bereich der Technologieentwicklung CFK am Werkstandort Landshut.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Frank Henning für die Förderung der Arbeit, die Möglichkeit zu selbstständigem, eigenverantwortlichem Arbeiten und das mir stets entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr. Lothar Kroll danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Zusätzlich gilt mein Dank der Projektleitung bei der BMW Group, den Herren Dr. Jochen Kopp, Dr. Thomas Wolff, Dr. Wolfram Reuter, Dr. Jan Hodde, Herrn Hans-Peter Lang und Herrn Andreas Repper für die hervorragende Unterstützung, das Interesse an der Arbeit und die durchgängige Ermöglichung der umfangreichen Untersuchungen.

Meinen Kollegen bei der BMW Group danke ich für die gute und kollegiale Arbeitsatmosphäre und die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen im Technikum sowie im Labor. Mein besonderer Dank gilt Frau Petra Lex, Frau Elke Parzl, Frau Katrin Röckl, Herrn Maximilian Marquart, Herrn Christoph Kracke, Herrn Markus Dix, Herrn Dr. Johannes Eschl, Herrn Thomas Miadowitz und Herrn Dominic Krebs.

Weiterer Dank gilt den von mir betreuten Studenten, die mit ihren Abschlussarbeiten einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Herrn Dr. Bernd Thoma, Herrn Dr. Raman Chaudhari und Herrn Dr. Olaf Helms danke ich für den intensiven wissenschaftlichen Austausch sowie die Korrekturen diverser Veröffentlichungsdokumente.

Von Herzen danke ich zudem meinen Eltern, die mich stets unterstützt, gefördert und gestärkt haben. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Caroline für das entgegengebrachte Verständnis und die Geduld während der Erstellung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Aufgrund steigender gesetzlicher Anforderungen hinsichtlich CO₂-Emissionen und zunehmendem Umweltbewusstsein der Kunden sind Automobilhersteller bestrebt, neue Mobilitäts- und Fahrzeugkonzepte auf dem Markt zu etablieren. Dementsprechend richten sie sich strategisch auf die Entwicklung neuer Architekturen aus, weil die gesetzten Ziele ausschließlich durch Weiterentwicklungen konventioneller Konzepte mit Verbrennungsmotoren nicht erreicht werden können. Neben Hybrid- und Elektroantrieben liegt der Entwicklungsfokus insbesondere im Leichtbausegment. In diesem Zusammenhang sollen insbesondere Strukturkomponenten der Karosserie durch Leichtbaumaßnahmen optimiert werden, weil die Karosserie eines Fahrzeugs mit einem Gewichtsanteil von circa 40% das größte Einsparpotential bietet. So sind mit strukturellen CFK-Komponenten bereits Fahrzeuge verschiedener Hersteller, wie auch der i3 und i8 der BMW Group auf dem Markt. Die in diesen Modellen verbauten CFK-Komponenten werden vorwiegend in großserienadäquaten Technologien, wie dem Resin Transfer Moulding und dem Nasspressen, aus flächigen textilen Halbzeugen einheitlicher Wandstärke gefertigt. Im Rahmen dieser Fahrzeugprojekte sind bereits die Bauteilherstellung aus flächigen textilen Halbzeugen auch aus konfektionierten Vorformlingen in der Großserienfertigung etabliert.

Im Gegensatz zur Herstellung von CFK-Komponenten aus flächigen textilen Halbzeugen in den beschriebenen Großserienprozessen, werden in der Luft- und Raumfahrt sowie in anderen Anwendungen in Kleinserien Faser-Kunststoff-Verbund-Komponenten mit lastpfadgerecht applizierten, lokalen Verstärkungen gefertigt. Um für Hochleistungsverbunde die hervorragenden gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs bestmöglich nutzen zu können, werden die Komponenten mit lokalen Verstärkungen in Manufakturprozessen hergestellt. Dies ermöglicht eine Minimierung der Bauteilkosten und eine maximale Nutzung des Leichtbaupotentials.

Zur Optimierung der Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit der FKV-Bauteile für Großserienprozesse, vereint die vorliegende Arbeit die beiden genannten Zweige der FKV-Fertigung. Auf diese Weise soll die Herstellung lokal verstärkter Bauteile in den großserienadäquaten Technologien RTM und Nasspressen befähigt und die Großserienfertigung lokal verstärkter Bauteile möglich werden.

Zur Generierung der erforderlichen Grundlagen, werden die geeigneten Werkstoffe charakterisiert, der Injektionsprozess in Abhängigkeit der einflussreichsten Parameter

analysiert und die Auswirkung der beleuchteten Parameter auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Simulation lokal verstärkter Halbzeuge im Injektionsprozess und die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften lokal verstärkter Komponenten wird zudem mit empirischen Versuchen abgeglichen.

Basierend auf den daraus gezogenen Erkenntnissen werden Richtlinien für die Prozessgestaltung ebenso vorgestellt, wie für die optimale, belastungsspezifische Bauteilauslegung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften.

Abstract

Due to different conditions car manufacturers want to develop new mobility and vehicle concepts. That's why they are orienting to develop new architectures because the legislative targets are not reachable by conservative ones with combustion engines. So in addition to hybrid- und electrical power trains they are especially developing in the light weight section. Due to the fact, that a car body includes 40% of the car's weight, more and more structural components should be optimised by light weight components. Thus structural CFRP components are included in different cars, such as the i3 and the i8 of the BMW Group. The CFRP components produced in that context are mainly manufactured in the large scale relevant processes Resin Transfer Moulding and Wet Pressing based on flat preforms for the production of parts with unique thickness. Correspondingly the processes for large scale production of CFRP components from flat and assembled preforms are already established.

On the other hand in aerospace applications and other small scale use cases CFRP components with local reinforcements and non homogeneous thicknesses are established. In order to use the excellent specific mechanical properties in high end applications in manufacturing processes, the fibres are applied load specific, what reduces the costs of the produced parts and uses the light weight potential ideally. In order to achieve a maximum in resource efficiency and economy of CFRP components in large scale level, in this thesis I bring these two very important streams together. This way, the production of locally reinforced parts will be enabled for the large scale relevant production processes RTM and Wet Pressing. To generate the required basics for the production of locally reinforced CFRP components in large scale level primarily different relevant textiles become characterized and important process steps of injection analysed, depending on the most influential and relevant parameters. Afterwards the influence of these parameters on the mechanical properties of the final part will be characterized. Further the virtual analysis of the local reinforced textiles within the injection process will be occupied and compared to the results generated within the empirical analysis, to show possibilities to make the development process more efficient.

Based on the generated knowledge, instructions for the efficient production of local reinforced components will be provided concerning injection processes as well as influencing parameters on mechanical properties.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Kurzzeichenübersicht	XIII
1 Einleitung	14
1.1 Faser-Kunststoffverbunde in der Automobilindustrie	14
1.2 Motivation für lokale Verstärkungen im RTM- und Nasspress-Prozess	17
2 Ziele der Arbeit	21
3 Stand der Technik	24
3.1 Technologieketten zur Herstellung schalenförmiger FKV-Komponenten	24
3.2 Herstellung von Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden mit lokalen Verstärkungen in Kleinserien	26
3.3 Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden in großserientauglichen Technologien ohne lokale Verstärkungen	28
3.3.1 Prozesskette im Resin Transfer Moulding-Verfahren	29
3.3.2 Prozesskette im Nasspress-Verfahren	33
3.4 Eigenschaften textiler Halbzeuge	35
3.4.1 Kompaktierungswiderstand	37
3.4.2 Permeabilität	38
3.4.3 Fließfrontprogression	41
3.5 Mechanik von Faser-Kunststoff-Verbunden	43
3.5.1 Eigenschaften lokal verstärkter Lamine	45
3.5.2 Prüfmethode	47
3.5.3 Versagensmechanismen	47

4	Methodische Vorgehensweise	52
4.1	Definition der Untersuchungsschwerpunkte	52
4.2	Definition der Nomenklatur	52
4.3	Variationsparameter	53
4.3.1	Auf Ebene des Halbzeugs	54
4.3.2	Auf Ebene des Werkzeugs	58
4.4	Versuchsstruktur	64
5	Analyse des Imprägnierverhaltens	68
5.1	Kompaktierungswiderstand	68
5.1.1	Vorgehensweise	69
5.1.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	70
5.1.3	Fazit	72
5.2	Permeabilität	73
5.2.1	Vorgehensweise	73
5.2.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	75
5.2.3	Fazit	80
5.3	Fließfrontvisualisierung am Glasplattenwerkzeug	81
5.3.1	Werkzeug- und Systemtechnik	81
5.3.2	Versuchsdurchführung und Vorgehensweise	87
5.3.3	Ergebnisdarstellung und Interpretation	89
5.3.4	Fließfrontquotient zur Ergebnisquantifizierung	98
5.3.5	Fazit	102
5.4	Füllsimulation im RTM-Verfahren	104
5.4.1	Vorgehensweise	104
5.4.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	107
5.4.3	Fazit	111
5.5	Prozessdaten der Laminat- und Bauteilherstellung	112
5.5.1	Vorgehensweise	112
5.5.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	112
5.5.3	Fazit	116
5.6	Teilfüllungen	117
5.6.1	Vorgehensweise	117
5.6.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	118
5.6.3	Fazit	122

6	Laminatanalyse	123
6.1	Schnitt- und Schliffbilder	124
6.1.1	Vorgehensweise	125
6.1.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	127
6.1.3	Fazit	132
6.2	Zugprüfungen	132
6.2.1	Vorgehensweise	133
6.2.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	135
6.2.3	Fazit	143
6.3	Biegeprüfungen	144
6.3.1	Vorgehensweise	144
6.3.2	Ergebnisdarstellung und Interpretation	147
6.3.3	Fazit	159
7	Industrialisierungsmaßnahmen dreidimensionaler Bauteile	161
7.1	Richtlinienkatalog	161
7.2	Bestätigungsbauteil	165
7.2.1	Vorgehensweise	165
7.2.2	Richtlinienbestätigung	168
8	Zusammenfassung und Ausblick	173
	Abbildungsverzeichnis	177
	Tabellenverzeichnis	183
	Literaturverzeichnis	184
	Veröffentlichungen	201
	Betreute studentische Arbeiten	204
	Anhang	206

Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNG	ERKLÄRUNG
A	Probekörperfläche
B	Wert zur Charakterisierung der FVG-Abhängigkeit des Kompaktierungswiderstands und der Permeabilität
B_{Komp}	B-Wert der Kompaktierungsversuche
BMW	Bayerische Motoren Werke
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
CLT	Classical Laminate Theory
CO₂	Kohlenstoffdioxid
FB	Faserbruch
FDA	Faserdirektablage
FFQ	Fließfrontquotient
FFV	Fließfrontvisualisierung
FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
FVG	Faservolumengehalt
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GL	Grundlaminat
HD	Hochdruck
HF	Hochfest
i3	Voll elektrifiziertes Fahrzeug der BMW Group
i8	Hybridfahrzeug der BMW Group
K	Permeabilität textiler Werkstoffe
LV	Lokale Verstärkungen
m_{Prüfkörper}	Prüfkörpermasse

NCF	Non Crimp Fabrics
NP	Nasspressen
oFK	ohne Fließkanäle
P	Druck
Q	Durchflussmenge
RTM	Resin Transfer Moulding
SA	Standardabweichung
SGL ACF	SGL Automotive Carbon Fibre (Joint Venture BMW Group und SGL Group)
UD	Unidirektional
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
V_{Fasern}	Faservolumen
V_{Gesamt}	Gesamtvolumen
V_{Prüfkörper}	Prüfkörpervolumen
WDÜ	Wanddickenübergang am Rand lokaler Verstärkungen
ZFB	Zwischenfaserbruch
ZFP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZP	Zerstörende Prüfung
3D	Dreidimensional
50K	50000 Einzelfilamente

Kurzzeichenübersicht

KURZZEICHEN	ERKLÄRUNG
h	Ursprüngliche Probekörperhöhe
Δh	Probekörperkompaktierungsrate
r_A	Radius außen
r_i	Radius innen
ρ_{Textil}	Textildichte
σ_{Anfang}	Anfangsspannung
σ_{Ende}	Endspannung
σ_1	Spannung in 1-Richtung
σ_2	Spannung in 2-Richtung
σ_3	Spannung in 3-Richtung
σ_{Ziel}	Zielspannung
T	Schubspannung

1 Einleitung

Aufgrund steigender Energiekosten, zunehmendem Energiebewusstsein und Gesetzen zur Reduktion von CO₂-Emissionen sind Automobilhersteller bestrebt, neue Mobilitäts- und Fahrzeugkonzepte zu untersuchen. Angesichts dieser Rahmenbedingungen richten sie sich strategisch auf die Entwicklung neuer Architekturen aus, da die gesetzten Ziele nicht ausschließlich durch Weiterentwicklungen konventioneller Konzepte mit Verbrennungsmotoren zu erreichen sind. Entwicklungen finden sich insbesondere im Bereich von Hybrid- und Elektroantrieben sowie im Leichtbau (s. [Ach12, HMS+12, KBM11, Leo11]). Ziel ist die Reduktion des Gewichts bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, um geringere Emissionswerte zu erreichen und bei elektrifizierten Antriebskonzepten, um durch Leichtbau das zusätzliche Gewicht der schweren Akkumulatoren zu kompensieren und damit die Reichweite zu maximieren. Die Karosserie eines Fahrzeugs bietet mit 40% Gewichtsanteil das größte Einsparpotential, weshalb zunehmend Strukturkomponenten der Karosserie durch Leichtbaumaßnahmen optimiert werden (s. [EEO12, EHS10]).

1.1 Faser-Kunststoffverbunde in der Automobilindustrie

Im Rahmen neuer Fahrzeugkonzepte sind zunehmend innovative Werkstoffe erforderlich, um den angeführten Bestrebungen hinsichtlich einer Gewichtsminimierung im Automobilbau gerecht werden zu können. Werkstoffe mit großem Leichtbaupotential stellen dabei die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) dar. Sie bestehen aus Verstärkungsfasern mit hoher Steifigkeit und Festigkeit zur Lastübertragung und einer umschließenden Kunststoffmatrix zum Schutz und zur Stabilisierung der Fasern (s. [Kar04, HeM11]). FKV werden aus verschiedenen Faser- und Matrixwerkstoffen hergestellt. In automobilbaurelevanten strukturellen Anwendungen werden aktuell vornehmlich Glas- und Kohlenstofffasern eingesetzt, wobei FKV auf Kohlenstoffbasis (CFK) bessere gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften und somit ein höheres Leichtbaupotential aufweisen, als Glas-Faserverstärkte-Kunststoffe (GFK) (s. [LEM+12]). So weist der Werkstoff CFK im Vergleich zu Stahl eine circa doppelte gewichtsspezifische Festigkeit (s. [HeM11]) sowie folgende weitere Vorteile auf (s. [Ehr06, HeM11, Sch13, FGK15]):

- Erhöhte Gestaltungsfreiheit bzw. Gestaltungsmöglichkeiten
- Flexibilität bei der Kombination von Faser- und Matrixwerkstoffen
- Vergleichsweise gutes Verhalten nach Erstversagen im Vergleich zu Metallen insbesondere im gekerbten Fall
- Gute dynamische Eigenschaften
- Gute Dämpfungseigenschaften senkrecht zur Faserrichtung
- Gute Beständigkeit gegenüber Alterung und Korrosion
- Niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient

Aus diesen Gründen ist die Industrie zunehmend bestrebt, den Einsatz von CFK im Großserienmaßstab zu etablieren. Dabei werden auf dem Weg zur Industrialisierung dieses Werkstoffs überwiegend manuelle Fertigungstechnologien von FKV-Bauteilen automatisiert und Weiterentwicklungen hinsichtlich Taktzeitverkürzungen vorgenommen (s. [Fis11, Leo11]). Leuchtturmprojekte für den Einsatz von CFK in Strukturkomponenten sind die von der BMW Group München auf den Markt gebrachten Fahrzeuge BMW i3 in 2013 und BMW i8 in 2014. Diese Fahrzeuge sind aus einer zweigeteilten Architektur aufgebaut. Während der Antriebsstrang wie in Abbildung 1.1 dargestellt, zu einem überwiegenden Teil aus Aluminium besteht (Drive-Modul), wird die Fahrgastzelle (Life Modul) aus dem Werkstoff CFK hergestellt.



Abbildung 1.1: Life-Drive-Konzept des BMW i8 (s. [Pas14])

Auch nach Anlauf und Produktionsbeginn der aufgeführten Leuchtturmprojekte mit dem BMW i3, dem BMW i8 und auch dem neuen 7er BMW bestehen weiterhin diverse Herausforderungen beim Einsatz von CFK in der Großserie, wovon im Faserverbundbereich ab einer jährlichen Produktionsmenge von 10.000 Stück berichtet wird (s. [Fis11, LEM+12]).

Die bedeutendsten Anforderungen der FKV-Produktion in Großserienprozessen sind (s. [Fis11, LEM+12]):

- Vollständige Automatisierung
- Kurze Taktzeit
- Gleichbleibend hohe Prozesssicherheit
- Geringe Fertigungskosten

Eine vollständige Automatisierung ist insbesondere aufgrund der in Europa hohen Personalkosten erforderlich, um die Stückkosten zu reduzieren und somit zur Wirtschaftlichkeit von FKV-Komponenten durch Minimierung der Personalintensität beizutragen (s. [BHS08]). Die vollständige Automatisierung erhöht zusätzlich die Prozesssicherheit, welche wiederum die Einhaltung enger Toleranzen ermöglicht, sodass Ausschuss vermieden und die Fertigungskosten minimiert werden können.

Die Kosten, beziehungsweise eine wirtschaftliche Gegenüberstellung verschiedener Konstruktionswerkstoffe, welche für den Leichtbau in automobilen Volumen Anwendungen relevant sind, wird in (s. [LEM+12]) und (s. [HMS+12]) aufgeführt. Wie in Abbildung 1.2 dargestellt, führen die FKV im Vergleich zu anderen Werkstoffen zu erhöhten Kosten, welche exemplarisch für einen Demonstrator anhand des Werkstoffs CFK mit 570% der Kosten von Stahl und 440% der Kosten von Aluminium angegeben sind.

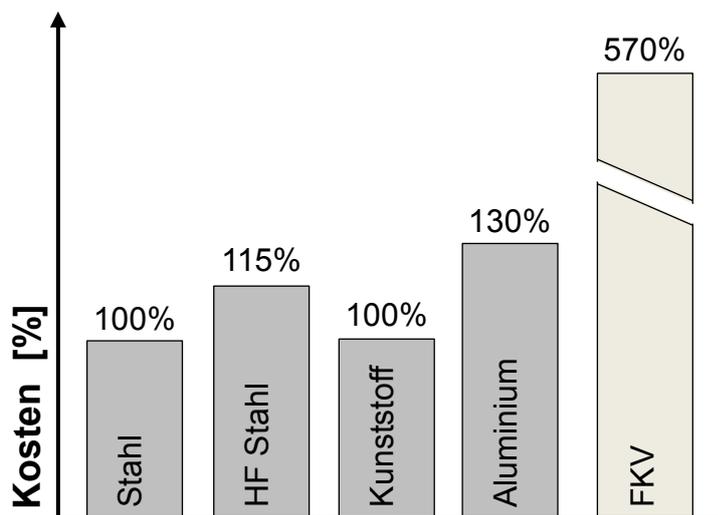


Abbildung 1.2: Wirtschaftlicher Werkstoffvergleich anhand der Kosten eines Demonstratorbauteils (s. [HMS+12])

Die in dieser Darstellung aufgeführten relativen Kosten von FKV-Komponenten sind für eine Großserienanwendung im Automobilsektor zu hoch, weshalb der Entwicklungsfokus auf deren Minimierung gelegt werden muss (s. [HMS+12, EHS10, Leo11]). Die Kosten setzen sich zusammen aus dem Faserwerkstoff ($\leq 40\%$), dem Matrixwerkstoff ($\leq 10\%$) und Fertigungsverfahren ($\geq 50\%$) (s. [LEM+12, HMS+12, Ver08]). Dabei wird die Ursache für die hohen Kosten in der Fertigung von CFK-Bauteilen insbesondere anhand folgender Hemmnisfaktoren festgemacht (s. [HMS+12, LEM+12, Leo11, Ver08]):

- Kostenintensive Ausgangsprodukte
- Hohe Zykluszeiten
- Hoher manueller Aufwand
- Werkstoffverluste entlang der Prozesskette
- Aufwändige Recyclingprozesse

1.2 Motivation für lokale Verstärkungen im RTM- und Nasspress-Prozess

Wie aufgeführt, sind die Anforderungen an eine Großserien-FKV-Fertigung vielfältig. So ist neben der erforderlichen Prozessstabilität und der vollständigen Automatisierung des Prozesses vor allem eine wirtschaftlich effiziente Bauteilherstellung essentiell. Aus diesem Grund sind die hier vorgestellten Untersuchungen insbesondere durch die Reduktion der Herstellkosten von FKV-Bauteilen mit höchsten mechanischen Anforderungen motiviert. So sollen die hohen spezifischen mechanischen Kennwerte des Werkstoffs optimal genutzt und wie auch in der Literatur gefordert die Fertigung lastpfadgerecht gestalteter Bauteile im Rahmen der Großserie vorangetrieben werden. So fordert (s. [HPK00]) eine belastungsgerechte Bauteilgestaltung, mit folgenden Worten: „Das Potenzial der Faserverbunde kann jedoch nur voll ausgenutzt werden, wenn die Fasern belastungsgerecht, entsprechend der Hauptspannungstrajektoren, im Bauteil orientiert sind.“ Zudem werden bei (s. [Sob07]) FKV in natürlichen Strukturen diskutiert und es wird dort aufgeführt, dass erst durch lokale Verstärkungen hochbelasteter Bereiche die guten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe optimal genutzt werden können. Als „Strukturwerkstoff“ kommen in der Natur fast ausschließlich Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. So nutzen Bäume und Pflanzen die einzigartigen Optimierungsmöglichkeiten durch verstärkende Strukturen ebenso, wie exemplarisch der menschliche Körper am Beispiel der Knochen (s. [Göt00, Rei09]).

Aufgrund der hohen Materialkosten, welche durch die kostenintensiven Kohlenstofffasern (C-Fasern) bedingt sind, ist es nach der Industrialisierung flächiger Schalenbauteile aus ökonomischer Sicht ein konsequenter Schritt lokale Anpassungen der Bauteileigenschaften auch in die Großserienproduktion von Faser-Kunststoff-Verbunden zu etablieren (s. [StM15]). Neben zahlreichen weiteren Autoren (s. [KNG+16, KNS+15, ZSS+15, HPK00]), nimmt (s. [HFL+13]) wie folgt Stellung zur Technologie lokaler Verstärkungen in Faser-Kunststoff-Verbunden für die automobiler Großserie: „Ein wichtiges Ziel in der Herstellung und Verwendung von FKV ist es, weiterhin Bauteilgewicht und Materialkosten einzusparen, um sie wirtschaftlich und unter Nutzung des Leichtbaupotentials in der Großserie einsetzen zu können.“

Neben Anwendungen aus der Baubranche und der Bionik sind lokale Verstärkungen auch im konventionellen Stahl-Karosseriebau als sogenannte Tailored Blanks (engl.: maßgeschneiderte Platine) weit verbreitet. Der Ursprung dieses Begriffs liegt in den 1980er Jahren und beschreibt nach (s. [HeM11]) maßgeschneiderte Bleche, die aus verschiedenen Stahlgüten und Stahldicken verschweißt werden, um lokal optimale mechanische Eigenschaften bei minimalem Gewicht zu gewährleisten.

Die Hauptmotivation zur Herstellung lokal verstärkter Bauteile sind laut (s. [Sch13]) die lokale Erhöhung der Steifigkeit, der Zug- und Druckfestigkeit sowie das verbesserte Bauteilverhalten bei bestimmten Schwingungsfrequenzen. Um die Bauteileigenschaften lokal anpassen zu können, ist der Einsatz von Stringern oder Kernen weit verbreitet. Diese Elemente erhöhen aufgrund des hohen Flächenträgheitsmoments die Steifigkeit und verbessern das Beulverhalten großer Schalenbauteile, wie sie bei Konstruktionen mit Faserverbundwerkstoffen häufig eingesetzt werden. Die Herausforderung bei der Auslegung und Fertigung besteht dabei aus zwei Hauptaspekten; einerseits aus der werkstoff- und lastpfadgerechten Bauteilgestaltung und andererseits aus einer adäquaten Prozessführung (s. [Sch13]). Da die faserverstärkten Kunststoffe, stark anisotrope mechanische Eigenschaften aufweisen, eignen sie sich hervorragend für eine lastpfadgerechte Bauteilgestaltung. Dies führt dazu, dass die Verstärkungsfasern so angeordnet werden müssen, dass sie entlang der Hauptbelastungsrichtung des Bauteil orientiert sind und die auftretenden Hauptlasten optimal aufnehmen und ableiten können. Ein Grund, warum eine lastpfadgerechte Bauteilgestaltung bei FKV-Komponenten besonders sinnvoll erscheint, ist die Tatsache, dass die mechanischen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden aufgrund deren Anisotropie bei Abweichung der Belastungsrichtung von der Faserorientierung mit zunehmendem Differenzwinkel deutlich abnehmen, wie in Abbildung 1.3 dargestellt ist (s. [Ehr06]).

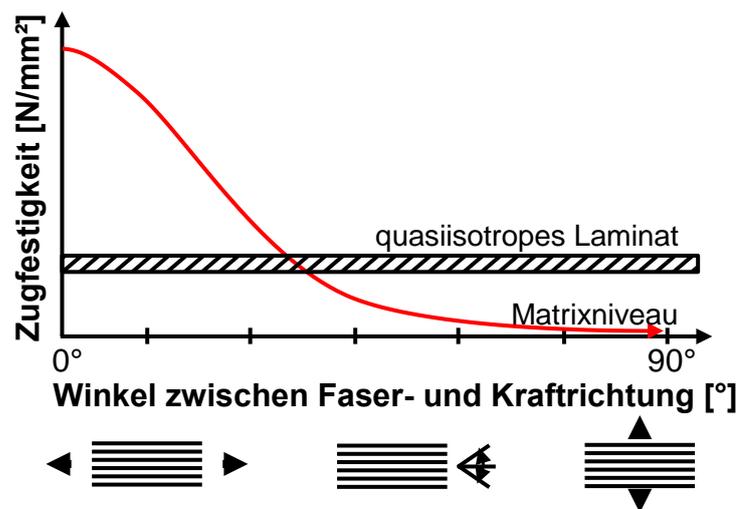


Abbildung 1.3: Zugfestigkeit von Verbundstrukturen in Abhängigkeit des Winkels zwischen Faser- und Lastrichtung (s. [Ehr06])

Die Technologie lokal aufgebrachtener Verstärkungslagen wird diesen gerichteten mechanischen Eigenschaften dadurch gerecht, dass die lokalen Verstärkungslagen (LV) in maximaler Faserorientierungsfreiheit auf einem vollflächigen Grundlaminat aufgebracht werden können. Zusätzlich kann über die lokalen Verstärkungen Material gegenüber dem Stand der Technik dort im Bauteil eingespart werden, wo es die mechanischen Anforderungen zulassen. Im Hinblick auf die textilen Verstärkungslagen kann man sich somit von Einschränkungen vorgegebener Textillagen mit definierten Faserorientierungen, wie dies in der Großserienfertigung von Schalenstrukturen Stand der Technik ist, lösen.

Zusätzliche Motivation lokale Verstärkungen in der Großserienproduktion der Faser-Kunststoff-Verbunde zu etablieren, ist eine Funktionsintegration. So können beispielsweise Lasteinleitungspunkte örtlich durch zusätzlich applizierte Textilstrukturen verstärkt und der Faseranteil lokal erhöht werden, um zum Beispiel das Setzverhalten im Betrieb zu verringern und einen Entfall zusätzlicher Lasteinleitungselemente an Anschraubpunkten zu ermöglichen. Dies kann gegebenenfalls sowohl eine Reduzierung des Bauteilgewichts, als auch die Ersparnis von Handhabungsschritten in der Montage möglich machen.

Ein weiterer positiver Aspekt der Halbzeug-, beziehungsweise Bauteilgestaltung mit lokalen Verstärkungen kann die partielle Einbringung von Glasfasern in das Laminat und an deren Oberflächen sein. Dies ermöglicht eine Entkoppelung der Kohlenstoffa-

sern von günstigeren Fügepartnern aus Stahl- oder Aluminiumlegierungen und verhindert beziehungsweise reduziert dadurch die bei Anbindungspunkten, aufgrund unterschiedlicher Elektronegativität, auftretende Kontaktkorrosion. Zudem kann durch den Werkstoffmix aus Kohlenstoff- und Glasfasern die bestmögliche Bauteilgestaltung hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

2 Ziele der Arbeit

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Motivation zur Realisierung lokal verstärkter Bauteile in den Fertigungsprozessen der Großserie aufgeführt wurde, erfolgt nun die Darstellung der mit dieser Arbeit verfolgten Ziele. So wird eine fundierte Befähigung der Technologien Hochdruck-Resin-Transfer-Moulding und Nasspressen zur Imprägnierung textiler Halbzeuge mit lokalen Verstärkungslagen angestrebt.

Bevor jedoch die aufgeführten Potentiale von FKV-Bauteilen mit lokalen Verstärkungen in den Großserieprozessen RTM und Nasspressen genutzt werden können, ist die Bearbeitung, Bewertung, Analyse und Interpretation verschiedener Arbeitspakete erforderlich. Die für die Industrialisierung relevanten Handlungsfelder sind in Abbildung 2.1 aufgeführt.

So stellt ein wichtiges Arbeitspaket, das neben einer Erhöhung des Leichtbaugrads auch die Grundmotivation für lokale Verstärkungen ist, die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Dieses Handlungsfeld wurde vorab untersucht und wird somit im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter beleuchtet. Ein weiteres Paket beleuchtet die Automatisierung der Prozesskette. Analog der Wirtschaftlichkeitsbewertung wird auch dies in einem Parallelprojekt bearbeitet und fällt nicht ins Spektrum der vorliegenden Analysen.

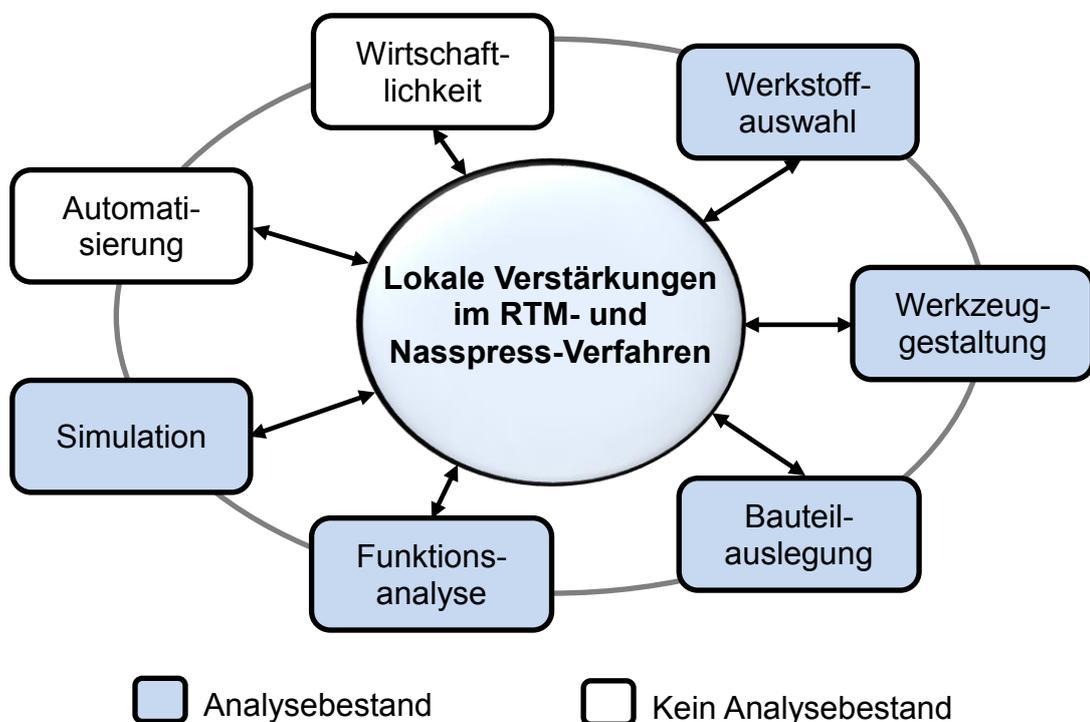


Abbildung 2.1: Arbeitspakete zur Absicherung der technologischen Machbarkeit lokal verstärkter Bauteile im RTM- und Nasspressprozess

Die Bereiche, auf die sich die vorliegenden Untersuchungen konzentrieren, sind diejenigen, welche den Imprägnierungsprozess im RTM- und Nasspress-Verfahren direkt, oder indirekt beeinflussen. Diese Arbeitspakete sind für die Herstellung lokal verstärkter FKV-Bauteile in den Großserienprozessen von herausragender Bedeutung, da aufgrund verschiedener Herausforderungen wie zum Beispiel Wanddickenübergängen am Verstärkungsrand ein komplexes Füllverhalten im Injektionsprozess zu erwarten ist. Daraus resultiert die besondere Anforderung einer exakten Halbzeugpositionierung im Werkzeug, was anhand der durchzuführenden Untersuchungen hinsichtlich Positionsanforderungen im Injektionsprozess zu quantifizieren ist. Die Positionierung ist deshalb von besonderer Bedeutung, da eine Fehlplatzierung der textilen Halbzeuge im Injektionswerkzeug zu lokalen Überpressungen und auch Reinharzbereichen an der gegenüberliegenden Verstärkungsseite führen und somit in Ausschussteilen resultieren würde. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Fragestellungen, wie zum Beispiel die Toleranzbreite unterschiedlich ausgeformter Wanddickenübergänge beleuchtet.

Zusätzlich sind, wie in Abbildung 2.1 aufgezeigt, eine adäquate Werkstoffauswahl, Werkzeuggestaltung, Bauteilauslegung, Funktionalitätsanalyse und eine Bewertung und ggf. Weiterentwicklung der Simulationsmethoden Bestandteil der Analysen.

Neben Basisuntersuchungen mit reinen Kohlenstofffasergelegen werden im Rahmen der **Werkstoffauswahl** auch vielversprechende Alternativtextilien für die Verwendung in den Großserienprozessen untersucht und bewertet. Dabei wird versucht verschiedene Vorteile, wie eine verkürzte Prozesskette, reduzierte Halbzeugkosten, oder diverse andere Vorteile theoretisch zu bewerten und im Rahmen praktischer Absicherungen zu befähigen.

Um den geänderten Anforderungen lokal verstärkter Halbzeuge mit Dickensprung in den Flüssigimprägnierverfahren gerecht werden zu können, sind darüber hinaus Überarbeitungen der Werkzeugtechnik zu bedenken und abzusichern. Aufgrund der Ziele in den Verstärkungslagen im Vergleich zum Grundlaminatbereich die Fasermenge zu verdoppeln und aus Gründen der Mechanik eine homogene Faservolumengehaltsverteilung im Bauteil zu erzielen, sind Wanddickenübergänge im FKV erforderlich. Um Richtlinien für eine Gestaltung des Wanddickenübergangs bereitstellen zu können, sind verschiedene, aus der Literatur zielführend erscheinende Gestaltungsarten zu untersuchen und zu bewerten sowie die erlangten Erkenntnisse dazu in die Richtlinien zur **Werkzeuggestaltung** entsprechend einzubringen.

In einem weiteren Arbeitspaket ist die **BauteilAuslegung** zu beleuchten. Dabei sind Fragestellungen wie die Positionierung der lokalen Verstärkungen und die Ausprägung verschiedener weiterer Parameter wie die Breiten und Faserorientierungen der lokalen Verstärkungstextilien zu bewerten. In Zusammenhang mit der Gestaltung der Werkzeugtaschen haben die daraus abzuleitenden Richtlinien sowohl Einfluss auf die Prozess-, als auch auf die mechanischen Eigenschaften.

Zudem ist es Ziel eine Analyse der resultierenden Laminat- und Bauteilfunktion durchzuführen. Dabei werden die Einflüsse verschiedener Variationsparameter auf die mechanischen Eigenschaften beziehungsweise die **Funktionalität** des Bauteils analysiert. Die Erkenntnisse daraus fließen dann wiederum zurück in die Auslegung der lokal verstärkten Bauteile und ermöglichen eine belastungsdedizierte Konfiguration.

Um eine effiziente Prozess- und BauteilAuslegung bei vergleichsweise geringem Materialeinsatz in kurzer Zeit realisieren zu können, wird neben den empirischen Untersuchungen auch eine entsprechende **virtuelle Abbildung** (Simulation) der Imprägnierprozesse verschieden gestalteter Halbzeuge und Prozessparameter durchgeführt. Bei Abweichungen zwischen praktischen und virtuellen Darstellungen ist es Ziel, die Methode gegebenenfalls auf die Injektion lokal verstärkter Halbzeuge hin weiter zu entwickeln.

Ferner wird eine Fixierung der lokalen Verstärkungslagen zur Stabilisierung für Handhabungsschritte, erforderliche Umformprozesse und die Matrixinjektion benötigt. Nachdem auf Basis einer Literaturrecherche die ideale Form der Fixierung der lokalen Verstärkungslage selektiert wird, werden daran grundlegende Versuche hinsichtlich Beeinflussung der prozessrelevanten Werkstoffeigenschaften, der Fließfrontprogression und der Laminatqualität durchgeführt.

Ziel ist es, durch die Darstellung prozess- und strukturelevanter Wirkzusammenhänge und anhand verschiedener Gestaltungsparameter lokaler Verstärkungen eine effiziente Bauteil- und Prozessauslegung gewährleisten zu können und relevante, im Rahmen des Kapitels 4 erarbeitete Hypothesen zu bewerten.

3 Stand der Technik

Für die Herstellung von FKV-Bauteilen sind je nach Bauteilanforderungen verschiedene Technologien etabliert. Die Verarbeitung von Kohlenstofffasern wird in Kurz-, Lang- oder Endlosfasern unterteilt. So finden sich bei kurz-, oder langfaserverstärkten Bauteilen Faserlängen von bis zu 50 mm (s. [LEM+12]), wohingegen bei endlosfaserverstärkten Bauteilen die Fasern durch die Bauteilkanten unterbrochen sind. Diese Durchgängigkeit der Fasern führt dazu, dass mit Endlosfasern die höchsten mechanischen Kennwerte erreichbar sind. Aus diesem Grund werden in den vorliegenden Untersuchungen ausschließlich Endlosfasern verarbeitet, welche zum Beispiel im Jahr 2013 über 80 Prozent des Kohlenstofffaserumsatzes ausgemacht haben (s. [WKK14]).

3.1 Technologieketten zur Herstellung schalenförmiger FKV-Komponenten

Die Fertigungsverfahren von FKV-Komponenten gliederten sich nach (s. [WKK14]) im Jahr 2013 in die vier Technologiefamilien „Pultrusion und Wickeln“, „Prepreg-Ablegeprozesse mit und ohne Autoklav“, „Nasslaminieren und Infusionsverfahren“ sowie „Press- und Injektionsverfahren“. Im letztgenannten Block befinden sich die Verfahren Resin Transfer Moulding (RTM) und Nasspressen, die sich hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Reproduzierbarkeit und den erzielbaren Bauteileigenschaften für strukturelle Großserienanwendungen am geeignetsten darstellen und mit flächigen textilen Halbzeugen bereits in Großserienprozessen etabliert sind (s. [Pas14]). Um auf den Stand der Technik aufbauen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit das RTM- und Nasspress-Verfahren ebenso beleuchtet, wie bereits etablierte Fertigungsszenarien im Hinblick auf lokal verstärkte Bauteile. Bei den genannten Verfahren dienen verschiedene textile Halbzeuge als Ausgangswerkstoff und Verstärkungsstrukturen. Die am häufigsten verwendeten textilen Halbzeuge für die Herstellung endlosfaserverstärkter Bauteile sind nach (s. [Köh05]) Geflechte, Gewirke, Gesticke, Gesticke, Gewebe und Gelege. Da Gewirke und Gesticke aufgrund deren Struktur Faserumschlingungen und Ondulationen aufweisen und daraus im Bauteil vergleichsweise geringe mechanischen Kennwerten resultieren, sind diese für den strukturellen FKV-Einsatz nur von untergeordneter Bedeutung und werden im Rahmen dieser Arbeit zur lastpfadgerech-

ten Strukturteilherstellung nicht weiter betrachtet (s. [Köh05, HaM11, CDG07]). Sogenannte Gewebe, Gelege, Geflechte und Gesticke sind dagegen nach (s. [Ehi12]) in der Herstellung von CFK-Bauteilen von großer industrieller Bedeutung. In der Großserienfertigung werden Gelege verwendet, was neben hervorragenden mechanischen Eigenschaften aufgrund einer Textilstruktur mit minimalen Ondulationen der Verstärkungsfasern im Laminat insbesondere an den im Vergleich zu Geweben geringeren Kosten liegt. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass für die Herstellung von FKV-Strukturbauteilen in der Großserienfertigung überwiegend Gelege verwendet werden. Nach DIN EN 13473-1 sind Gelege oder englisch Non-Crimp-Fabrics (NCF) flächigie Textilien, bei denen die Verstärkungsfasern in Form einer oder mehrerer paralleler und gestreckter Fadenlagen vorliegen und durch ein Maschensystem fixiert sind. Da der Wirkfaden des Maschensystems bei Gelegen deutlich niedrigere Kennwerte als die Verstärkungsfasern aufweist, werden die mechanischen Eigenschaften des Geleges im späteren Bauteil durch die Orientierung der Verstärkungsfasern im Halbzeug dominiert. Verschiedene Verstärkungsrichtungen können flexibel in Form mehrerer Textillagen implementiert werden. Die Eigenschaften des textilen Halbzeugs sowie des resultierenden Bauteils lassen sich dementsprechend über die Verwirkung der textilen Gelegelagen und insbesondere deren Lagenanordnung beeinflussen. Eine innovative Form der Gelege stellen die tailored NCF dar. Im Gegensatz zu Standardgelegen können bei ihnen sowohl die Verstärkungsstruktur, als auch die Verwirkung lokal angepasst werden. So finden Textilien Verwendung, bei denen durch Variation der Verwirkung lokal unterschiedliche Drapierbarkeiten und durch lokale Applikation von Zusatzpatches variable Werkstoffdicken mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften eingestellt werden können (s. [GSL+11]). Für weitere Information zu den vorgestellten und im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen verwendeten Gelegen sei der Leser auf die Literaturquellen (s. [Lom11, LBB+02, Hau10]) verwiesen.

Während es verschiedene Sparten der FKV-Fertigung gibt, welche Bauteile mit lokalen Verstärkungen fertigen, sind die Technologien der Großserienfertigung von FKV-Komponenten bislang ausschließlich ohne lokale Verstärkungen mit dem Resin Transfer Moulding (RTM)- und dem Nasspressverfahren begrenzt. Um die Entwicklungsbasis für die Herstellung lokal verstärkter Bauteile in den Großserienprozessen aufbauend auf den aktuell verfügbaren Technologien zu schaffen, wird zunächst der Stand der Technik in der Herstellung von Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden mit lokalen Verstärkungen in Kleinserie und anschließend die Großserienfertigung ohne lokale Verstärkungen vorgestellt.

3.2 Herstellung von Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden mit lokalen Verstärkungen in Kleinserien

Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit lokalen Verstärkungen sind aufgrund ihrer Eigenschaften als Konstruktionswerkstoff in verschiedenen Bereichen etabliert. So finden sie unter anderem Verwendung in der Luftfahrt (s. [BuM13, Bar09, BSA+09]), bei Sport- und Freizeitartikeln (s. [Rup15]), der Energietechnik (s. [USB+13]) sowie im Maschinen- und Anlagenbau (s. [USB+13]). Insbesondere in denjenigen Anwendungsfällen kommen FKV zum Einsatz, wo die hohen gewichtsspezifischen Eigenschaften des Werkstoffs genutzt werden können, und dadurch eine verbesserte Wirtschaftlichkeitssituation gegeben ist. Dies ist aufgrund der hohen Energiekosten insbesondere in der Raumfahrt der Fall, wo die Ersparnis von einem Kilogramm in der Struktur erhöhte Kosten von bis zu 25.000 € rechtfertigt. Dagegen werden in der Luftfahrt Mehrkosten von 250-750 € und in der Fahrzeugindustrie zusätzliche Kosten von bis zu 2,5 € akzeptiert (s. [Sut09]).

Aufgrund dieser wirtschaftlichen Ausgangsbasis, beziehungsweise der akzeptierten Mehrkosten je Kilogramm Gewichtersparnis, werden insbesondere in der Luftfahrt vermehrt FKV eingesetzt. So bestehen Strukturkomponenten moderner Passagierflugzeuge der führenden Hersteller zu über 50% aus FKV (s. [Dud09, WiS13]). Die für die Luft- und Raumfahrt konzipierten Bauteile zeichnen sich häufig durch große geometrische Abmessungen und eine hohe Komplexität hinsichtlich der Einbringung lokaler Verstärkungen aus, welche eine lastpfadgerechte Bauteilgestaltung ermöglichen.

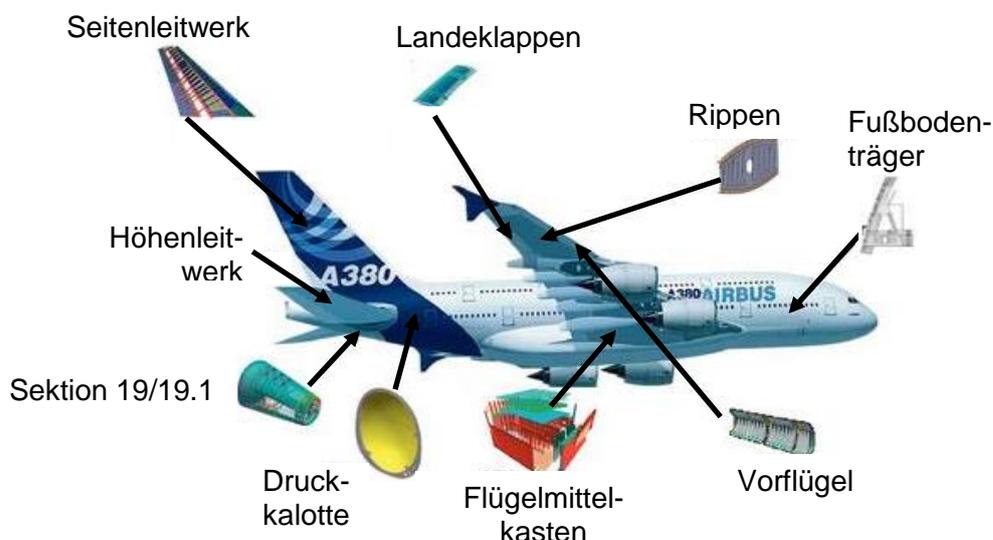


Abbildung 3.1: CFK-Komponenten im Airbus A380 (s. [Dud09])

Strukturen, welche im Bereich der zivilen Luftfahrt aus FKV gefertigt werden, sind, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, das Höhen- und Seitenleitwerk, der Flügelmittelkasten, die Druckkalotte, die Landeklappen und Rippen im Flügelbereich sowie verschiedene weitere Rumpfteile (s. [Lao05, Dud09]).

Als Herstellungsverfahren für die aufgeführten FKV-Komponenten werden aktuell im Luftfahrtbereich insbesondere Prepreg-Ablage- und Infusionsverfahren mit anschließendem Heißpressprozess, Autoklavtechniken, oder die Resin Transfer Molding Technologie in Prozessausprägungen für Kleinserien verwendet (s. [BuM13, Dud09, BSA+09]). Ein Charakteristikum der dabei verwendeten Verfahren ist die sehr personal- und kostenintensive Herstellung der Bauteile, die auf großteils vollständig manuellen Fertigungsverfahren beruht. Darüber hinaus ist die Verwendung von vergleichsweise fein strukturierten und entsprechend hochpreisigen textilen Halbzeugen, welche für die Automobilbranche nicht wirtschaftlich herstellbar sind, üblich. Aufgrund der Nachfragesituation in der Luftfahrt steigen die Stückzahlen der herzustellenden FKV-Komponenten zunehmend, was dazu führt, dass die Bedeutung der wirtschaftlichen Herstellung komplexer textiler Preforms zunimmt und eine Automatisierung der FKV-Fertigung auch in der Luftfahrtindustrie zunehmend angestrebt wird (s. [BSA+09]). Die extrem komplexe Ausführung lastpfadgerecht gestalteter Bauteile, wie sie in Kleinserien Umsetzung finden, wird in Abbildung 3.2 anhand der Schichtfolge eines Niederdruckverdichter Fanblattes deutlich, welches im VARI-Verfahren hergestellt wird (s. [Dud09]).

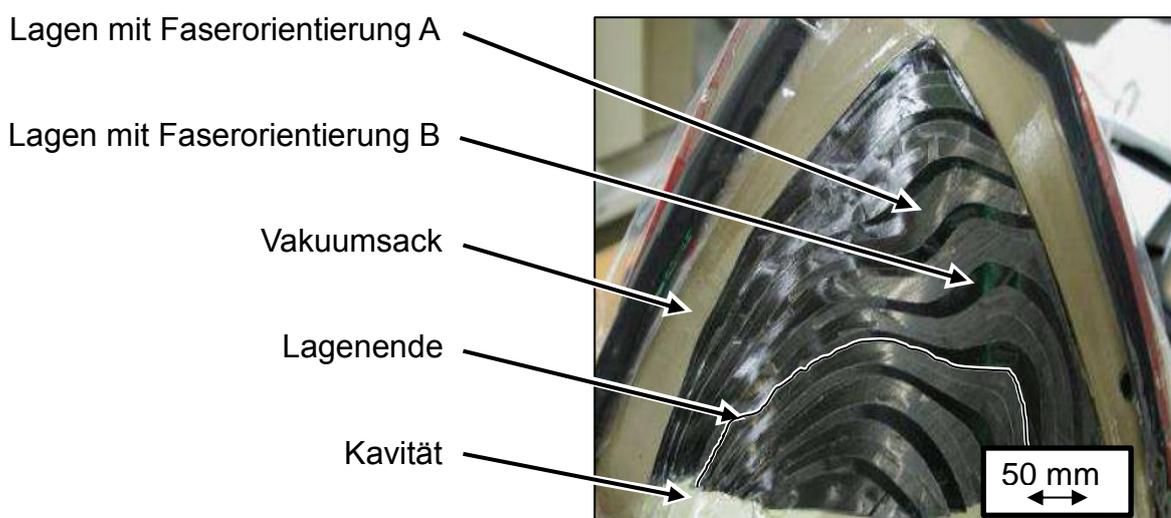


Abbildung 3.2: Lokal verstärkter Lagenaufbau zur Herstellung eines Niederdruckverdichter Fanblattes im VARI-Verfahren (s. [Dud09])

Die Etablierung lastpfadgerecht gestalteter Bauteile mit lokalen Verstärkungen und die Bewältigung der damit verbundenen erhöhten Komplexität der textilen Halbzeuge in Kleinserien beruht auf drei Aspekten (s. [Sut09]):

- Manuelle Schritte machen es möglich Halbzeuge mit hohen Komplexitäten, wie zahlreichen Wanddickenübergängen und Abstufungen im Bauteil zu gestalten.
- Die Prozesse, wie ein manuelles Legen von Prepregs oder eine Imprägnierung anhand des vakuumunterstützten Harzinfusionsverfahren (siehe Abbildung 3.2) erlauben es, Bauteile mit Wanddickenübergängen zu fertigen, da dabei die Anforderungen an eine positionsgenaue Platzierung der Halbzeuge im Injektionswerkzeug deutlich reduziert werden können.
- Bei den im Vergleich zum Automobilbau hohen akzeptierten Leichtbaukosten und geringeren Stückzahlen ist es in der Luftfahrt wirtschaftlicher, die Halbzeuge in zeitintensiven Manufakturprozessen, aber aufgrund der lastpfadgerechten Bauteilgestaltung mit minimalem Gewicht, herzustellen.

Analog den vorgestellten Aspekten der Bauteilfertigung in der Luftfahrt erfolgt die FKV-Herstellung in den anderen aufgeführten Segmenten im Kleinserienmaßstab ebenfalls mit hohem manuellem Aufwand bei zeitgleicher Maximierung des Leichtbaus durch die Gestaltung der Bauteile mit lokalen Verstärkungen.

3.3 Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden in großserientauglichen Technologien ohne lokale Verstärkungen

Den beschriebenen Fertigungsprozessen zur Herstellung von FKV-Bauteilen mit maximaler Ausschöpfung des Leichtbaugrads und hohem personellen Aufwand in den Kleinserienprozessen steht die Fertigung von FKV-Bauteilen im Großserienmaßstab gegenüber. Bei der BMW Group ist die Fertigung von FKV-Komponenten in Außenhautanwendungen über die Dachfertigung an Modellen der M-Reihen seit 2003 etabliert. Im Rahmen des sogenannten „Project-i“ werden zudem für den BMW i3 seit 2013, für den BMW i8 seit 2014 und für den 7er BMW seit 2015 FKV-Strukturbauteile hochautomatisiert im Großserienmaßstab gefertigt (s. ([StM15]). Vom vollelektrisch angetriebenen i3 und hybriden i8 lieferte BMW im Jahr 2015 29513 Fahrzeuge an den Kunden aus, was in der FKV-Fertigung als Großserienproduktion bezeichnet wird (s. [Beg16]). Die zur Herstellung der entsprechenden FKV-Komponenten verwendeten Technologien sind die Resin Transfer Moulding- und Nasspress-Prozesskette, welche

beide auf einem sequentiellen Prozess basieren, der über ein textiles Zwischenprodukt führt (s. [Sor13]).

Während das Ausgangsprodukt für Profile im sogenannten Flechtprozess hergestellt wird, basiert die Produktion flächiger Schalenbauteile für Strukturanwendungen in der Großserienfertigung auf unidirektionalen Gelegen. Diese dienen sowohl für das Resin Transfer Moulding-, als auch für das Nasspressverfahren als Ausgangsprodukt. Entlang der Prozesskette des Resin Transfer Moulding-Verfahrens wird vorweg der textile Vorformling und das FKV-Bauteil in mehreren Schritten hergestellt, während im NP-Verfahren die Bauteile direkt aus dem zweidimensionalen Halbzeug entstehen (s. [Ehi12]).

3.3.1 Prozesskette im Resin Transfer Moulding-Verfahren

In diesem Abschnitt wird das Erste der beiden Verfahren zur Herstellung von flächigen FKV-Komponenten im Großserienprozess, nämlich das Resin Transfer Moulding-Verfahren vorgestellt. Neben dem Standbein der in Kleinserienverfahren bereits etablierten Fertigung mit lokalen Verstärkungen dient der hochautomatisierte RTM-Prozess als zweite Grundlage für die Untersuchungen. Dabei erfolgt die Herstellung von FKV-Bauteilen in einer sogenannten sequentiellen RTM-Prozesskette (s. [Che11, Dre10]). Im Rahmen dieser sequentiellen Prozesskette werden textile Halbzeuge als bauteilunabhängige Bahnware hergestellt und daraus die textilen Halbzeuge für die Flüssigimprägnierverfahren gebildet. Die Hauptschritte zur Herstellung der FKV-Bauteile ausgehend von den Kohlenstofffasern bis zum finalen Bauteil sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

Im ersten Schritt werden nach Herstellung der Kohlenstofffasern textile Halbzeuge (Gelege) gefertigt. Diese werden anschließend in einem Legeprozess zu einem sogenannten Textilstapel (engl.: Stack) zusammengelegt. Im weiteren Verlauf wird dieser Stack in die Bauteilgeometrie drapiert, beziehungsweise umgeformt, und dann als textiler Vorformling, oder Preform bezeichnet. Dieser Preform wird anschließend in den für die Großserienproduktion spezifischen Hochdruck-RTM-Prozess eingebracht und nach Applikation eines Vakuums mit einem duromeren Matrixwerkstoff imprägniert. Nachdem der Matrixwerkstoff unter Temperatur ausgehärtet ist, wird das Bauteil entformt und den weiterverarbeitenden Folgeprozessen zugeführt (s. [HeM11]).

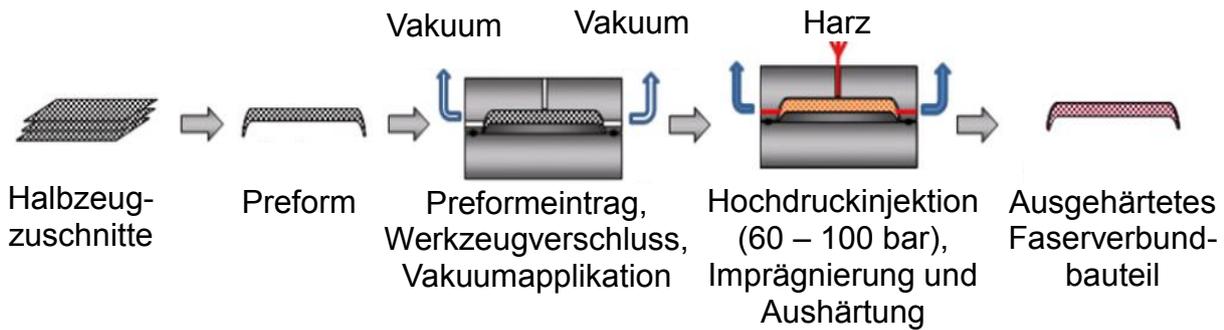


Abbildung 3.3: RTM-Prozesskette vom textilen Halbzeug bis zum FKV-Bauteil in Anlehnung an (s. [HeM11])

Ein Unterschied der FKV-Herstellung in der automobilen Großserie im Vergleich zur Luftfahrt sind neben einem hohen Automatisierungsgrad und der eingesetzten Prozesstechnik auch die verwendeten Fasern. Während in der Luftfahrt Fasern höchster mechanischer Eigenschaften und geringer Faserbündelstärke Verwendung finden, werden im Automobilbau vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit Faserbündel mit 50.000 Filamenten, sogenannten 50 K-Fasern und darüber hinaus verwendet (s. [Mau16]).

Aufgrund der Anforderungen der Großserienfertigung nach verschiedenen, definierten Gelegen (einem „Materialbaukasten“) was ausschließlich gewisse Faserorientierungen und Flächengewichte zulässt (s. [Pas14]), resultieren teilweise Abweichungen zwischen Belastungs- und Faserrichtung, was dazu führt, dass das Leichtbaupotential des Werkstoffs nicht optimal ausgeschöpft werden kann (s. [Ehr06]).

Nach den Prozessschritten der Gelegeherstellung und des Lagenstapelns wird im Rahmen des Drapierschnitts zunächst ein duromerer, oder thermoplastischer Binder in einem Kontaktheizfeld geschmolzen. Anschließend wird der aufgeheizte Lagenaufbau in das Umformwerkzeug transferiert und dort in die finale Bauteilgeometrie drapiert. Während der Abkühlung des Lagenaufbaus im Preformwerkzeug erstarrt der Binder und fixiert die Textillagen zueinander und in sich, was zur Stabilisierung des nun dreidimensionalen textilen Halbzeugs (Preform) führt. Im Anschluss an den Umformschritt erfolgt ein dreidimensionaler Preformbeschnitt. Damit ist der textile Vorformling bereit für den Imprägnierprozess im Hochdruck-RTM-Verfahren. Bei Bauteilen mit großflächigen Durchbrüchen und adäquaten Lastpfadverläufen erfolgt vor der HD-RTM-Injektion eine Kommissionierung/Konfektionierung von einzelnen Subpreforms zu einem Gesamtpreform. Dieses Vorgehen ermöglicht es, den Verschnitt, welcher über großflächige Durchbrüche signifikant gesteigert würde, zu reduzieren und zu einem gewissen

Grad die Bauteildicke sowie die Faserorientierung und entsprechend die mechanischen Eigenschaften der Bauteile im Großserienprozess lokal zu modifizieren. Auf diese Weise wird zum Beispiel ein Seitenrahmen des vollelektrischen BMW i3 aus neun einzelnen Preforms aufgebaut. Im Anschluss an die Konfektionierung erfolgt im nächsten Prozessschritt die Imprägnierung des Preforms mit dem Matrixwerkstoff. Dabei sind verschiedene Prozessführungsstrategien in der Literatur zu finden, wobei alle für die Großserie relevanten zur Familie der RTM-Verfahren mit geschlossenen Kavitäten zählen (s. [Pas14, Mau16]).

Der RTM-Prozess, der in verschiedensten Ausprägungen gefahren werden kann, besteht in seiner ursprünglichen Form aus vier Handlungsschritten, die in Abbildung 3.4 dargestellt sind. So wird eine textile Preform zunächst in das temperierte, trockene, doppelseitig starre Werkzeug eingelegt und die Kavität geschlossen, ehe eine Evakuierung erfolgt und die Injektion des Matrixwerkstoffs in die Kavität stattfindet. Nach der Harzinjektion erfolgt zunächst der Aushärteprozess des Matrixwerkstoffs und anschließend die Entformung des Bauteils (s. [HeM11]).

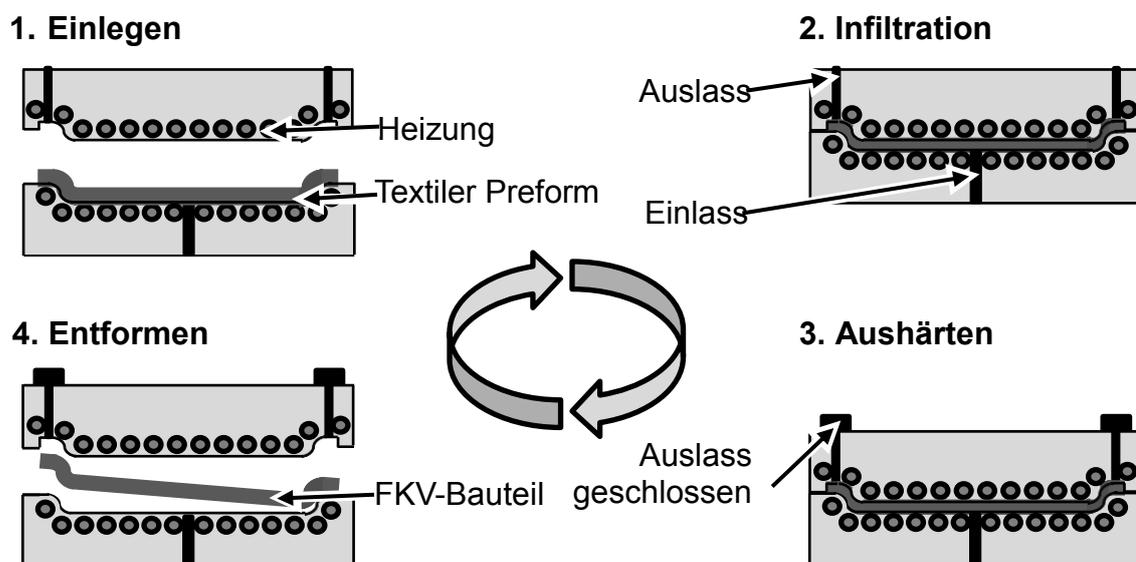


Abbildung 3.4: Prozessablauf im Resin Transfer Moulding-Verfahren (s. [HeM11])

Beim Infusionsverfahren (VARI) entsteht der für den Fluidfluss erforderliche Druckgradient in einem einseitigen Werkzeug allein durch ein anliegendes Vakuum oder gegebenenfalls durch eine autoklavbasierte Druckunterstützung. Bei den Injektionsverfahren der RTM-Technologie erfolgt der Matrixeintrag dagegen in ein beidseitig starres

Werkzeug unter definiertem Druck, der über eine Injektionseinheit appliziert wird. Ausgewählte Prozessführungen in der Familie der RTM-Verfahren, welche im Großserienprozess etabliert sind, sind das weg-, oder schließkraftgesteuerte Compression RTM (C-RTM) und das sogenannte Vacuum Assisted RTM (VA-RTM). Bei Ersterem erfolgt der Eintrag des Matrixwerkstoffs in einen sogenannten Injektionsspalt im nicht vollständig geschlossenen Werkzeug. Dies ermöglicht einen Harzeintrag mit vergleichsweise geringen Drücken, bevor die Kavität nach Abschluss der Injektion und nach einer bauteilabhängigen Initialreaktionszeit auf die finale Wanddicke des Bauteils geschlossen wird. Dies ist der Schritt, in dem das Injektionsmedium, das ab dem Zeitpunkt der Injektion in seiner Viskosität zugenommen hat, in Textil-z-Richtung eingedrückt wird. Beim VA-RTM-Verfahren wird vor und während des Injektionsprozesses die Kavität evakuiert. Dies erhöht die Laminatqualität dadurch, dass auch konvergierende Fließfronten, die zu Lufteinschlüssen führen, bei einem ausreichenden Vakuumniveau in einer guten Laminatqualität resultieren, weil dadurch keine zu Trockenstellen führende, eingeschlossene Luft in der Kavität enthalten bleibt. Wie an verschiedenen Stellen in der Literatur diskutiert und in Kapitel 1 aufgeführt, ist der Imprägnierprozess insbesondere zur Fertigung lokal verstärkter Bauteile im HD-RTM- und Nasspressverfahren ein sehr komplexer und essentiell wichtiger Prozessschritt. Der entsprechende Stand der Technik hinsichtlich der Anforderungen und Eigenschaften lokaler Verstärkungen sowie sämtliche möglichen Prozesstechniken zur Visualisierung des Fließfrontverlaufs im RTM-Verfahren sind bei (s. [SVB+16]) ausführlich dargestellt.

Der im Großserienmaßstab zur Anwendung kommende Matrixwerkstoff besteht aus Harz, Härter und aufgrund der Anforderungen der Massenproduktion nach minimalen Wartungs- und Reinigungsintervallen aus einem internem Trennmittel. Dies trägt zur rückstandsfreien Entformbarkeit des Bauteils aus dem Injektionswerkzeug bei. Aufgrund der am Werkzeug beziehungsweise in der Kavität isotherm anliegenden Temperatur erfolgt bereits während und unmittelbar nach Injektion des Matrixwerkstoffs dessen Vernetzung und Aushärtung, welche abgeschlossen ist, ehe das Werkzeug geöffnet und die Enformung des ausgehärteten FKV-Bauteils aus der Kavität erfolgen kann. Während die verschiedenen Injektionskonzepte im FKV-Bereich etabliert sind, läuft die Imprägnierung im Project-i-Großserienbetrieb der BMW Group im vakuumunterstützten (vacuum assisted – VA) RTM-Verfahren ab. Je nach geometrischer Komplexität des Bauteils, der Länge zu überwindender Fließwege und der Integration von Schaumkernen erfolgt die Prozessführung dabei entweder ohne, oder mit Spalt im beschriebenen C-RTM-Verfahren. Bevor das Bauteil an die

nachfolgenden Prozesse der Oberflächenbearbeitung/Klebevorbereitung, des Konturbeschnitts und der Reinigung übergeben werden kann, wird es in einer Abkühlvorrichtung unter definierten Zwangsbedingungen abgekühlt, um einem Verzug im Bauteil gezielt entgegenzuwirken.

3.3.2 Prozesskette im Nasspress-Verfahren

Eine weitere Prozesstechnik zur Herstellung von FKV-Bauteilen im Großserienmaßstab ist der sogenannte Nasspressprozess. Bei diesem, zum Nasslaminieren verwandten Prozess, wird das textile Halbzeug vor Einbringen in das Werkzeug mit dem Matrixwerkstoff aus duromerem Harz, Härter und Trennmittel imprägniert. Im Vergleich zum RTM-Prozess, erfolgt die Bauteilherstellung im Nasspressverfahren entlang einer weniger komplexen, kürzeren Prozesskette in einem sogenannten offenen Werkzeug ohne kavitätsumlaufende Dichtung. Dabei wird der zweidimensionale, trockene Lagenstapel nicht in einem gesonderten Prozessschritt umgeformt, bevor der textile Vorformling (Preform) dem Imprägnier- bzw. Aushärteprozess zugeführt wird. Vielmehr findet die Umformung und die Aushärtung innerhalb eines Prozessschrittes statt. So können mit Hilfe dieses Verfahrens zwar geometrisch weniger anspruchsvolle Bauteile dargestellt werden, jedoch in einer wirtschaftlicheren Technologiekette. Dementsprechend stellt das Nasspressverfahren zur Herstellung von Bauteilen limitierter Komplexität eine kosten- und ressourceneffiziente Alternative zum vorgestellten RTM-Prozess dar (s. [Göt00, Sta15]). Dabei läuft der Nasspressprozess, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, ab.

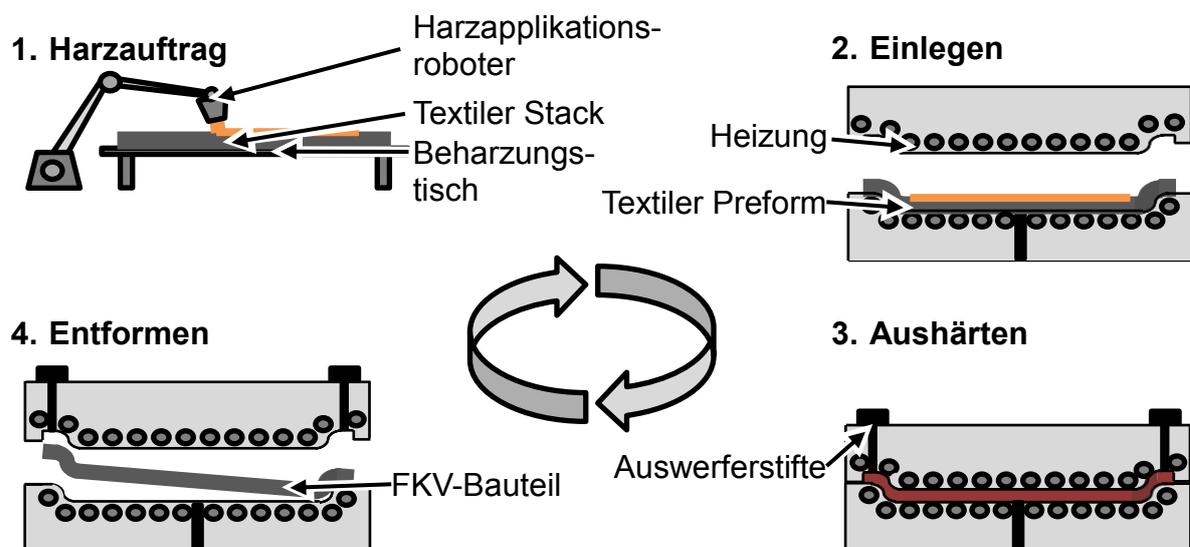


Abbildung 3.5: Prozessablauf im Nasspressverfahren in Anlehnung an (s. [Ber16])

Der flächige Stack, der im Stand der Technik ohne lokale Verstärkungslagen, ohne Wanddickenübergänge und nicht konfektioniert ausgeführt ist, wird in einem ersten Schritt über ein Positionserkennungs- und Adaptionssystem ausgerichtet, was eine Minimierung des Materialverlusts und eine Maximierung der mechanischen Kennwerte ermöglicht. Anschließend wird das textile Halbzeug über eine Beharzungseinheit mit dem halbzeugabhängig temperierten Matrixwerkstoff beaufschlagt. Der mit Harz-Härter-Trennmittel-Gemisch beaufschlagte Gelegestapel wird für eine definierte Zeit auf dem sogenannten „Beharzungstisch“ belassen. Dies führt dazu, dass der Matrixwerkstoff aufgrund von Gravitations- und Kapillarkräften in das textile Halbzeug eindringen kann und den Lagenstapel (Stack) vorimprägniert. Nach dieser Verweilzeit wird der Stack vollautomatisiert in die Kavität transferiert, bevor die Umformung der Verstärkungslagen und die Aushärtung des Matrixwerkstoffs erfolgen. Die Werkzeugtemperierung erfolgt im Nasspressverfahren analog dem RTM-Prozess isotherm. Um die, für eine fehlerstellenfreie Umformung, erforderlichen Rückhaltekräfte auf das Textil aufbringen und den erforderlichen Kavitätsdruck aufbauen zu können, sind im Werkzeug ein Spannrahmen sowie eine sogenannte Staukante integriert. Um darüber hinaus Fehlerstellen aufgrund des Imprägnierprozesses zu vermeiden, wird im Nasspressverfahren analog der Spaltimprägnierung im RTM-Verfahren das Schließprofil der Presse so gefahren, dass der Druck in der Kavität während des Vernetzungs- und Aushärteprozesses aufrecht erhalten bleibt. Nachdem das Werkzeug schließlich die Position zur Erlangung der endgültigen Bauteildicke erreicht hat und das Bauteil vollständig vernetzt ist, wird die Kavität geöffnet, das Bauteil vollautomatisch entnommen und analog dem RTM-Prozess in eine konturspezifische Abkühlvorrichtung eingebracht, um einem geometriebedingten Verzug im Bauteil entgegenzuwirken (s. [Ber16]).

Wie oben bereits aufgeführt, sind die Vorteile dieses Verfahrens, das insbesondere bei der BMW Group praktiziert wird, eine kürzere Prozesskette im Vergleich zum RTM-Verfahren. Dies führt zu reduzierten Investitionskosten und einer geringeren Anzahl an Prozessschritten. Zudem ist durch die kürzere Prozesskette eine geringere Werkstoffeinsatzquote (Werkstoffeinsatz entlang der Prozesskette normiert auf die Werkstoffmenge im Fahrzeug) möglich, was ebenfalls zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit beiträgt. Zudem können die Werkzeuge für den Nasspressprozess durch die externe Harzapplikation einfacher und kostengünstiger gestaltet werden, erfordern allerdings eine externe Harzapplikationseinheit. Es ist möglich höhere Werkzeugtemperaturen einzustellen als im RTM-Prozess, da die Imprägnierung des Halbzeugs bereits vor dem Einbringen ins Werkzeug erfolgt und dadurch kürzere Fließwege im Werkzeug

erforderlich sind. Dies führt dazu, dass im Nasspressverfahren durch eine beschleunigte Aushärtung kürzere Zykluszeiten erreicht werden können. Zusätzlich können aufgrund vergleichsweise kürzerer Fließwege auch geringere Permeabilitäten akzeptiert und höhere Faservolumenanteile realisiert werden. Dies führt zu geringerem Matrixwerkstoffeintrag im Imprägnierprozess und zur Erzielung höherer gewichtsspezifischer mechanischer Eigenschaften im Vergleich zum RTM-Verfahren.

Der bedeutendste Nachteil des NP-Verfahrens gegenüber dem RTM-Prozess ist die vergleichsweise geringere darstellbare Geometriekomplexität und die Tatsache, dass aktuell die sogenannte Konfektionierung, bei der mehrere textile Ausgangshalbzeuge während der Imprägnierung zu einem Bauteil verbunden werden, nicht möglich ist. Aus diesem Grund stehen das RTM- und Nasspress-Verfahren nicht unmittelbar in Konkurrenz zueinander, sondern ergänzen sich. Bauteile, die aufgrund ihrer Komplexität nicht im Nasspressen realisiert werden können, oder eine Konfektionierung vorteilhaft ist, können im RTM-Verfahren umgesetzt werden. Die Vor- und Nachteile der beiden Prozesstechniken, welche im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen betrachtet werden, sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der Prozessvorteile und –nachteile im RTM- und Nasspress-Verfahren (s. [Sta15, Bad02, Che11])

<u>Vorteile NP gegenüber RTM</u>	<u>Nachteile NP gegenüber RTM</u>
• Kürzere Prozesskette	• Geringere geometrische Bauteilkomplexität
• Höhere Faservolumenanteile	• Weniger weit verbreiteter Prozess
• Kürzere Zykluszeit	• Konfektionierung nicht möglich
• Weniger komplexe Werkzeuge	• Separater Roboter zur Harzapplikation
• Geringere Materialeinsatzquote	

3.4 Eigenschaften textiler Halbzeuge

Nach Vorstellung diverser Fertigungstechnologien zur Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen mit und ohne lokale Verstärkungen, wird in diesem Abschnitt auf die Möglichkeiten der Werkstoffcharakterisierung eingegangen.

Um die in anschließenden, prozessnäheren Versuchen generierten Ergebnisse und Erkenntnisse interpretieren und die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge verste-

hen zu können, ist es erforderlich, neben den Prozessparametern auch die Eingangswerkstoffe zu charakterisieren. Aus diesem Grund werden im vorliegenden Kapitel die Parameter beleuchtet, welche gemäß Literaturquellen für Flüssigimprägnierverfahren relevant sind. Dies sind der Kompaktierungswiderstand und die Permeabilität (s. [BSG+00, Geb92, UmL99]). Im Gegensatz zu Werkstoffen wie Stahl oder Kunststoff, haben faserverstärkte Komponenten eine anisotrope und inhomogene Mikro-, Meso- und Makrostruktur. Verschiedene Parameter definieren deren prozesstechnischen und mechanischen Eigenschaften. Diese sind die Fasern (Durchmesser, E-Modul), die Textilarchitektur (Flächengewicht, Art der Verwicklung) und die Bauteilstruktur (Art und Grad der Deformation, Lagenaufbau, Binderaktivierung) (s. [TTS97, ACM+15, Bei10]). Eine Grundgröße, welche das Imprägnierverhalten lokal verstärkter Halbzeuge beeinflusst, dient als Basis für die Untersuchungen. Dies ist der sogenannte spezifische Faservolumengehalt. Abhängig ist dieser vom Flächengewicht, der Dicke des Halbzeugs und der Faserdichte. Er kann grundsätzlich aus folgender Gleichung berechnet werden (s. [Ehr06, End03]):

$$FVG [\%] = \frac{V_{Fasern}}{V_{Gesamt}} = \frac{\text{Flächengewicht} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)}{\text{Dichte} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \text{Halbzeugdicke}(m)} . \quad \text{Gleichung 3.1}$$

Dabei beschreibt FVG den Faservolumengehalt, V_{Fasern} das Volumen der Fasern in einem definierten Volumen und V_{Gesamt} das gesamte definierte Volumen. Während die Halbzeugdicke und das Flächengewicht auf einfache Weise ermittelt werden können, muss die Dichte des Verstärkungstextils aus folgender Gleichung kalkuliert werden (s. [TiM06]):

$$\rho_{Textil} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] = \frac{m_{Prüfkörper}}{V_{Prüfkörper}} . \quad \text{Gleichung 3.2}$$

In dieser Gleichung stehen ρ_{Textil} für die Dichte des Faserwerkstoffs und $m_{Prüfkörper}$ für die Masse der Probe und $V_{Prüfkörper}$ für das Volumen der Probe. Bei der Kalkulation des Volumens sind zum Faserwerkstoff zusätzlich eingebrachte Stoffe wie der Wirkgarn zu beachten. Er führt zum entscheidenden Unterschied zwischen dem Gesamtfaservolumengehalt (relevant für die Imprägnierung) und dem für die mechanischen Eigenschaften relevanten Nettofaservolumengehalt der Kohlenstofffasern. Neben den Grundlagen der Kompaktierungswiderstands- und Permeabilitätsbestimmung, wird in

diesem Abschnitt auch auf die Vorgehensweise zur Analyse der Fließfrontprogression eingegangen.

3.4.1 Kompaktierungswiderstand

Der Kompaktierungswiderstand ist definiert als die Reaktion eines Textils auf eine senkrecht, oder in Dickenrichtung wirkende Kraft (s. [PBB03, RoG98]). Er hat Einfluss auf die während des Prozesses wirkenden Kräfte auf die System- und Werkzeugtechnik. Darüber hinaus beeinflusst er die Qualität der resultierenden Bauteile, indem der Kompaktierungswiderstand für die Erzeugung einer Haftreibungskraft zwischen Preform und Kavität und folglich der Fixierung des textilen Halbzeugs in der Kavität essentiell ist (s. [WVB+11, SBB10, SBB06]). Dieser Kennwert ist für die Fertigung lokal verstärkter Bauteile deshalb besonders relevant, da die Lagen der LV nicht umlaufend in einer Klemmung fixiert werden und somit ein Verschieben insbesondere der lokalen Verstärkungslagen auftreten kann. Während des Werkzeugschließvorgangs führt das Textil zu einem exponentiellen Anstieg des Schließwiderstands (s. [WVB+11, BiB06, LAR08, SBB06, SLB97]).

Darüber hinaus führt das sogenannte viskoelastische Verhalten der Textilien dazu, dass der Schließwiderstand umso höher ist, je schneller der Schließvorgang von staten geht (s. [WVB+11, SLB97, BBS03]). So setzt sich das Werkstoffcharakteristikum aus einem viskosen (irreversiblen) und einem elastischen (reversiblen) Verhaltensanteil zusammen. Ein Prozessschritt, bei dem die Viskoelastizität des Werkstoffs ebenfalls ersichtlich wird, ist das Schließen eines Werkzeugs auf einen definierten Spalt mit anschließender Verweilzeit. Die viskose Eigenschaft der Textilwerkstoffe führt in einem definierten Zeitraum zu einer Relaxation, solange der Werkstoff bei konstanter Kavitätshöhe belastet wird (s. [BiB06]). Dies führt dazu, dass die auf ein Werkzeug wirkende Kompaktierungskraft bei konstanter Kavitätshöhe abnimmt. Somit nimmt auch die Fixierungskraft lokal verstärkter Halbzeuge im Zeitraum des Evakuierungs- und Injektionszeitraums bis zu einem gewissen Sättigungswert hin ab. Dieses Phänomen, das aufgrund sich einstellender Neuorganisation von Filamenten und Filamentbündeln durch interne Translation und Rotation erfolgt, kann über folgende Gleichung durch eine Kontrolle der Kompaktierungsspannung bestimmt werden (s. [KLAR08]):

$$rel = \frac{\sigma_{Anfang} - \sigma_{Ende}}{\sigma_{Anfang}} .$$

Gleichung 3.3

Bei dieser Gleichung beschreibt rel die Relaxation während der konstanten Kavitätshöhe, σ_{Anfang} die Spannung im Textil vor der Relaxation und σ_{Ende} die Spannung im textilen Halbzeug nach einer definierten Zeit konstanter Kavitätshöhe. Neben der elastischen und visko-elastischen Verformung ist die dritte Art einer Textildeformation plastischer Natur. Sie ist dann zu sehen, wenn ein Halbzeug mehrfach komprimiert wird (s. [SSB06, SLB97, BBS03]). So nimmt der Kompaktierungswiderstand bei Mehrfachkomprimierung eines Halbzeugs zunehmend ab. Dies führt aufgrund der unterschiedlichen Prozessketten im RTM- und Nasspress-Verfahren zu unterschiedlichen Kompaktierungswiderständen im Imprägnierwerkzeug.

3.4.2 Permeabilität

In diesem Abschnitt wird die Permeabilität beleuchtet, die den Fließwiderstand beschreibt, den ein Textil auf das Harz während des Injektionsvorgangs ausübt. Für Flüssigimprägnierverfahren ist dieser während des Füllvorgangs entscheidend (s. [BuB03, BiB06]).

Wie bei Endruweit diskutiert, gibt es verschiedene Wege die Eigenschaften textiler Strukturen bei Fluidfluss zu beschreiben (s. [End03]). So ist eine Charakterisierung durch die Verwendung der „Kontinuitätsgleichung“ und der „Impulsgleichung“ in Euler- oder Lagrange-Koordinaten möglich.

Die empirische Ermittlung der Permeabilität kann sowohl in sogenannten ungesättigten, als auch gesättigten Messungen erfolgen. Während bei Ersteren der textile Werkstoff vorab in trockenem Zustand vorliegt und die Permeabilitätsbestimmung während der Initialbenetzung mit einem entsprechenden Testfluid stattfindet, wird sie bei Zweiteren anhand bereits vollständig mit Testfluid gesättigten Prüfkörpern durchgeführt. Motivation für die Permeabilitätsermittlung an gesättigten Prüfkörpern, wie im Rahmen dieser Arbeit erfolgt, ist die Möglichkeit einen größeren Informationsgehalt aus einer Messung zu generieren und auch verschiedene FVGs während eines Messzykluses zu analysieren (s. [UBF11]). Ein in der Literatur vorgestelltes Vorgehen ist ein druckgetriebenes Verfahren mit radialem Fluidfluss, anhand dessen die Permeabilität über die Kenngrößen Durchflussrate, Druckgradient, Fluidviskosität und entsprechendem Faservolumengehalt des Textils ermittelt werden kann. Die dabei zugrundeliegende Gleichung lautet (s. [BBS03]):

$$K \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + K_{zz} \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = -\mu \frac{\dot{h}}{h} . \quad \text{Gleichung 3.4}$$

In diesem Zusammenhang beschreibt r den äußeren Radius des Prüfkörpers, h die Probendicke, h_0 die ursprüngliche Probendicke, \dot{h} die Probekörper-Kompaktierungsrate und P den Druckgradienten des Fluids über die Probe. Aufgrund der Rahmenbedingung einer konstanten Kavitätshöhe ist die Variable \dot{h} gleich null zu setzen. Bezüglich der Gegebenheit eines nicht mit Druck beaufschlagten Prüfkörperstands ist dP gleich dem Eingangsdruk des Prüffluids zu setzen. r_i stellt den Radius eines eingebrachten Lochs am Injektionspunkt und r_a den äußeren Probenradius dar.

Basierend auf den Rahmenbedingungen gilt bei:

$$r = r_i: \frac{dP}{dr} = -\frac{\mu Q}{2\pi r_i h K} \text{ und}$$

$$r = r_a: P = 0,$$

$$K_{12} = \frac{\mu \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot P} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) . \quad \text{Gleichung 3.5}$$

Analog der Permeabilitätsmessung in Ebenenrichtung erfolgt die Kalkulation in Dickenrichtung gemäß folgender Gleichungen (s. [Oua12]):

$$K_{33} = \frac{\mu \cdot h \cdot Q}{P \cdot A} . \quad \text{Gleichung 3.6}$$

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Parametern verkörpert A in dieser Gleichung die Prüfkörperfläche senkrecht zur Fluidflussrichtung.

Eine allgemein weit verbreitete Form der Permeabilitätsbestimmung ist durch das Gesetz von Darcy beschrieben (s. [EnE04, BBS+99, ShS10]). Dieses Gesetz diente ursprünglich dazu, den Fluss von Wasser durch Sedimente zu beschreiben (s. [Dar56]) und basiert auf der Navier Stokes Gleichung, die wie folgt lautet:

$$\bar{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla P . \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Dabei beschreibt \bar{u} die Geschwindigkeit des Fluids, K die Permeabilität, μ die Viskosität des Fluids und ∇P den Druckgradient der am Textil anliegt. Nach Darcy wird die Fluidgeschwindigkeit neben dem anliegenden Druckgradient von der Viskosität des

Fluids und der sogenannten Permeabilität beeinflusst. Parameter, die diese Permeabilität wiederum verändern, sind die Architektur des Textils sowie die Dimension der Filamentbündel, die Abstände zwischen den Filamentbündeln und die Orientierung der Fasern in Relation zur Fließrichtung des Fluids (s. [EnE04]).

Zur Charakterisierung des Fluidflusses stützt sich das Gesetz von Darcy auf folgende Rahmenbedingungen (s. [ShS10, Sta06]):

- Fluidfluss durch das Textil ist laminar
- Probekörper liegt gesättigt (vollständig imprägniert) vor
- Injektionsmedium ist ein Newtonsches Fluid
- Effekte aufgrund der Gravitationskraft sind vernachlässigbar
- Fluid ist chemisch inert
- Haftreibungseffekte sind vernachlässigbar
- Textil ist innerhalb einer Richtung homogen

In der Literatur werden die zur Fertigung von FKV verwendeten textilen Werkstoffe in die drei Skalen Makro-, Meso- und Mikroebene unterteilt.

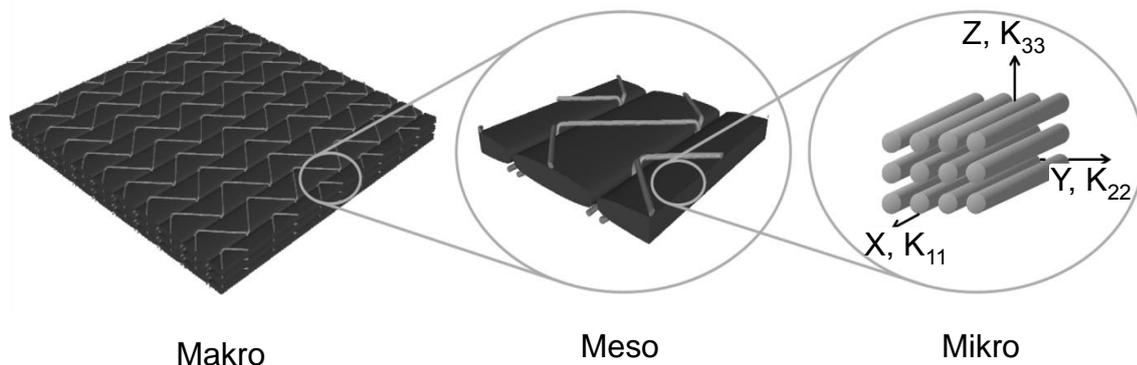


Abbildung 3.6: Definition der Permeabilitätsachsen eines Textils in Anlehnung an (s. [LGA+08])

Zur Ermittlung der Permeabilität ist eine Definition der Material-Koordinaten-Richtungen erforderlich, die auf der Mikroebene textiler Strukturen erfolgt (siehe Abbildung 3.6). Entsprechend einer allgemeinen Konvention ist bei Gelegen die Richtung entlang der Verstärkungsfasern, welche die höchste Permeabilität aufweist, als X-, K_{11} - oder axiale Richtung definiert. Die in der Ebene liegende Achse senkrecht zur K_{11} -Richtung wird als Y-, K_{22} -, oder Transversalachse und die Achse in Dickenrichtung als Z-, oder K_{33} -Richtung bezeichnet (s. [End03, Gut97]).

Aufgrund der Anisotropie des Werkstoffs ergibt sich für die Permeabilität ein Tensor zweiter Ordnung, der für textile Werkstoffe grundsätzlich vollständig charakterisiert

sein muss. Um aber nach Definition der drei Hauptrichtungen K_{11} , K_{22} und K_{33} den Permeabilitätstensor einfach lösbar zu gestalten, ist eine Vereinfachung möglich. So können die Permeabilitäten K_{xy} , K_{yz} und K_{zx} aufgrund einer transversal angenommenen Permeabilität bei linear orientierten Faserbündeln gleich null gesetzt werden (s. [Swe11, EnE04]). Dementsprechend resultiert für den Permeabilitätstensor die in Gleichung 3.8 dargestellte Diagonalmatrix:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{bmatrix}. \quad \text{Gleichung 3.8}$$

Insbesondere bei seriennahen Bedingungen mit verschiedenen Arten der Fixierung der lokalen Verstärkungen ist darauf zu achten, dass Veränderungen an der Struktur, wie zum Beispiel das Einbringen von Fixierungspunkten, oder Nähten die „lokale Permeabilität“ verändern, beziehungsweise diese durch Öffnen von Gassen lokal erhöhen können (s. [TWH12]).

3.4.3 Fließfrontprogression

Nach Vorstellung des Kompaktierungswiderstands und der Permeabilität als Kenngrößen zur Textilcharakterisierung, wird in diesem Abschnitt auf den Stand der Forschung hinsichtlich des Verhaltens textiler Halbzeuge in Flüssigimprägnierverfahren eingegangen. Dabei werden neben der Fließfrontaufzeichnung flächiger textiler Halbzeuge insbesondere die Literaturstellen beleuchtet, welche sich mit dem Monitoring lokal verstärkter textiler Halbzeuge befassen. Zudem werden die Grundlagen vorgestellt, die als Basis für die Konzeptionierung der Anlagen-, Werkzeug- und Systemtechnik zur Visualisierung der Fließfrontprogression im RTM-Verfahren gedient haben.

Es sind in der Literatur zahlreiche Quellen zur Visualisierung des Fließfrontverlaufs an schalenförmigen textilen Halbzeugen zu finden. So wird zum Beispiel die Visualisierung des Fließverhaltens in Bauteilrädern (s. [BSG+00]) und die Visualisierung des Fließfrontverlaufs an flächigen textilen Halbzeugen im sogenannten Spaltimprägnierverfahren vorgestellt (s. [MiF08]).

Über die Betrachtung homogener Wanddicken in der Kavität des Injektionswerkzeugs hinaus, wird bei (s. [Pas14]) das Fließverhalten und die Simulation des Fließverhaltens an Wanddickenübergängen bei Preformüberlappungen beleuchtet, während (s. [SBA00]) die Fließfront eines flächigen textilen Halbzeugs bei verschiedenen Kavitätshöhen und entsprechend unterschiedlichen Faservolumengehalten in der Kavität

analysiert. Dabei ist den Versuchs- und Simulationsergebnissen die Komplexität der Fließfrontprogression mit entsprechenden Lufteinschlüssen in Bereichen mit hohen Faservolumengehalten zu entnehmen. Der Imprägniervorgang lokal verstärkter textiler Halbzeuge im RTM-Prozess in einer Kavität, in der keine Wanddickenanpassung vorliegt, und entsprechend unterschiedliche Faservolumengehalte resultieren, wird zudem bei (s. [SHE+12]) untersucht.

Weitere Bereiche in der Literatur, an denen Untersuchungen vorgestellt werden, die für die Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge von Bedeutung sind, findet man bei (s. [BBS+99]) und (s. [HGT98]). Dort wird das sogenannte Racetracking analysiert, welches ein Voreilen des Injektionsfluids am Bauteilrand, oder an Wanddickenübergängen beschreibt, wie dies auch bei lokal verstärkten Halbzeugen auftreten kann. Dieses Racetracking erhöht die Komplexität des Imprägnierprozesses und führt durch unkontrolliertes Harzvoreilen zu Ausschussbauteilen.

Ein für die Fertigung lokal verstärkter Lamine bedeutender Forschungsschwerpunkt, der jedoch in der Literatur nicht ausführlich behandelt wird, ist das Füllverhalten lokal verstärkter textiler Halbzeuge in Flüssigimprägnierverfahren, wie zum Beispiel dem Resin Transfer Moulding Prozess.

Im Bereich von Flüssigimprägnierverfahren (Liquid Composite Moulding LCM) sind zur Fließfronterfassung verschiedene Systemtechniken etabliert. Diese können zur Datenerfassung im Versuchsbereich und zum Monitoring des Prozessablaufs in der Serienproduktion dienen und stellen eine Validierungsmöglichkeit zwischen Simulation und Injektionsprozess dar. Zu unterteilen sind diese Verfahren einerseits in werkzeugseitige Verfahren, bei denen die Sensorik zur Fließfrontdetektion in das Werkzeug integriert ist und andererseits in halbzeugseitige Verfahren, bei denen die erforderlichen Sensoren ins Textil eingebracht werden. Das visuelle Verfahren ist laut (s. [MaH16]) das Referenzverfahren zur Detektion von Fließfronten. Dabei wird zumindest eine der Werkzeughälften über einen Transparenzwerkstoff realisiert, um die Progression der Fließfront während des Injektionsvorgangs beobachten zu können. Dieses Verfahren stellt aufgrund der mechanischen Eigenschaften der verwendbaren transparenten Werkstoffe eine Herausforderung hinsichtlich der Durchbiegung der Kavität und der eingeschränkten analysierbaren geometrischen Komplexität des Bauteils dar. Anhand dieser Herangehensweise ist zudem keine Aussage über den Benetzungsgrad im Inneren des Halbzeugs sowie keine Imprägnierung mit Harz-Härter-Trennmittel-Gemisch möglich. Andererseits sind bei dieser Prozessausstattung keine Sensorwechsel erforderlich, ein maximaler Informationsgehalt (flächige Visualisierung) darstellbar und

sehr plakative Ergebnisse aus den Versuchen ableitbar. Eine exemplarische Anwendung der visuellen Analyse findet man bei (s. [BSG+00]) zur Untersuchung divers ausgelegter Bauteilradien auf den Imprägnierprozess. Darüber hinaus wurde das visuelle Verfahren zur Ermittlung der Fließfrontprogression an flächigen textilen Lagen im Spaltimprägnierverfahren herangezogen [MiF08]. Außerdem ist eine visuelle Ermittlung der Fließfrontposition insbesondere zur Bestimmung der vorgestellten ungesättigten Permeabilität (Übergang trockenes Halbzeug in den imprägnierten Zustand) in der Literatur weit verbreitet, wobei hiermit exemplarisch auf folgende Literaturstellen verwiesen sei (s. [SWM04, DKE13, LuE02, ABB+11, VRA+14]).

3.5 Mechanik von Faser-Kunststoff-Verbunden

Da für die Ergebnisinterpretation der mechanischen Plattenprüfungen Kenntnisse über die Mechanik von FKV erforderlich sind, wird in diesem Kapitel auf die Einordnung der Versuche eingegangen. Darüber hinaus werden die für lokale Verstärkungslagen relevanten Konstruktionsspezifika sowie die verschiedenen auftretenden Versagensmechanismen betrachtet. Die Koordinatenachsen und auftretenden Spannungen im Laminat werden dabei entsprechend der allgemeinen Nomenklatur der Mechanik definiert. So werden Zugspannungen entlang der Fasern mit σ_1 , in der Ebene senkrecht dazu mit σ_2 und in Laminatdickenrichtung mit σ_3 bezeichnet, wobei die auftretenden Schubspannungen ebenfalls gemäß Konvention bezeichnet und mit τ symbolisiert werden (s. [NWH05]).

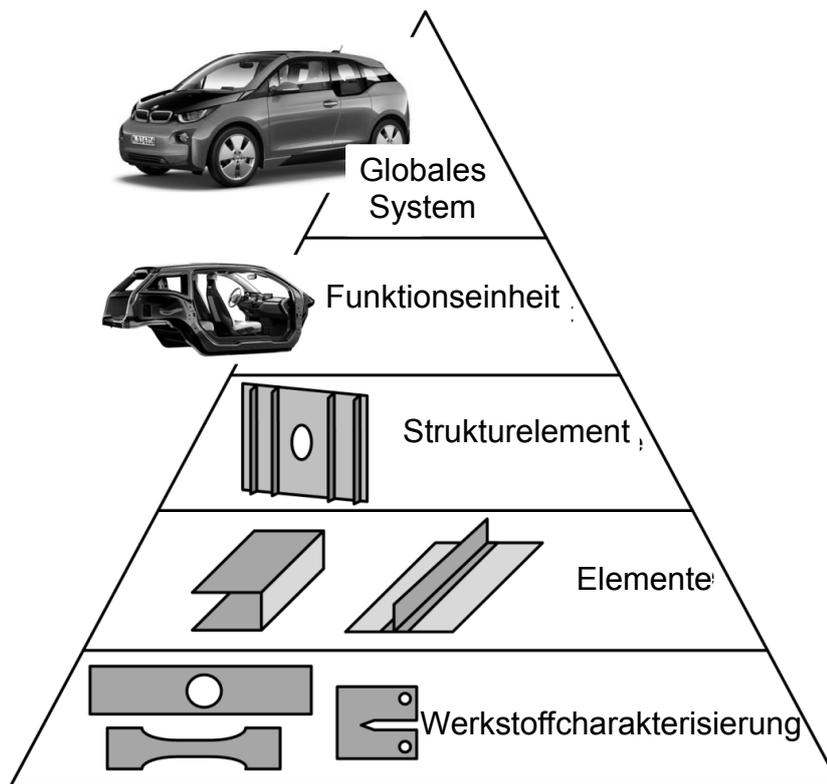


Abbildung 3.7: Mechanische Prüfung von FKV-Komponenten mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden (s. [Rou06])

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden ist auf deren Unterschiede zu „klassischen“ Werkstoffen, wie zum Beispiel Metallen hinzuweisen. Grund für die Unterschiede ist die angesprochene heterogene Struktur der langfaserverstärkten Kunststoffe auf Mikroebene, die zu einer Anisotropie des Werkstoffs führt (s. [Ehr06]). Grundsätzlich sind drei Faktoren zu nennen, die die mechanischen Eigenschaften der Faser-Kunststoffverbunde beeinflussen. Dies sind die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe, die Mikro- und Makrostruktur der Halbzeuge sowie der im Bauteil vorliegende Faservolumengehalt (s. [KeZ00]). Aus diesen Charakteristika lassen sich die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Laminats ableiten beziehungsweise berechnen. Eine hierfür in der Literatur verbreitete Methode ist die sogenannte klassische Laminattheorie (Classical Laminate Theory – CLT). Damit werden Steifigkeiten von Laminaten ermittelt. Da in der CLT Ondulationen der Fasern und Fehlstellen im Laminat keine Berücksichtigung erfahren und diverse vereinfachende Annahmen getroffen werden, sind die Ergebnisse für die vorliegenden Analysen nicht ausreichend detailliert möglich. Sie können lediglich als Abschätzung

der Lamineigenschaften entlang lokaler Verstärkungslagen, keinesfalls jedoch senkrecht zu lokalen Verstärkungslagen dienen (s. [Wie86]).

Aufgrund dieser Tatsache und da zur Dokumentation der verschiedenen durchgeführten mechanischen Untersuchungen die Versagensmechanismen der Lamine von großer Bedeutung sind, werden in den Versuchsauswertungen die charakteristischen Brüche der geprüften Komponenten vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgen dabei gemäß der Logik aus Abbildung 3.7 auf Ebene der Elemente und Strukturelemente.

Den Sockel der dargestellten Komplexitätspyramide stellen die Probekörper dar, die zur Materialcharakterisierung, beziehungsweise deren Kennwertermittlung im Verbund, dienen. In höheren Komplexitätsstufen finden Elementversuche statt, anhand denen spezielle Designmerkmale beleuchtet werden sollen. In der mittleren Komplexitätsebene finden Prüfungen von Elementzusammenbauten statt, die eine größere Strukturkomponente darstellen, während im nächsthöheren Komplexitätsgrad die zusammenhängende Funktionseinheit untersucht wird. An der Spitze der Komplexitätspyramide befindet sich schließlich die Analyse der Gesamtstruktur als „Globales System“ (s. [Rou06]).

Während die Materialcharakterisierung entsprechend der Darstellung anhand von Probekörpern der untersten Komplexitätsstufe durchgeführt werden, weisen Elemente und insbesondere Strukturelemente, wie sie auch lokal verstärkte Prüfkörper darstellen, eine deutlich höhere Komplexität auf. Dies erhöht unmittelbar die Komplexität der Prüfanordnungen, macht eine klassische Kennwertuntersuchung unmöglich und eine Ermittlung von Vergleichskennzahlen erforderlich. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, vergleichende Kennwerte zu erarbeiten, Designmerkmale zu definieren und den Einfluss ausgewählter Variationsparameter zu charakterisieren. Hierfür werden in den folgenden Kapiteln neben den Eigenschaften lokal verstärkter Lamine verschiedene Prüfmethode wie die Zug- und Biegeprüfung sowie Schnitt- und Schliffbildherstellung vorgestellt.

3.5.1 Eigenschaften lokal verstärkter Lamine

Die positiven Auswirkungen lokaler Waddickenerhöhungen bei inhomogen belasteten Bauteilen wird neben zahlreichen anderen Literaturstellen bei (s. [Sch07]) festgestellt. Zur Umsetzung derartiger Querschnittsänderungen sind konstruktive Gestaltungsregeln zu beachten, um lokale Spannungsspitzen zu vermeiden und die Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauer der FKV-Bauteile zu optimieren.

Die dabei diskutierten Gestaltungsregeln, die in Abbildung 3.8 teilweise exemplarisch dargestellt sind, lauten (s. [Sch07]):

- Fasergerechte Gestaltung von Wanddickenübergängen
- Verwendung von UD-Lagen geringer Stärke im Laminat
- Unterschiedliche Faserorientierungen angrenzender Lagen (Differenz mindestens 5° , um Risse zu stoppen)
- Vermeidung von Faserondulationen im Laminat
- Maximaler Faservolumengehalt, um die gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften zu maximieren
- Keine Wanddickenübergänge in hoch belasteten Bereichen
- Lokale Verstärkungslagen sind mit einer durchgehenden Deckschicht zu belegen, um eine Delamination möglichst zu verhindern

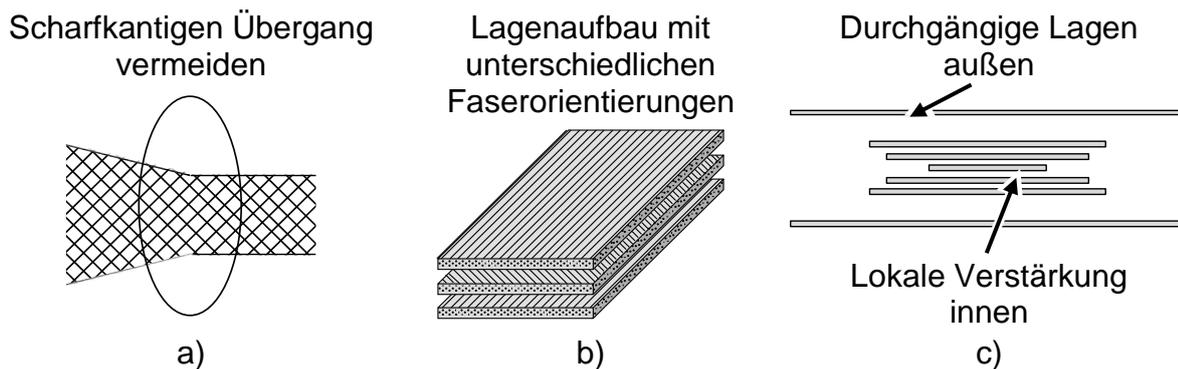


Abbildung 3.8: Gestaltungsregeln für FKV mit lokalen Verstärkungen hinsichtlich Wanddickenübergängen (a), Faserorientierungen (b) und Decklagenapplikation (c) in Anlehnung an (s. [Sch07])

Um das Optimum eines Laminats hinsichtlich dessen Schwingungsverhalten zu erzielen, wurde eine Studie zur Gestaltung eines Halbzeugs mit lokalen Bauteilverstärkungen durch partiell aufgebraute Faserlagen durchgeführt. Basierend auf Erkenntnissen aus der Simulation wurde das Bauteil gefertigt und analysiert (s. [Sch13]). Bei diesen Analysen stand die Optimierung der Eigenfrequenzen eines Plattenbauteils im Vordergrund. Dabei wurden simulativ die erforderlichen Patchgeometrien zur Minimierung von Schwingungen ermittelt und anhand von Bauteilversuchen validiert. Nach (s. [Sob07]) ist in diesem Zusammenhang jedoch zu betonen, dass vor allem für Serienanwendungen neben den mechanischen Eigenschaften auch fertigungstechnische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen. So ist für die automobile

Großserie eine „kostengünstige, automatisierte Fertigung erstrebenswert, die dennoch das theoretische Leichtbaupotential der eingesetzten Werkstoffe optimal nutzt und möglichst große Gestaltungsmöglichkeiten bietet“ (s. [Sob07]).

3.5.2 Prüfmethoden

Die Werkstoffprüfung allgemein sowie die der Faser-Kunststoff-Verbunde lässt sich in verschiedene Kategorien, wie in zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen unterteilen. Die entsprechenden, im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verfolgten Verfahren sind im weiteren Verlauf aufgeführt. Zusätzlich werden zur Analyse der Laminatqualität in Abhängigkeit der verschiedenen Variationsparameter Fotographieaufzeichnungen der Schnittansichten und Mikroskopieaufnahmen erstellt. Dadurch können zudem die in den zerstörenden Prüfungen ermittelten, quantitativen Ergebnisse und Ersatzkennwerte bestmöglich zur Laminatqualität korreliert werden (s. [DPV97]). Auf die Grundlagen zu den durchgeführten, zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen unter Zug- und Biegebelastung wird in Anhang 1 und Anhang 2 eingegangen.

3.5.3 Versagensmechanismen

Zur Eingruppierung der bei den durchgeführten Versuchen auftretenden Versagensmechanismen, wird in diesem Abschnitt auf die Versagensarten von FKV und speziell lokal verstärkter FKV eingegangen. Ziel dieser Betrachtungen ist es, eine Charakterisierung der verschiedenen Ausführungen lokal verstärkter Halbzeuge vorzunehmen und entsprechende Rückschlüsse für den angestrebten Richtlinienkatalog zu ziehen. Das Versagensverhalten von Faserverbunden ist grundsätzlich vom Versagen monolithischer Materialien wie der Metalle zu unterscheiden. Grund dafür, dass dies bis heute Gegenstand der Forschung ist, ist die Tatsache, dass die heterogene Struktur endlosfaserverstärkter Kunststoffe zu einem stufenartigen Versagen des Werkstoffs führt und aufgrund der daraus resultierenden Komplexität das Bruchverhalten komplex und schwierig vorhersehbar ist (s. [Puc96]). Die Versagensarten von FKV lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen - die des Zwischenfaserbruchs (ZfB) und des Faserbruchs (Fb). Welche Art des Versagens auftritt, bzw. zunächst einsetzt, hängt von der Art des jeweils vorliegenden Spannungszustands sowie Lagenaufbaus ab und ist nur schwer vorherzusagen (s. [Puc96]).

Der Zwischenfaserbruch (ZfB) ist definiert als das Eintreten örtlich begrenzter, die Einzelschichten in ihrer Dickenrichtung durchtrennender Bruch (s. [Puc96]). ZfB können

durch verschiedene Belastungsarten, wie Zug- und Druckspannungen und aufgrund verschiedener Arten von Scherung in σ_1 - und σ_2 -Richtung auftreten (s. [Sta99]). ZfB gehen von der Kontaktfläche zwischen Fasern und Matrix aus, wo aufgrund von Steifigkeitssprüngen zwischen Fasern und Matrix durch Spannungsüberhöhungen höhere Belastungen vorliegen (s. [Ehr06]). Es ist jedoch grundsätzlich möglich die Ausbreitung von Zwischenfaserbrüchen in Laminatdickenrichtung durch verschieden orientierte Einzellagen zu unterbinden. Bei einem unidirektionalen Laminat dagegen kann ein Zwischenfaserbruch nicht durch anders orientierte Lagen aufgenommen werden, sondern dehnt sich über die Gesamtdicke des Aufbaus aus (s. [Puc96]). Tritt ein Zwischenfaserbruch in der Matrixschicht zwischen zwei Ebenen auf, so spricht man von einer Delamination (s. [Sch07]). Insbesondere bei der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften lokal verstärkter Laminare ist es wichtig zu bewerten, ob ein vorliegender Lagenaufbau zu Kräften senkrecht zur Laminarebene führt. Das kann beispielsweise, wie in Abbildung 3.9 aufgeführt, die faserdominierte Querkontraktion von Einzellagen bei Zugbelastung, speziell auch bei lokal verstärkten Bauteilen hervorrufen. Dieser Effekt wirkt sich bei großen Faserorientierungsunterschieden, entsprechend auftretenden Querdehnungsunterschieden und damit verbundenen Spannungen zwischen benachbarten Lagen auf die mechanischen Eigenschaften negativ aus (s. [Puc96]).

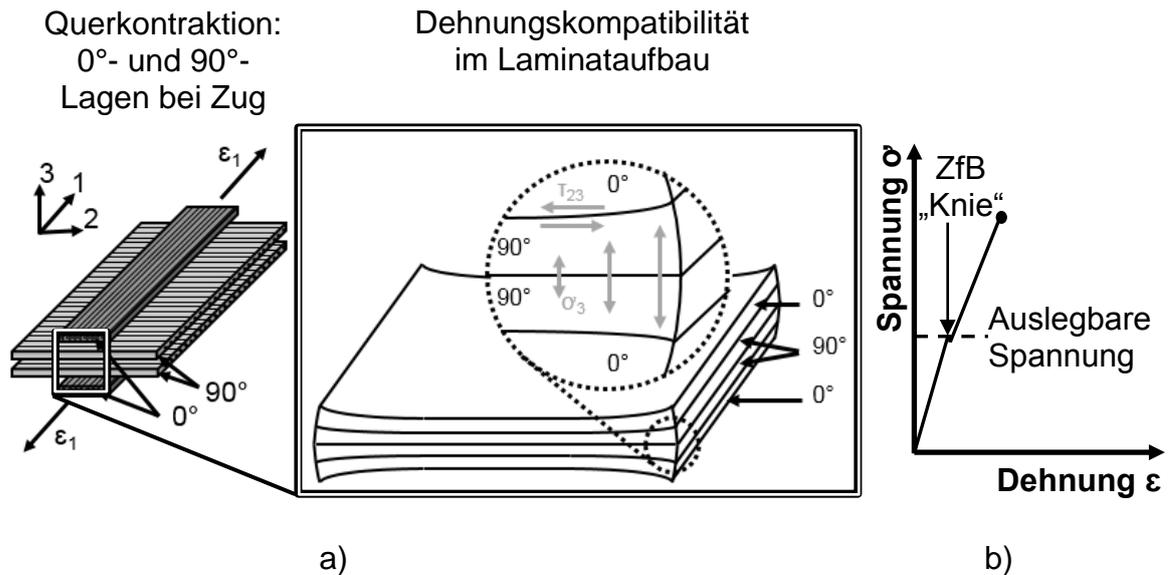


Abbildung 3.9: Effekte bei Faser-Kunststoff-Verbunden mit lokalen Verstärkungen: Interlaminare Spannungen (a) und mechanische Charakteristika (b) anhand von Zwischenfaserbrüchen in Anlehnung an (s. [Sch07])

Insbesondere im Fall lokal verstärkter Laminats, mit ihren im Bauteil endenden Lagen, führen stark unterschiedlich orientierte Unidirektionallagen (UD-Lagen) aufgrund der Dehnungskompatibilität am Rand lokaler Verstärkungen zu dreidimensionalen Spannungszuständen am Übergang zwischen verstärktem und unverstärktem Bereich. So resultieren schließlich Zugkräfte in z-Richtung (σ_3) (siehe Abbildung 3.9a). Dadurch werden ZfB hervorgerufen, welche bei Bauteilprüfungen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm an einer Dehnungszunahme bei konstanter Kraft an einem sogenannten „Knie“ zu erkennen sind (Abbildung 3.9b). Trotz der Tatsache, dass ein multiaxiales Laminat weiterhin Lasten aufnehmen kann, ist in diesem Fall der Verbund irreversibel geschädigt und kann nicht mehr seine ursprünglichen mechanischen Eigenschaften erreichen (s. [Sch07]). Bereiche in Laminaten, die für die Ausbreitung von Zwischenfaserbrüchen kritisch sind, sind in Abbildung 3.10 aufgeführt. Diese sind ein freies Bauteilende, eine Kerbe beziehungsweise Bohrung im Bauteil, eine Klebeverbindung sowie ein Wanddickenübergang im Bauteil wie bei lokal verstärkten Bauteilen der Fall.

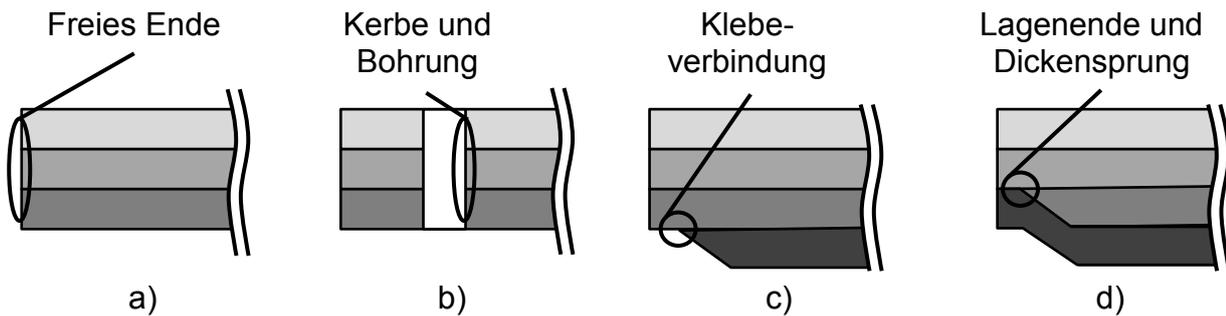


Abbildung 3.10: Ausgangsbereiche für Zwischenfaserbrüche: freies Ende (a) Kerbe und Bohrung (b), Klebeverbindung (c) und Lagenende und Wanddickenübergang (d) nach (s. [Sch07])

Wie in der Literatur aufgeführt, sind konstruktive Maßnahmen wie eine flächige Deckschicht bei Lagenenden im Bauteil, oder geringe Faserorientierungsunterschiede zwischen benachbarten Lagen hilfreich (s. [HeH14, ThW94]). Diese verschieben ein Auftreten von Zwischenfaserbrüchen hin zu höheren Kräften. Außerdem ist es möglich, Delaminationen durch die Verwendung von Matrixwerkstoffen mit hoher Bruchzähigkeit sowie durch Vernähen von Preforms in z-Richtung zu reduzieren (s. [Sch07]). Diese Punkte sind bei der Definition des Lagenaufbaus, der Konstruktionsmerkmale und des Designs frühzeitig zu berücksichtigen. Da diese Charakteristika aber partiell einer Großserienfertigung entgegenstehen, werden die in Abbildung 3.10 aufgeführten Kategorien im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen teilweise bewusst akzeptiert und berücksichtigt.

Im Gegensatz zum ZfB beschreibt der Faserbruch das Versagen des Faserwerkstoffs in kompletten Bündeln, nicht das einzelner Filamente. Faserbrüche entstehen bei Belastung des Laminats unter Zug-, oder Druckspannung in 1-Richtung (s. [Sch07]). Diese Art des Versagens tritt dann ein, wenn die Belastungsgrenze des Verstärkungsmaterials erreicht ist und die Festigkeit des Verbunds vollständig genutzt wird. Aufgrund der in Verbundstrukturen auftretenden Materialschwankungen treten erste Faserbrüche bereits bei 70-80 % der Versagensspannung auf (s. [Sch07, Ehr06]). Aufgrund der optimalen Nutzung der mechanischen Eigenschaften der Fasern bei Zugbelastung werden FKV-Bauteile wenn möglich auf Zug ausgelegt. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften in Richtung von Zugbelastungen, bei denen die Fasern die Hauptlast ableiten, ist die Stabilität der FKV von der Druckfestigkeit der Fasern sowie von der Stützwirkung des Matrixmaterials und der Faser-Matrix-Haftung geprägt (s. [Ber92]). So hat eine nicht ausreichende Abstützung der Fasern durch die Matrix

zur Folge, dass Fasern ausknicken, es zu Zwischenfaserbrüchen und Mikrowelligkeiten („Kinking“) kommt und schließlich ein Komplettversagen des Laminats eintritt (s. [CDP+08]). Charakteristisch für das Versagen des Laminats durch das sogenannte Scherknicken ist der Faserbruch auf zwei Ebenen. So erfolgt im Verbund ein doppelter Bruch aufgrund von zusätzlich zur Druckkraft wirkenden Scherungen. Da es in der Literatur zahlreiche Quellen zur Bruchmechanik von FKV zu finden gibt, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter auf den Stand der Technik eingegangen, sondern der Leser auf die Literaturquellen (s. [Puc96, ACM+15, Ehr06, Sta99]) verwiesen.

4 Methodische Vorgehensweise

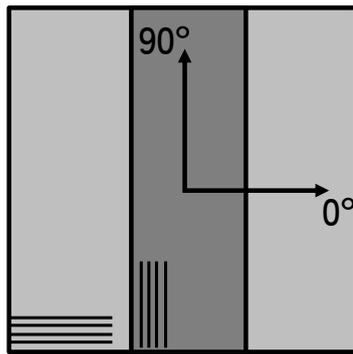
Nachdem die Motivation und Zielsetzung der vorliegenden Untersuchungen sowie der Stand der Technik zur Herstellung lokal verstärkter Halbzeuge im RTM- und Nasspressverfahren diskutiert wurden, wird in diesem Abschnitt auf die Vorgehensweise eingegangen, über welche die Erkenntnisse zur Fertigung lokal verstärkter FKV-Bauteile in Großserie generiert werden. So wird zunächst der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen vorgestellt, ehe auf die Versuchsstruktur, die Variationsparameter und die dafür verwendete Anlagen- und Werkzeugtechnik eingegangen wird.

4.1 Definition der Untersuchungsschwerpunkte

Zur Realisierung lokal verstärkter Bauteile im Großserienmaßstab sind diverse Handlungsfelder zu bearbeiten, die in Abbildung 2.1 in Kapitel 2 dargestellt sind. Während einzelne Arbeitspakete wie die Automatisierungstechnik, die Wirtschaftlichkeitsbewertung, oder die Bauteilauslegung von Entwicklungsschnittstellenpartnern bearbeitet werden, erfolgt im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen die Beleuchtung der Imprägnierung und der Funktionalität lokal endlosfaserverstärkter Halbzeuge und Bauteile.

4.2 Definition der Nomenklatur

Um die durchgeführten Versuche hinsichtlich deren Verstärkungsgeometrie und der Faserorientierung der Verstärkungslagen entlang der vorliegenden Arbeit eindeutig benennen zu können, wird in diesem Abschnitt die verwendete Nomenklatur definiert. Die lokal verstärkten Halbzeuge werden gemäß Abbildung 4.1 über eine Angabe von zwei Winkeln charakterisiert, wobei die 0° -Richtung des Koordinatensystems entlang der im Grundlaminat (GL) vorwiegend enthaltenen 0° -Richtung orientiert ist (siehe Abbildung 4.1). Die erste Ziffer der Platten- und Prüfkörperbezeichnung gibt jeweils die Orientierung der Längsrichtung der lokalen Verstärkungslage im Hauptkoordinatensystem zum Grundlaminat an, während die Zweite die Orientierung der Fasern innerhalb der dunkel dargestellten lokalen Verstärkungslage charakterisiert. Eine $90^\circ/90^\circ$ -Variante ist dementsprechend, wie in Abbildung 4.1 aufgeführt, ein verstärktes Halbzeug, bei dem sowohl die lokale Verstärkungslage (LV) als auch die Faserorientierung in der Verstärkungslage 90° zur Hauptachse des Halbzeugs orientiert sind.



Orientierung LV zum GL/

Orientierung Fasern in LV zum GL

⇒ 90°/90°-Bezeichnung:

90°-Orientierung der LV zum GL

90°-Orientierung der Fasern in der LV zum GL

| Faserorientierung

■ Lokale Verstärkungslage

□ Unverstärktes Grundlaminat

Abbildung 4.1: Nomenklatur zur Definition der Orientierung der lokalen Verstärkungslage und der enthaltenen Kohlenstofffasern

4.3 Variationsparameter

In diesem Abschnitt werden die im Rahmen der Untersuchungen beleuchteten, für die gegebenen Rahmenbedingungen der Großserienprozesse relevanten Untersuchungsparameter aufgeführt und erläutert. Ausgangspunkt und Fokus der vorliegenden Arbeit stellen die in der Großserie bereits etablierten Werkstoffe dar. So werden die Untersuchungen im ersten Schritt an Gelegen aus 50K Kohlenstofffaserrovings durchgeführt und die Injizierbarkeit für den Einsatz der textilen Preforms in den Prozessen Hochdruck (HD)- RTM und Nasspressen untersucht. Aufbauend darauf werden zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit lokal verstärkter Bauteile und zum Nachweis der Verarbeitbarkeit vielversprechender Alternativtextilien Komponenten, wie Faserdirektablagewerkstoffe, Glasfasergelege und Glasfasermatten untersucht. Die zu beleuchtenden Variationsparameter werden einerseits den halbzeugseitigen und andererseits den werkzeugseitigen Parametern zugeordnet. So werden zunächst die Parameter auf Halbzeugebene vorgestellt, ehe auf die Werkzeugparameter eingegangen wird.

4.3.1 Auf Ebene des Halbzeugs

In den folgenden Untersuchungen wird auf den Einfluss der aufgeführten Punkte auf das Imprägnierverhalten eingegangen:

- Faserorientierung in den lokalen Verstärkungslagen
- Position der lokalen Verstärkungslagen in Halbzeugdickenrichtung
- Gestaltung des Wanddickenübergangs am Rand der LV
- Grundgeometrie der lokalen Verstärkungslagen
- Fixierung der lokalen Verstärkungslagen auf den Grundlaminatlagen
- Werkstoff der Grundlaminatlagen
- Werkstoff der lokalen Verstärkungslagen

So werden sowohl die Werkstoffe des Grundlaminats (Kohlenstofffasergelege, Glasfasergelege, Glasfasermatten) als auch die der lokalen Verstärkungslagen (Kohlenstofffasergelege und Faserdirektablagewerkstoffe) variiert. Während Kohlenstofffasergelege jeweils die Basisvariante mit maximalen mechanischen und guten Prozesseigenschaften darstellen, werden zusätzlich Werkstoffe beleuchtet, die eine wirtschaftlichere Alternative dazu sein könnten.

Um eine grundlegende statistische Aussage zu ermöglichen, werden die verschiedenen Einzelvarianten in einem vollfaktoriellen Versuchsplan über die kompletten Analysen hinweg mit jeweils drei Wiederholungen in den Prozessanalysen und sechs Wiederholungen in der Werkstoffcharakterisierung und den mechanischen Analysen untersucht.

Zusätzlich werden verschiedene Faserorientierungen in den lokalen Verstärkungslagen ($90^\circ/90^\circ$ und $90^\circ/0^\circ$) untersucht, um verschiedene Anwendungs- bzw. Lastfälle bedienen zu können und um einen effizienten Vergleich durchgeführter Simulationen mit mechanischen Prüfungen zu ermöglichen. Die Variationsparameter auf Halbzeugseite sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

So ist die Position der lokalen Verstärkungen in Dickenrichtung für die Prozessführung und ebenso die mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Vor dem Hintergrund der Großserienanwendung gilt es diese Variation deshalb zu beleuchten.

Ein weiterer, zu analysierender Parameter ist die Art der Fixierung der LV auf dem Grundlaminat (GL). Diesbezüglich wurden Vorversuche mit Nähten, Bindedraht- und reinen Binderfixierungen durchgeführt. Auf Basis der Erkenntnisse daraus werden die

vorliegenden Untersuchungen auf die Fixierung mit Binder und mit Nähten eingegrenzt, da diese Methoden im Gegensatz zur Bindedrahtfixierung textiltgerechte Prozesse darstellen und eine vergleichsweise großflächige Fixierung ermöglichen. Die Gestaltung des Wanddickenübergangs (WDÜ) zwischen lokal verstärktem und unverstärktem Bereich wird in der Literatur häufig diskutiert und dementsprechend für die mechanischen Eigenschaften lokal verstärkter Lamine als relevant angesehen. Um die Auswirkungen der Übergangsgestaltung auch bei 50K-Gelegen auf den Injektionsprozess und auch die mechanischen Eigenschaften herausstellen zu können, werden im Rahmen dieser Untersuchungen zudem sogenannte geschäftete und ungeschäftete Übergänge betrachtet.

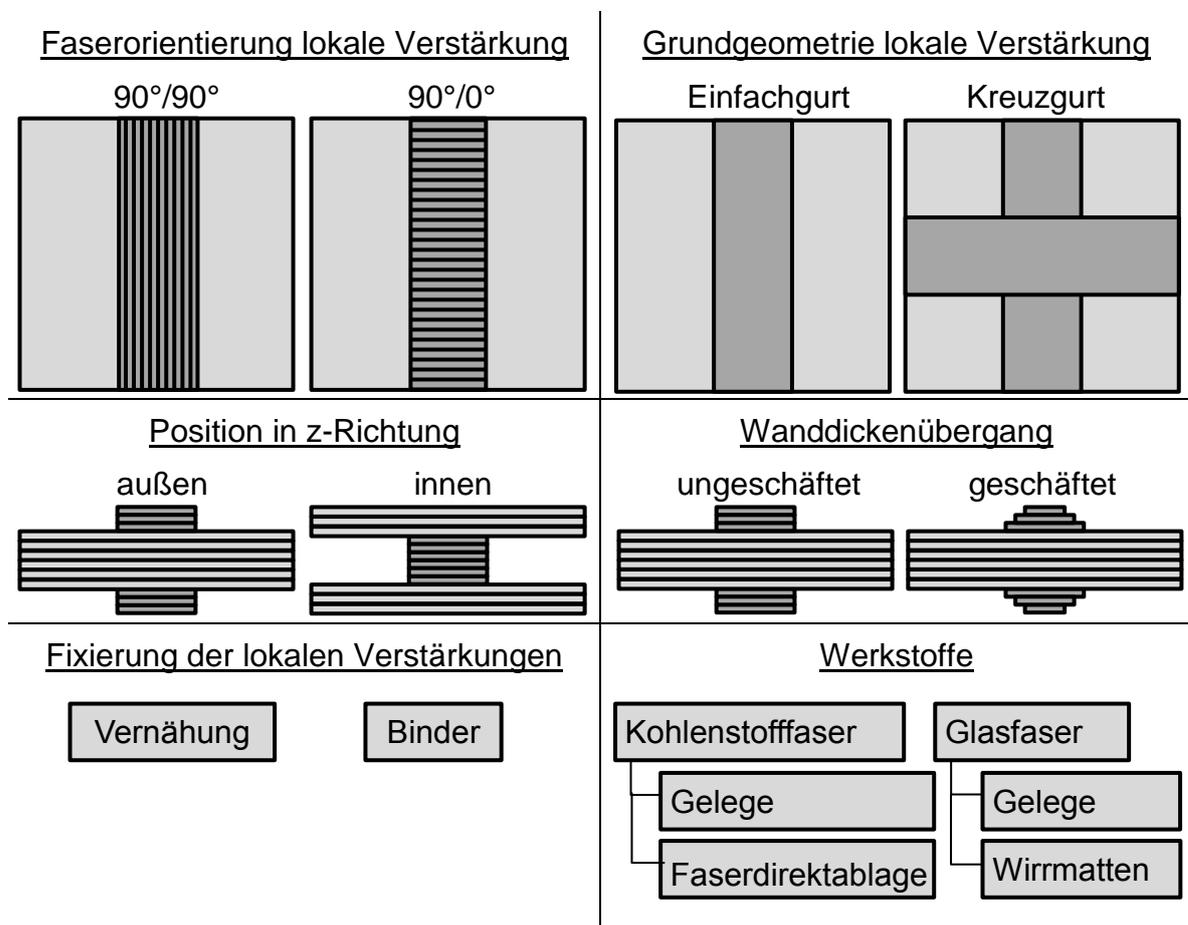


Abbildung 4.2: Halbzeugseitige Variationsparameter

Für sämtliche Versuche, von der Werkstoffcharakterisierung über die Prozessbetrachtung bis hin zur Laminatanalyse, werden Lagenaufbauten mit den dargestellten Faserorientierungen und Flächengewichten verwendet (siehe Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2). Zur Versuchsvorbereitung werden diese textilen Halbzeuge, dem Serienprozess nach-

empfundene, in einem Kontaktheizfeld und einer Abkühl-schließeinheit vorgeformt. Analog dem Serienprozess der BMW Group erfolgt der Heizschritt über 30 Sekunden bei einer Temperatur von 215 °C. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit wird der Faservolumengehalt dabei um 5 % höher eingestellt, als bei der Injektion möglich. Im Anschluss daran erfolgt die Aushärtung des Binders in einer Abkühl-schließeinheit, die der Umformung und Abkühlung im Serienpreformwerkzeug nachempfunden ist und beim Zielfaservolumengehalt des Bauteils (48 %) unter Raumtemperatur erfolgt. Die im Rahmen dieser Untersuchungen analysierten Werkstoffe sind der Basiswerkstoff aus Kohlenstofffasergelege. Zudem werden Glasgelege (Fa. Saertex GmbH & Co.KG, Saerbeck, Deutschland), Glasfasermatten (Fa. Owens Corning Non-Woven Technologies, Speldoorn, Niederlande) sowie direkt aus dem Faseroving abgelegte Aufbau-ten (SGL ACF, München, Deutschland) entlang der gesamten Analyse-kette charakterisiert. Während der Werkstoff aus dem Prozess der Faserdirektablage hinsichtlich des Kohlenstofffaseranteils identisch zum Kohlenstofffasergelegeaufbau realisiert wird, erfolgt die Definition des Glasgelege- und Glaswirmattenaufbaus anhand der auftretenden Kompaktierungswiderstände, um in Bezug der im Werkzeug auftretenden Kompaktierungskräfte vergleichbare Bedingungen/ Belastungen realisieren zu können. So wird ein vierlagiger Aufbau des Glaswirrtextils und ein sechslagiger Aufbau des Glasgelegewerkstoffs verwendet, die zwar aufgrund deren Struktur über den Kräften von Gelegen, jedoch in Bereichen liegt, welche auch in den relevanten Werkzeugen untersucht werden können. Während der Glasgelegeaufbau und insbesondere der Aufbau aus dem Glaswirrfasertextil vergleichsweise isotrope Eigenschaften aufweisen, ist der Basisaufbau aus Kohlenstofffasergelegen mit 1200 g/m² (0°-Faserorientierung) von insgesamt 1800 g/m² anisotrop ausgeführt.

Tabelle 4.1: Lagenaufbauten analysierter Grundlaminatwerkstoffe

CF-Gelege	GF-Gelege	GF-Matten
+45°_150 g/m ²	+45°_300 g/m ²	Ungerichtet_300 g/m ²
-45°_150 g/m ²	-45°_300 g/m ²	Ungerichtet_300 g/m ²
0°_600 g/m ²	0°_300 g/m ²	Ungerichtet_300 g/m ²
0°_600 g/m ²	0°_300 g/m ²	Ungerichtet_300 g/m ²
-45°_150 g/m ²	-45°_300 g/m ²	
+45°_150 g/m ²	+45°_300 g/m ²	

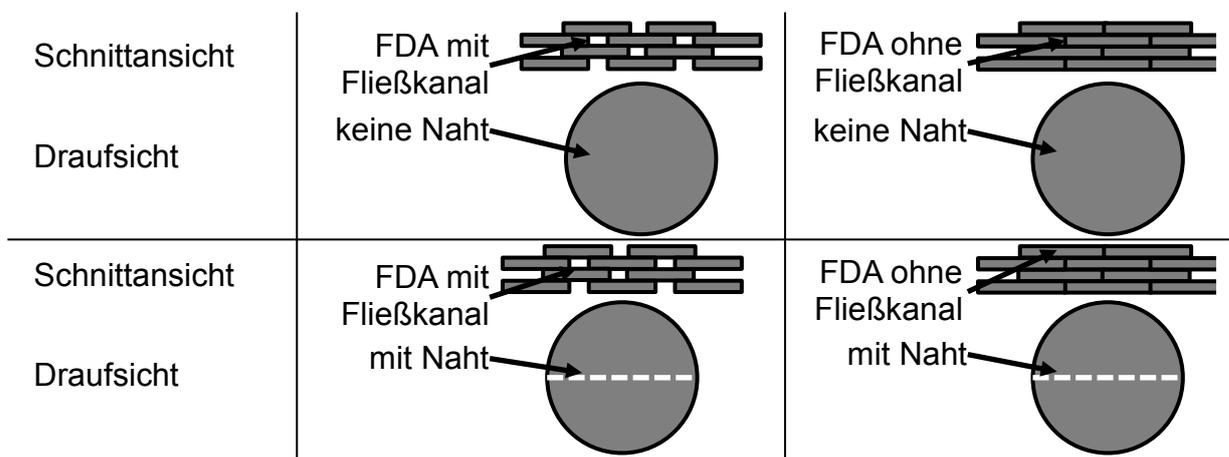
Die zur Charakterisierung der, für die lokalen Verstärkungslagen, verwendeten Werkstoffe sind in Tabelle 4.2 mit Angabe der Orientierung der Verstärkungslagen, der Faserorientierung in der Verstärkungslage sowie des verwendeten Flächengewichts aufgeführt.

Tabelle 4.2: Lagenaufbauten analysierter lokaler Verstärkungen

CF-Gelege	CF-Gelege	CF-Direktablagewerkst.
90°/90°_300 g/m ²	90°/0°_300 g/m ²	90°/90°_150 g/m ²
90°/90°_300 g/m ²	90°/0°_300 g/m ²	90°/90°_150 g/m ²
90°/90°_300 g/m ²	90°/0°_300 g/m ²	90°/90°_150 g/m ²
		90°/90°_150 g/m ²
		90°/90°_150 g/m ²
		90°/90°_150 g/m ²

Zudem erfolgt im Rahmen der Untersuchungen eine Analyse von Faserdirektablagewerkstoffen, welche mit und ohne Gassen sowie mit und ohne Vernähungen hergestellt und auf dem Grundlaminat fixiert werden (siehe Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Analyzierte Varianten lokal mit FDA verstärkter Gelege



Während die Einbringung von Gassen zur Erhöhung der erwarteten niedrigen Permeabilität des FDA-Werkstoffs führen soll, ist die Vernähung insbesondere zur Fixierung der lokalen Verstärkungslagen gedacht. Im Fall der vernähten Prüfkörper handelt es sich aufgrund der Inhomogenität der Proben nicht um eine werkstoffcharakterisierende Permeabilität, sondern um eine komponentencharakterisierende Ersatzgröße, die ausschließlich bei identischen Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzt.

4.3.2 Auf Ebene des Werkzeugs

Neben den halbzeugseitigen Untersuchungsparametern ist für die Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge die Prozessführung sowie die Werkzeuggestaltung ein ebenfalls qualitätsbeeinflussender Faktor. Die im Bereich der Werkzeuggestaltung relevanten Parameter, die im Rahmen dieser Untersuchungen beleuchtet werden, sind die Gestaltung des Wanddickenübergangs, die Positionierung des Angussverteilerkanals und die Gestaltung des Angussverteilerkanals.

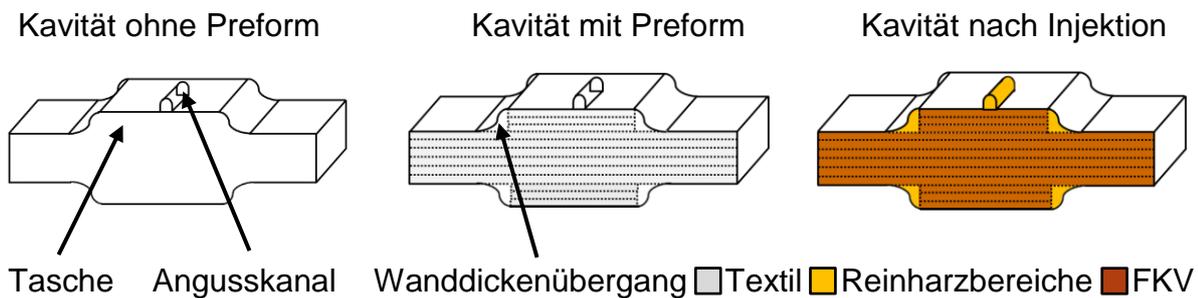


Abbildung 4.3: Kavitätsdarstellung; Spezifika zur Herstellung lokal verstärkter Bauteile

Ein grundlegender Aspekt in der Werkzeuggestaltung ist die Differenzierung, ob die lokalen Verstärkungslagen geometrisch im Werkzeug in Form einer Tasche abgebildet werden, oder dies nicht der Fall ist. Ziel der Einbringung lokaler Verstärkungslagen in Werkzeugh Taschen ist es, einen homogenen Faservolumengehalt im Bauteil zu realisieren. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden ausschließlich Halbzeuge mit Wanddickenübergängen untersucht.

Als weiterer Untersuchungspunkt werden bei den Geometrien mit Wanddickenübergängen zwischen lokal verstärktem und unverstärktem Bereich einerseits geschäftete und andererseits ungeschäftete Taschenränder realisiert. Die Analyse dieses Variationsparameters erfolgt auf sämtlichen Betrachtungsebenen der Fließfrontvisualisierung, der Laminatherstellung, der virtuellen Abbildung im Injektionsprozess sowie in den mechanischen Analysen. Die Ausführungen beider Übergangsarten sind in Abbildung 4.4 sowohl für die RTM- als auch für die Nasspresswerkzeuge mit entsprechender Bemaßung dargestellt.

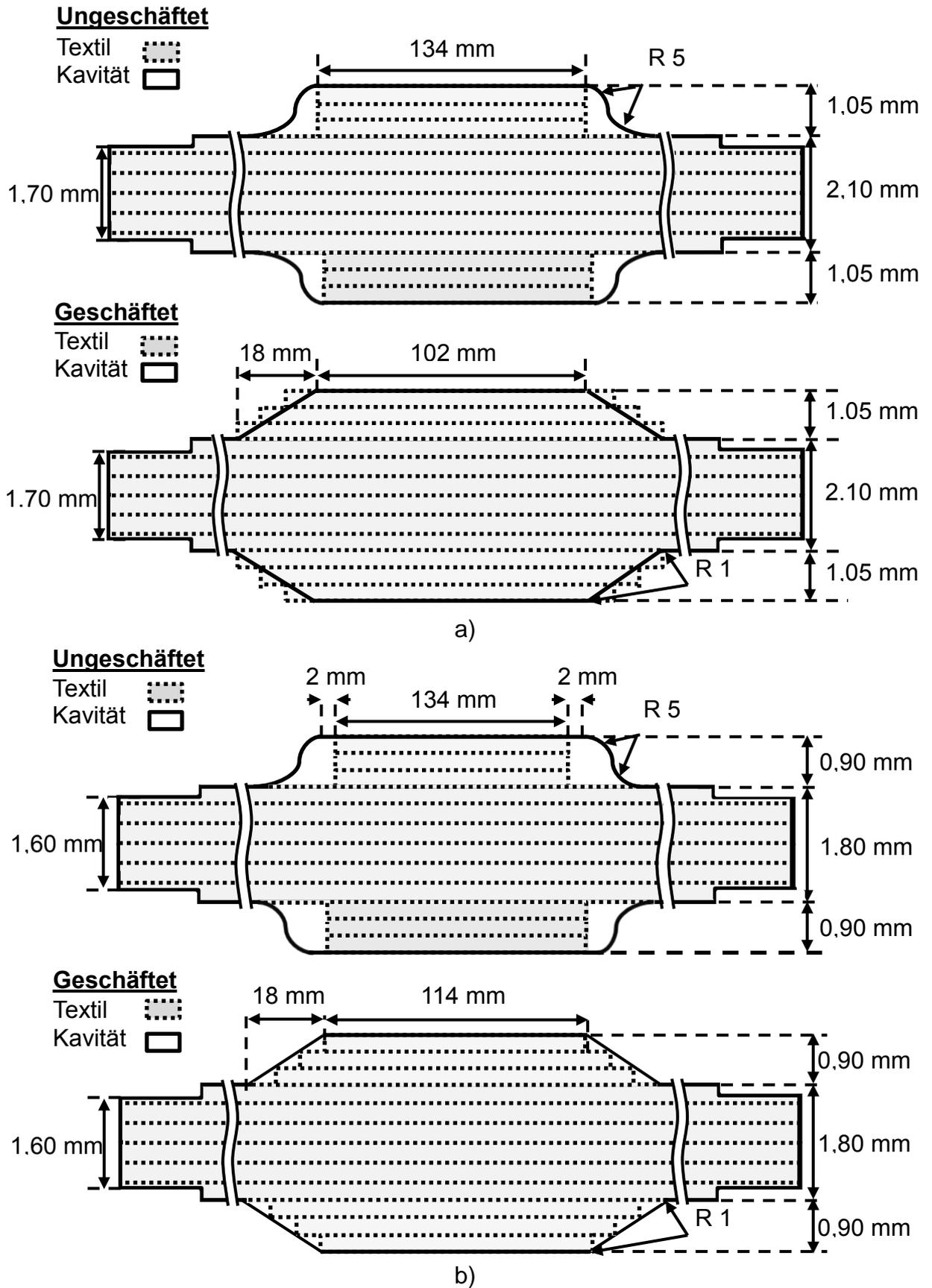


Abbildung 4.4: Gestaltung der Übergangsbereiche mit entsprechenden Bemaßungen in den RTM- (a) und NP-Werkzeugen (b)

So weist die Tasche in der Kavität im RTM-Verfahren geringere Breiten in Relation zur Kavität im NP-Werkzeug auf, da die erhöhten Faservolumenanteile im NP-Verfahren bei identischen Geometrien zu engeren Toleranzbreiten und frühzeitigen Überpresungen führen würden. Damit könnte eine prozesssichere Imprägnierung der NP-Bauteile bei den für das RTM-Verfahren vorgestellten Geometrien nicht erfolgen. Bei der ungeschäfteten Ausformung des Wanddickenübergangs am Rand der lokalen Verstärkungslagen bildet sich sowohl im RTM-, als auch im Nasspresswerkzeug ein Reinharzbereich aus. Bei geschäftetem Wanddickenübergang werden im RTM-Werkzeug dagegen die Textilien im WDÜ lokal stärker verpresst, als in den sonstigen Laminatbereichen. Dies ruft eine partielle Erhöhung des Faservolumenanteils hervor und soll zu einer verbesserten Fixierung der Verstärkungslagen und einer Verringerung des Harzvoreilens am Übergangsbereich führen. Zur Visualisierung der Auswirkungen eines geschäfteten WDÜ im RTM-Werkzeug auf den Faservolumenanteil sind in Abbildung 4.5 grafisch der Kavitätsverlauf (Kavitätshöhe), der Textilaufbau (Halbzeugdicke unverpresst) und der daraus theoretisch resultierende Faservolumenanteilsverlauf über die Werkzeugposition skizziert.

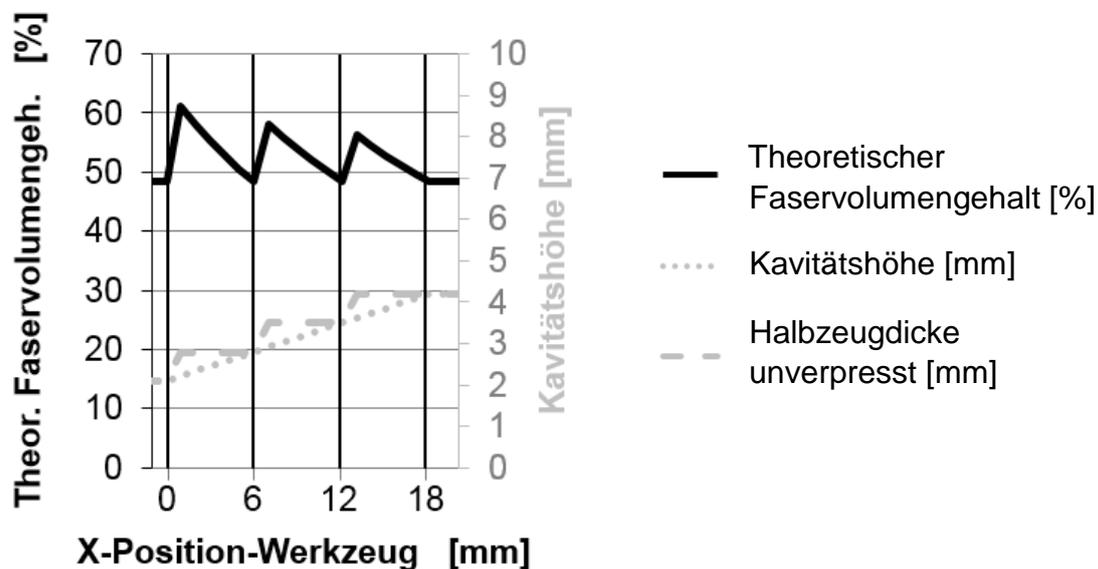


Abbildung 4.5: WDÜ im Werkzeug und Textil an einem geschäfteten Übergang im RTM-Verfahren mit resultierendem theoretischem FVG

Dass der in Abbildung 4.5 aufgeführte, theoretische Faservolumenanteil in der Realität nicht derart diskret auftritt, liegt an verschiedenen, den Prozess beeinflussenden

Parametern und kann den in Kapitel 6.1 dargestellten Schnitt- und Schliffbildern entnommen werden.

Im Gegensatz zum RTM-Werkzeug sind die Wanddickenübergänge im NP-Werkzeug mit geschäfteter Übergangsgeometrie so ausgeformt, dass eine partielle Verringerung des Faservolumengehalts erfolgt (siehe Abbildung 4.4). Intention dieser Form des WDÜ ist, dass bei einer bestimmten Fehlpositionierung der Halbzeuge ein nicht zulässiges Überpressen des Textils verhindert wird. Da die Gefahr von Voreilen des Matrixwerkstoffs im Nasspressverfahren aufgrund der Prozessführung ohnehin nicht gegeben ist, erscheint eine lokale Überpressung analog dem RTM-Verfahren zur Vermeidung des sogenannten Race-Tracking (Harzvoreilen) nicht erforderlich. Zudem werden im Nasspressprozess im Vergleich zum RTM-Verfahren höhere Faservolumenanteile (FVG) im Laminat und Bauteil realisiert, was bei identischer Taschen- und Bauteilgestaltung im Nasspressprozess zu ungleich höheren Faservolumenanteilen führen würde.

Während im NP-Verfahren das Harzauftragsmuster gemäß der Geometrie der lokalen Verstärkungslagen adaptiert werden kann, wird im RTM-Verfahren der Einfluss der Angussverteilerposition auf den Füllvorgang untersucht. So werden im Rahmen der Fließfrontvisualisierung ein mittig auf dem lokal applizierten Verstärkungstextil eingebrachter Angusskanal, ein parallel neben dem Verstärkungstextil befindlicher und ein senkrecht dazu verlaufender Linienangusskanal bewertet. Im Herstellungsprozess der Lamine im HD-RTM-Verfahren werden diese sowohl mit einem mittig auf dem Verstärkungstreifen befindlichen Angusskanal, als auch mit einem parallel zum Verstärkungstreifen verlaufenden Linienangusskanal hergestellt (siehe Abbildung 4.6).

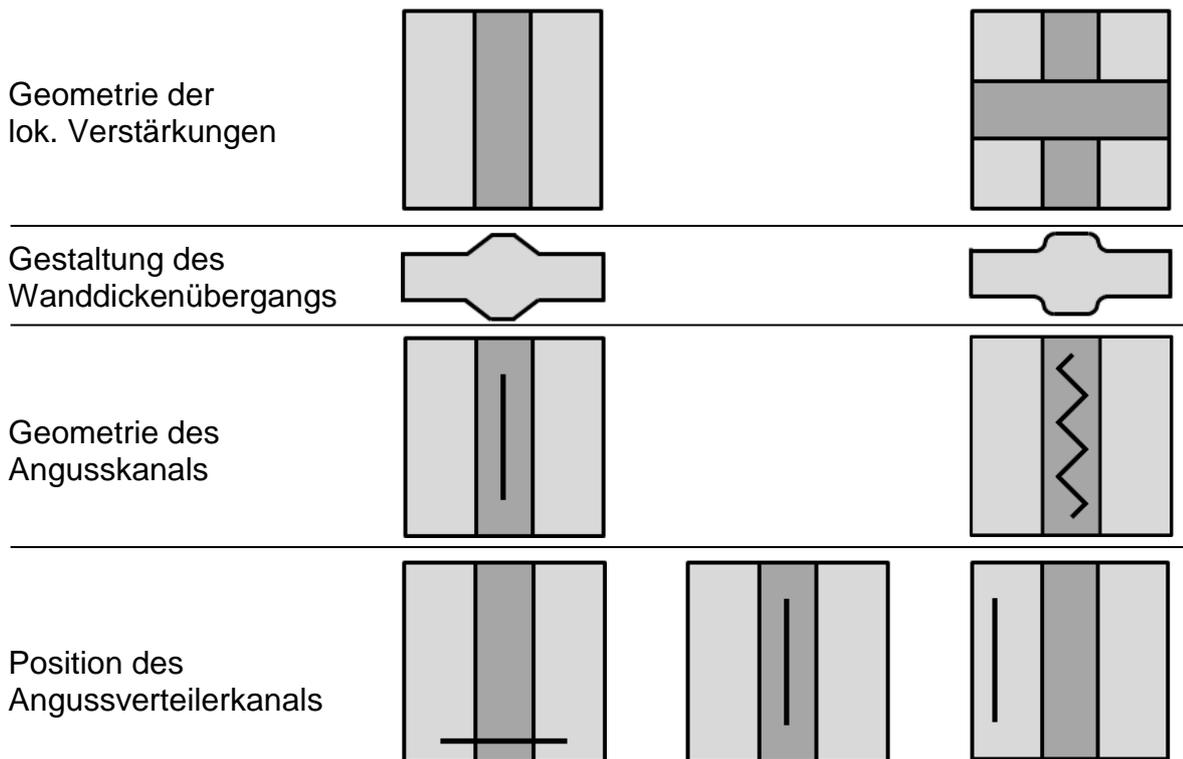


Abbildung 4.6: Werkzeugseitige Variationsparameter

Bei einem zentral auf der lokalen Verstärkung befindlichen Linienangusskanal, der parallel zur lokalen Verstärkung orientiert ist, besteht die Gefahr, dass parallel zum Angusskanal verlaufende Fasern sich darin ablegen, diesen blockieren und zu einem undefinierten Füllbild führen. Dies ist der Fall, da bei den Lagenaufbauten mit außenliegenden, $90^\circ/90^\circ$ -LV Textilien mit geringem Anteil an stabilisierenden Wirk- und Schussfäden an den Oberflächen der Halbzeuge platziert werden. Über eine Zick-Zack-förmige Angusskanalgeometrie soll durch Orientierungsunterschiede zwischen Verteilerkanal und Faserwerkstoff ein Kanalverschluss zuverlässig verhindert und ein gleichmäßiges, reproduzierbares Bild des Fließfrontverlaufs generiert werden.

Es werden verschiedene Werkzeuge erstellt und modifiziert, um die aufgeführten Parameter untersuchen und seriennah bewerten zu können. Im Nasspressverfahren ist somit die Durchführung von Untersuchungen anhand eines modularen Plattenwerkzeugs mit verschiedenen Einsätzen das Ziel. Zudem wird das in Abbildung 4.7 dargestellte Werkzeug zur Herstellung von Fahrzeugschubfeldern genutzt, um den Übertrag der generierten Erkenntnisse aus dem eingesetzten Plattenwerkzeug auf die Bauteilproduktion zu ermöglichen.

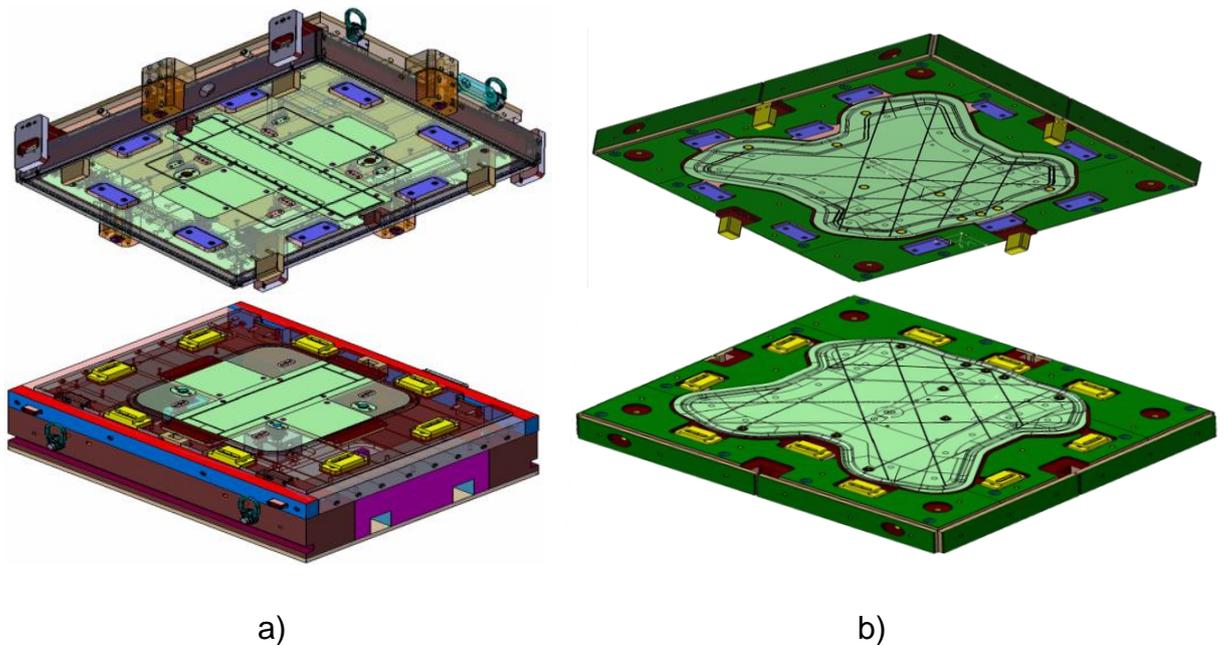


Abbildung 4.7: Versuchswerkzeuge für das Nasspressverfahren:
Plattengeometrie (a) und
Demonstratorgeometrie (b)

Wie in Abbildung 4.8 dargestellt ist, wird analog dem Nasspressprozess auch für das RTM-Verfahren ein variables Plattenwerkzeug mit diversen Einsätze (Taschengeometrie, Angusskanalposition, Angusskanalgestalt) zur Untersuchung der Wirkzusammenhänge hergestellt.

Zusätzlich wird auch für das RTM-Verfahren ein Werkzeug zur Herstellung eines dreidimensionalen Demonstratorbauteils erstellt, anhand dessen die Erkenntnisse aus den Versuchen am Plattenwerkzeug validiert werden. Um den Imprägnierprozess im RTM-Verfahren bestmöglich analysieren und die Auswirkungen der verschiedenen Variationsparameter auf das Imprägnierverhalten bewerten zu können, wird als zentrales Werkzeug für diese Untersuchungen zusätzlich ein modulares Glasplattenwerkzeug zur Visualisierung des Fließfrontverlaufs konzipiert und mit entsprechender Messtechnik implementiert.

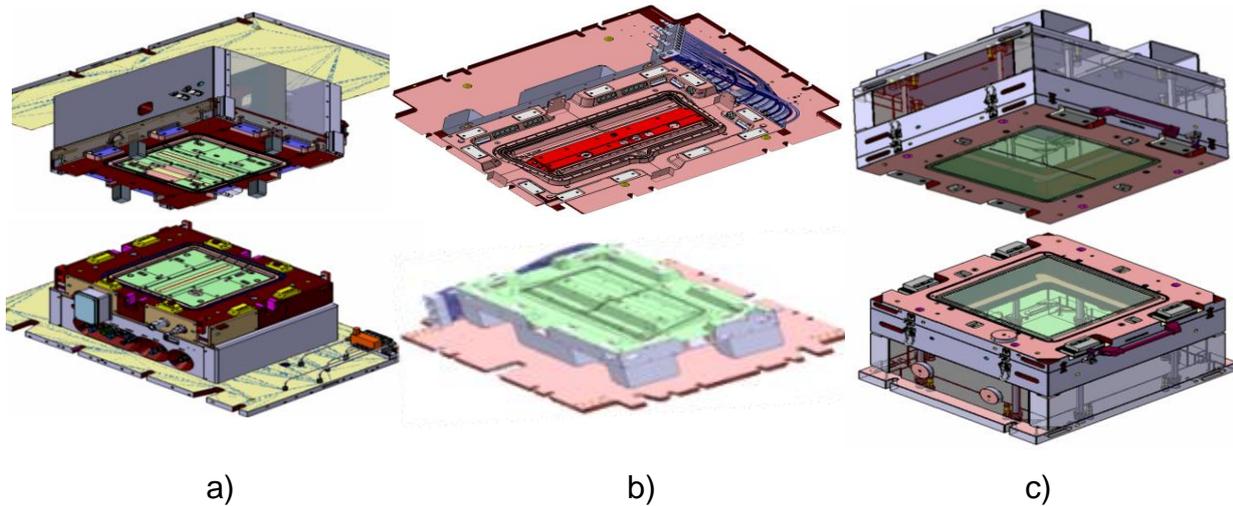


Abbildung 4.8: Versuchswerkzeuge für das Resin Transfer Moulding-Verfahren: Plattengeometrie (a), Demonstratorgeometrie (b) und Glasplattenwerkzeug zur Fließfrontvisualisierung (c)

Analog dem Großserienprozess der BMW Group finden auch bei sämtlichen vorliegenden Versuchen außer der Fließfrontvisualisierung die Matrixkomponenten der Firma Hexion, Columbus, USA Verwendung. Dieses schnell aushärtende Harzsystem besteht aus den drei Komponenten Harz, Härter und internem Trennmittel. Die duro-mere Harzkomponente macht dabei den dominierenden Anteil des Matrixwerkstoffs aus und ist neben den Fasereigenschaften ausschlaggebend für die mechanischen Eigenschaften des Verbunds. Die Härterkomponente fördert den Polymerisationsprozess, der zu einer Erhöhung der Viskosität des Matrixwerkstoffs nach ca. 60 s führt und bereits nach 120 s eine Bauteilentformung ermöglicht (Datenblatt EPIKOTE™ Resin 04695-1). Die dritte Komponente, das interne Trennmittel reduziert die Haftung des Bauteils in der Kavität des Injektionswerkzeugs und ermöglicht dadurch ein rückstands-freies Entformen ohne erforderliches externes Eintrennen der Kavität.

4.4 Versuchsstruktur

Aufbauend auf den vorgestellten Rahmenbedingungen der Werkstoff- und Werkzeug-gestaltung wird das Absicherungsprogramm definiert, das im Rahmen der vorliegen-den Untersuchungen hin zur Serienbefähigung lokaler Verstärkungen im Großserien-maßstab absolviert werden soll. In einem ersten Schritt erfolgt die Charakterisierung der verwendeten Ausgangswerkstoffe hinsichtlich deren prozessdominierenden Para-metern Permeabilität und Kompaktierungswiderstand. Die Untersuchungen zur Ermitt-

lung der Permeabilitäten werden an einem bei der BMW Group entwickelten und etablierten Prüfstand durchgeführt, während die Charakterisierung des Kompaktierungswiderstands mit einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick Roell GmbH und Co. KG, Ulm, Deutschland erfolgt. Anschließend wird mit Hilfe des erwähnten Glasplattenwerkzeugs die Visualisierung der Fließfrontverläufe anhand der verschiedenen aufgeführten Variationsparameter durchgeführt. Die auf diesem Weg generierten Ergebnisse an qualitativen Bildern zum Fließfrontverlauf werden über Teilfüllungen aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren validiert. Zusätzlichen Aufschluss über den Injektions- und Imprägnierprozess werden die Prozessdaten aus der Fließfrontvisualisierung (FFV) sowie der Laminat- und Bauteilherstellung geben. Die virtuelle Abbildung des Imprägnierprozesses lokal verstärkter Halbzeuge erfolgt zudem in einem gesonderten Arbeitspaket, in dem der Abgleich aus Simulation und Fließfrontvisualisierung erfolgt und gegebenenfalls Optimierungsmaßnahmen an der virtuellen Methode vorgesehen sind. Zur Gegenüberstellung der in der Fließfrontvisualisierung beleuchteten Gestaltungsparameter und zur Quantifizierung deren Einfluss auf die Verbundqualität und die Struktureigenschaften werden Lamine und Bauteile hergestellt. An daraus gewonnenen Prüfkörpern erfolgen im Anschluss weitere Untersuchungen. Im Rahmen dieser werden Ultraschallaufnahmen, Schnittbilder, Schlibbilder, Computertomographieaufnahmen sowie mechanische Prüfungen durchgeführt. Zur Minimierung der zukünftigen Absicherungsaufwände sowie zur Implementierung einer validen Simulations- und Konstruktionsmethodik wird das Arbeitspaket der Struktursimulation außerhalb der vorliegenden Analysen beleuchtet, wobei daraus resultierende Erkenntnisse anhand der empirisch generierten Ergebnisse evaluiert werden. Über einen Vergleich aus Simulation und Versuch sollen die Validität der FE-Modellierung nach dem Stand der Technik nachgewiesen, beziehungsweise die erforderlichen Entwicklungsmaßnahmen identifiziert und aufgezeigt werden. Der beschriebene Prozessablauf zur Industrialisierung lokal verstärkter Halbzeuge in den Verfahren RTM und Nasspressen ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

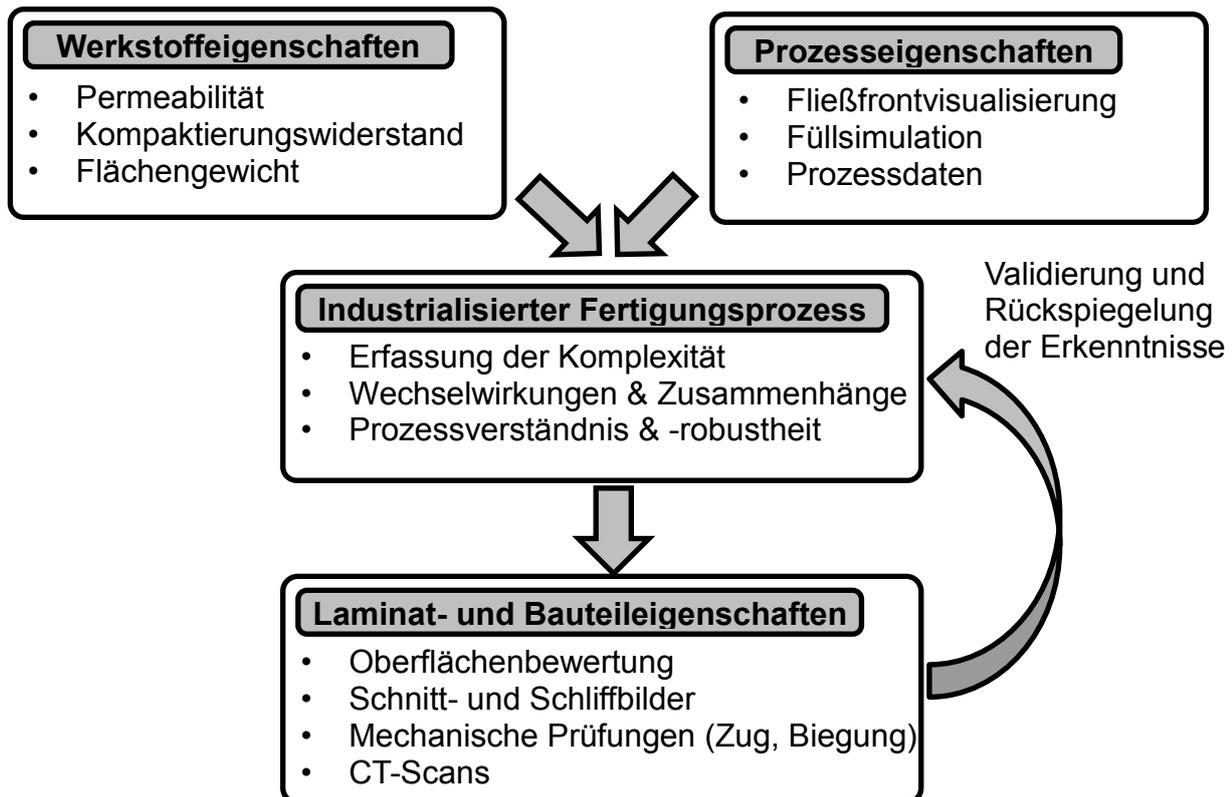


Abbildung 4.9: Prozessablauf zur Industrialisierung des Imprägniervorgangs lokal verstärkter Halbzeuge im RTM- und Nasspress-Verfahren

Aus dem dargestellten Prozessablauf resultieren für die industrialisierte Herstellung lokal verstärkter Bauteile erforderliche Inputgrößen der Werkstoffeigenschaften, der Prozesseigenschaften und der Laminat- und Bauteileigenschaften. Daraus ergeben sich diverse Prüfverfahren, die in den folgenden Kapiteln hinsichtlich Vorgehensweise, Ergebnisdarstellung und –interpretation vorgestellt werden.

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen analysierten und für die Fertigung lokal verstärkter Bauteile im Großserienmaßstab relevanten Hypothesen lauten:

1. Imprägnierung von Einfachgurten ist im RTM- und Nasspressverfahren auch bei zweifacher Textilstärke in der LV gegenüber dem Grundlaminat möglich.
2. Bei der Imprägnierung sich kreuzender Verstärkungslagen tritt insbesondere im RTM-Verfahren ein komplexer, nicht beherrschbarer Fließfrontverlauf auf.
3. Die mechanischen Eigenschaften zwischen Laminaten und Bauteilen mit innen- und außenliegenden lokalen Verstärkungslagen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Belastungsart.
4. Bei geschäfteten Wanddickenübergängen wird eine gleichmäßigere Fließfrontprogression erwartet, als bei ungeschäfteten.
5. Verarbeitbare Positionstoleranzen sind bei geschäfteten Wanddickenübergängen größer, als bei ungeschäfteten.
6. Bei geschäfteten Wanddickenübergängen treten bessere mechanische Eigenschaften auf, als bei ungeschäfteten.
7. Bei Faserorientierungen in den lokalen Verstärkungslagen, die senkrecht zur Fließfrontprogressionsrichtung orientiert sind, erfolgt eine gleichmäßigere Fließfrontprogression.
8. Bessere mechanische Eigenschaften treten bei Fehlbelastungen senkrecht zur Richtung der lokalen Verstärkungslagen dann auf, wenn die Fasern der lokalen Verstärkungslagen in deren Gurtlängsrichtung orientiert sind.
9. Eine gleichmäßigere Fließfrontprogression tritt an der Ober- und Unterseite bei zentral auf den lokalen Verstärkungslagen positioniertem Angussverteilerkanal sowie bei parallel zur lokalen Verstärkungslage versetztem Angussverteilerkanal auf, als bei quer zur lokalen Verstärkung platziertem Angusskanal.
10. Fließfrontprogression ist bei versetztem Angussverteilerkanal robuster gegen Fehlpositionierung der lokalen Verstärkungslage als bei zentral positioniertem Angussverteilerkanal.

Diese Hypothesen werden im weiteren Verlauf im Rahmen von entsprechenden Analyseverfahren beleuchtet und es werden darauf basierend Richtlinien für die Fertigung lokal verstärkter Bauteile im RTM- und Nasspressverfahren abgeleitet.

5 Analyse des Imprägnierverhaltens

Um die Herstellung lokal verstärkter Bauteile aus dem RTM- und Nasspressprozess zu ermöglichen, ist es von großer Bedeutung das komplexe Imprägnierverhalten zu verstehen. So wirken sich beispielsweise Fehlpositionierungen, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, bei der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge wesentlich stärker aus, als bei der Imprägnierung unverstärkter textiler Halbzeuge.

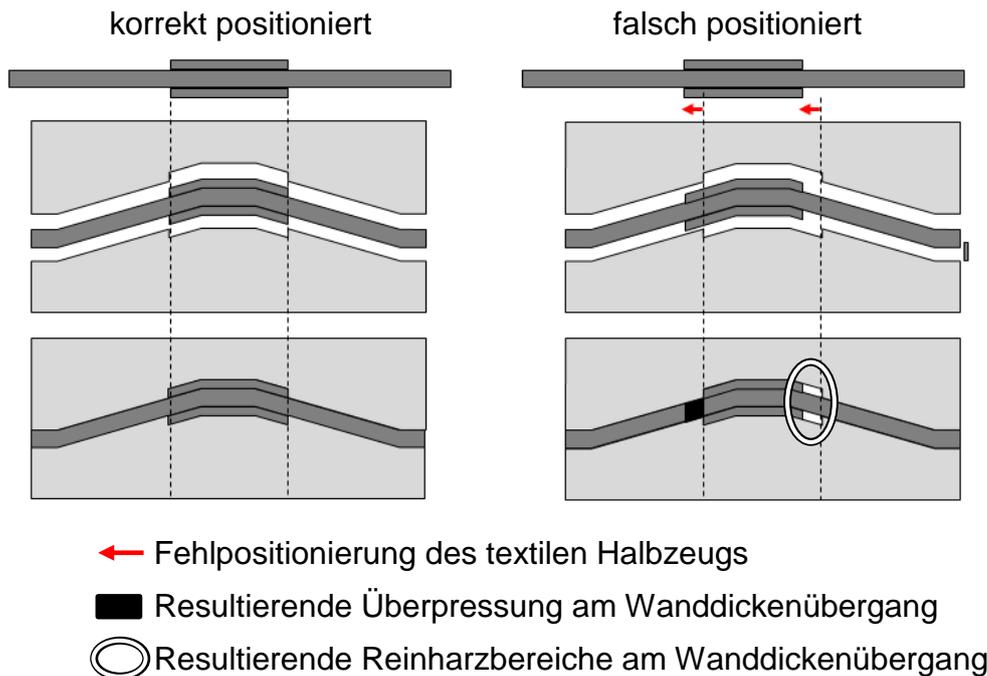


Abbildung 5.1: Darstellung der Auswirkung von Fehlpositionierungen im Preform-, RTM- und Nasspress-Verfahren

In diesem Abschnitt wird zunächst die oben beschriebene Vorgehensweise von der Werkstoffcharakterisierung über die Prozessanalyse bis hin zur Laminat- und Bauteilcharakterisierung verfolgt.

5.1 Kompaktierungswiderstand

Der Kompaktierungswiderstand, der in diesem Abschnitt vorgestellt wird, ist ein Maß dafür, welche Kräfte auf die Schließereinheit während der Verarbeitung wirken und wie die textilen Halbzeuge im Injektionswerkzeug fixiert werden. So können darauf basierend die zu analysierenden Werkstoffe Kohlenstofffasergelege, Glasfasergelege, Glasfasermatten und Faserdirektablagewerkstoffe hinsichtlich deren Fixierung im Werkzeug betrachtet werden.

5.1.1 Vorgehensweise

Aus den in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Lagenaufbauten werden zur Bestimmung des Kompaktierungswiderstands in einem ersten Schritt kreisrunde Prüfkörper mit einem Durchmesser von 60 mm ausgestanzt. Während sie für die Analyse des Nasspressprozesses direkt nach dem Legeprozess ausgestanzt werden, erfolgt dagegen für die Analyse des Halbzeugs im RTM-Verfahren vorab in einem Heizfeld und einer Abkühl-schleife der Prozess der Binderaktivierung, was dem Prozessschritt des Preformings aus der Serienfertigung entspricht.

Die Messung des Kompaktierungswiderstands wird anschließend an einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick Roell, Ulm durchgeführt. Die Lasteinleitung ins Textil erfolgt über eine ebene Platte mit parallelisierten Ober- und Unterseiten. Die in Abbildung 5.2 zu sehenden Platten weisen an der Unterseite einen Durchmesser von 120,0 mm und an der Oberseite einen Durchmesser von 56,4 mm auf.

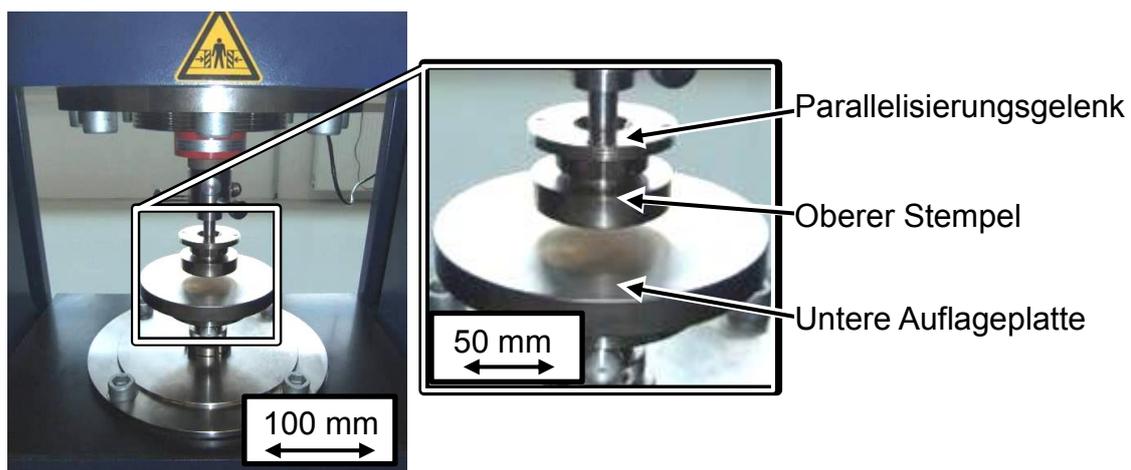


Abbildung 5.2: Kompaktierungsprüfstand mit beidseitig ebenen und zueinander parallelisierten Platten zur Lasteinleitung in die Prüfkörper

Während der Versuche werden je Prüfkörpervariante 6 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dabei wird über die Prüfmaschine ein Abstand der beiden Platten zueinander angefahren, welcher einen Faservolumengehalt von 5 % über Zielfaservolumengehalt im Bauteil entspricht. An dieser Position verweilt die Prüfmaschine für 60 s, ehe der Abstand der beiden Platten zueinander wieder erhöht und die Kompaktierungskraft entsprechend abgebaut wird (siehe Anhang 3).

Aus der Versuchsauswertung werden grundsätzlich zwei textilcharakterisierende Größen (Spannung bei Zielfaservolumengehalt: σ_{Ziel} , Steigungswert der Kompaktierungskurve in Abhängigkeit des FVG: B_{Komp}) abgeleitet. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird jedoch ausschließlich σ_{Ziel} aufgeführt und interpretiert, der entsprechende B_{Komp} -Wert ist jedoch in Anhang 4 aufgeführt.

Im Grundprogramm werden die Kompaktierungswiderstände des multidirektionalen Grundlaminats und der Werkstoffe zur Realisierung der lokalen Verstärkungen aus Kohlenstofffasergelege beleuchtet. Zudem erfolgt im Rahmen der alternativen Werkstoffbetrachtung eine Analyse von Faserdirektablagewerkstoffen mit und ohne Gassen sowie mit und ohne Vernähungen auf Gelege-Grundlaminaten. Darüber hinaus werden Glasgelege und Glasfasermatten untersucht. Um insbesondere die Schließkraft der Schließeinheit zur Fließfrontvisualisierung nicht zu übersteigen, wurden die Lageraufbauten der Alternativwerkstoffe bei definierter Zielwandstärke über die Kompaktierungskraftermittlung herausgefahren und definiert. Dementsprechend wurde ein vierlagiger Aufbau der Glasfasermatte (σ_{Ziel} : ca. 180 kPa \rightarrow 32% FVG) und ein sechslagiger Aufbau des Glasgelegewerkstoffs (σ_{Ziel} : ca. 700 kPa \rightarrow 50% FVG) verwendet. Der resultierende Kompaktierungswiderstand liegt zwar aufgrund deren Struktur deutlich über den Kräften von Gelegen (σ_{Ziel} : ca. 90–180 kPa), jedoch unterhalb der relevanten Grenzen der Schließeinheit.

Zur Darstellung dieser Ersatzkennwerte werden der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung aus jeweils sechs Wiederholungsversuchen ermittelt. Während in den Ergebnisdarstellungen der Mittelwert als Balken dargestellt ist, wird die Standardabweichung an dessen Kopfende aufgetragen. Die Vorgehensweise zur Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts zählt in der Statistik zu den Grundlagen und ist in Anhang 5 aufgeführt.

5.1.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Die aus den beschriebenen Versuchen resultierenden Kompaktierungswiderstände sind in Abbildung 5.3 sowohl im nicht binderaktivierten, als auch im binderaktivierten Zustand für die Gelege und FDA-Varianten dargestellt. Der nicht binderaktivierte Zustand stellt das Werkstoffverhalten im Nasspressprozess und der binderaktivierte Zustand die Eingangseigenschaften im RTM-Prozess dar.

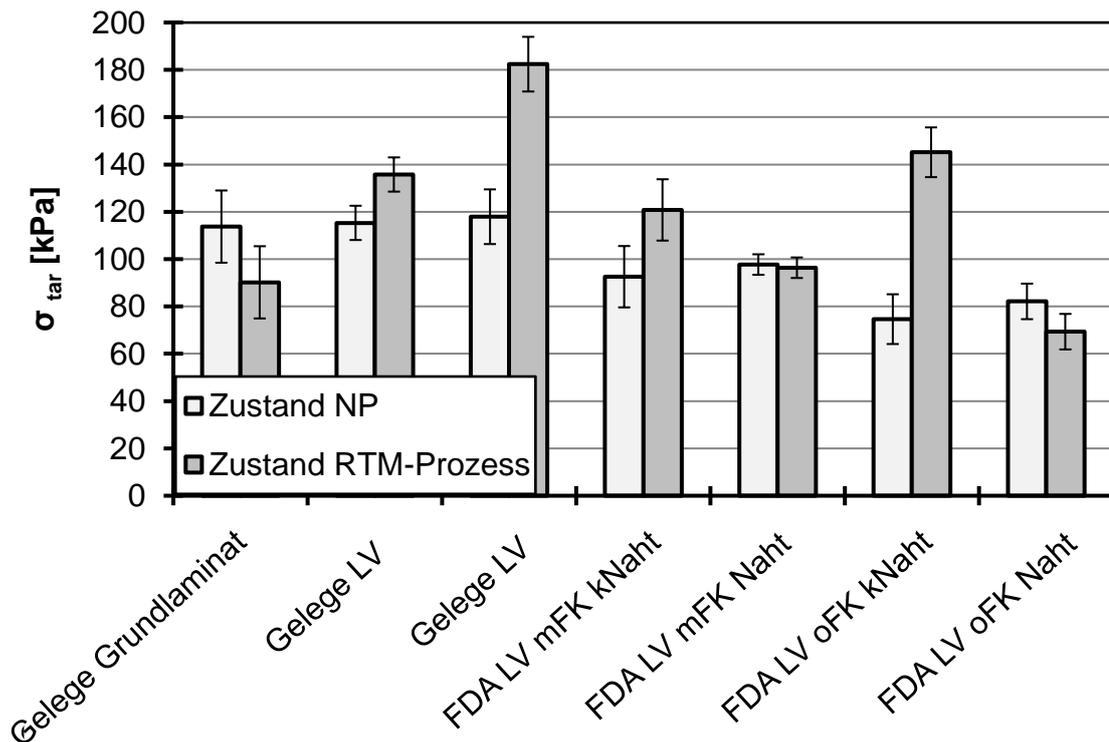


Abbildung 5.3: Kompaktierungswiderstand analysierter Komponenten

Daraus ist zu erkennen, dass die Gelege (Gelege Grundlaminat, Gelege LV 90°/90° und Gelege 90°/0°) gegenseitig unterschiedliche Kompaktierungsspannungen bei Ziel-FVG aufweisen und diese auf geringfügig höherem Niveau als die FDA-Werkstoffe liegen. Während einzelne Prüfkörpervarianten darüber und darunter liegen, weisen die meisten der Varianten Kompaktierungsspannungen zwischen 75 kPa und 125 kPa auf. Die Resultate des nicht binderaktivierten NP-Zustands und diejenigen analog dem RTM-Verfahren sind bei einer Vielzahl der Produkte innerhalb einer Variante vergleichbar mit tendenziell höheren Kompaktierungswerten im binderaktivierten Zustand. Beim Gelege Grundlaminat und Faserdirektablage ohne Fließkanäle vernäht (FDA LV oFK Naht) weist die NP-Variante dagegen einen deutlich höheren Widerstand auf. Grund hierfür kann die vergleichsweise kompakte Struktur dieser beiden Werkstoffe sein. So enthält das Grundlaminat einen Großteil an unidirektionalem 600 g/m²-Fasern und auch der FDA-Werkstoff weist in der lokalen Verstärkung unidirektionale Fasern ohne Gassen auf. Die damit verbundene hohe Packungsdichte wird als Grund für vergleichsweise hohe Kompaktierungswiderstände gesehen. Durch den Binderaktivierungsprozess und die damit verbundene Kompaktierung werden die dichten Anordnungen bei hoher Packungsdichte fixiert und führen so zu reduzierten Kompaktierungswiderständen im binderaktivierten Zustand. Hohe Kompaktierungswiderstände

weisen Prüfkörper der Gelege LV 90°/0° und der FDA oFK kNaht auf. Als Erklärung für den vergleichsweise hohen Wert des Kompaktierungswiderstands wird die kompakte Struktur dieser Textilien mit starker Verwirrung im Gelege 90°/0° und dichten Kohlenstofffaseranordnungen bei der FDA-Variante ohne Fließkanäle gesehen. Die kompakten Strukturen führen dazu, dass die Halbzeuge ihre Struktur während des Binderaktivierungsprozesses zusätzlich verfestigen und schließlich in einer hohen Kompaktierungsspannung bei Zielfaservolumengehalt resultieren. Aufgrund der allgemein vergleichbaren Kompaktierungseigenschaften zwischen den Gelegen, welche hinsichtlich des Kompaktierungswiderstands als Referenz aus dem Serienprozess dienen, wird zum aktuellen Zeitpunkt angenommen, dass die FDA-Werkstoffe ohne Beeinträchtigung der Textilfixierung sowohl im RTM- als auch im Nasspressverfahren verarbeitet werden können. Die einzige Variante, die unterhalb des Referenzniveaus liegt, ist der FDA-Werkstoff ohne Fließkanäle mit Naht (FDA oFK Naht). Bei dieser Variante kann hinsichtlich der Fixierungsstabilität auf Basis dieser Ergebnisse noch keine finale Aussage bezüglich der Prozesseignung gegeben werden.

5.1.3 Fazit

Anhand der Kompaktierungswiderstände sind insbesondere zwischen den Werkstoffzuständen mit und ohne Binderaktivierungen Unterschiede festzustellen. So weisen die textilen Halbzeuge nach dem Prozess der Binderaktivierung, welche in der RTM-Prozesskette im Drapiervorgang erfolgt, in den meisten Fällen einen höheren Kompaktierungswiderstand auf, als welche ohne Binderaktivierung, wie dies als Eingangszustand für den Nasspressprozess der Fall ist. Ausnahmen stellen jedoch das Kohlenstofffasergelege Grundlaminat, sowie der FDA-Werkstoff ohne Fließkanäle mit Vernähtung dar. Diese beiden Werkstoffe weisen nach der Binderaktivierung geringere Kompaktierungswiderstände auf, als davor, was auf die oben angeführte Erklärung zurückgeführt wird. Im Vergleich der Kohlenstofffasergelege als Referenz zu den FDA-Werkstoffen sind anhand der aufgeführten Kompaktierungswiderstände keine derartigen Unterschiede zu erkennen, sodass eine vergleichbare Positionsstabilität der Werkstoffe in den Injektionskavitäten zu erwarten ist.

Die Werte der Alternativwerkstoffe Glasgelege und Glasfasermatte liegen wie in Kapitel 5.1.1 ausgeführt über dem Niveau der Gelege, was erwarten lässt, dass diese Werkstoffe bei vergleichsweise hohen Werkzeugschließkräften hinsichtlich der Fixierung in der Kavität sehr gut für den Injektionsprozess geeignet sind.

5.2 Permeabilität

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Permeabilität und die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt. Darüber hinaus erfolgt auch die Diskussion und Interpretation der Permeabilitätsergebnisse in diesem Kapitel.

5.2.1 Vorgehensweise

Aus den aufgeführten Lagenaufbauten werden für die Permeabilitätsbestimmung in einem ersten Schritt zwei verschiedene Prüfkörpergeometrien zur Ermittlung der K_{12} - und der K_3 -Permeabilität ausgestanzt. Während zur K_3 -Permeabilität ein vollflächiger Prüfkörper Verwendung findet, wird die K_{12} -Messung anhand eines Prüfkörpers gemäß Abbildung 5.4a mit einem zentralen Durchbruch mit 5 mm Durchmesser und den in Kapitel 4.3.1 dargestellten Lagenaufbauten durchgeführt. Dieses zentrale Loch wird eingebracht, um einen Fluidfluss ausschließlich in Richtung der maximalen Prüfkörperausdehnung (K_{12} -Richtung) zu erreichen.

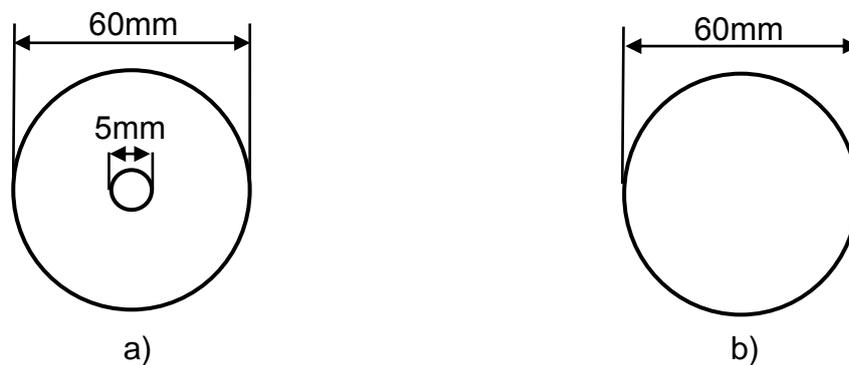


Abbildung 5.4: Prüfkörpergeometrien zur Bestimmung der Permeabilität: in K_{12} - (a) und in K_3 - (b) Richtung

Die Permeabilitätsmessung wird ebenfalls anhand von sechs Wiederholungsversuchen durchgeführt. Die Messungen erfolgen an einem Wasserpermeabilitätsmessstand, der schematisch in Abbildung 5.5a dargestellt und gemäß Abbildung 5.5b aufgebaut ist. Dabei wird ein Fluid aufgrund der Gravitationskraft einer konstanten Wassersäule von 1 m (P_{stat}) durch ein in einer Kavität befindliches Textil geleitet. In der Kavität können anhand individueller Distanzstücke verschiedene Faservolumenanteile eingestellt werden, wobei in den vorliegenden Untersuchungen jeweils der Zielfaservolumenanteil im Bauteil sowie ein 5% höherer und niedrigerer Faservolumen-

gehalt untersucht werden. Zur Ermittlung der Permeabilität wird die in einem bestimmten Zeitraum (hier 60 s) an einem unter der Kavität befindlichen Auffanggefäß angelangte Fluidmenge gravimetrisch ermittelt. Zur Bestimmung der für das Darcy-Gesetz (Gleichung 3.7) erforderlichen Viskosität des Wassers wird zudem die Temperatur des Fluids während der Messung aufgezeichnet.

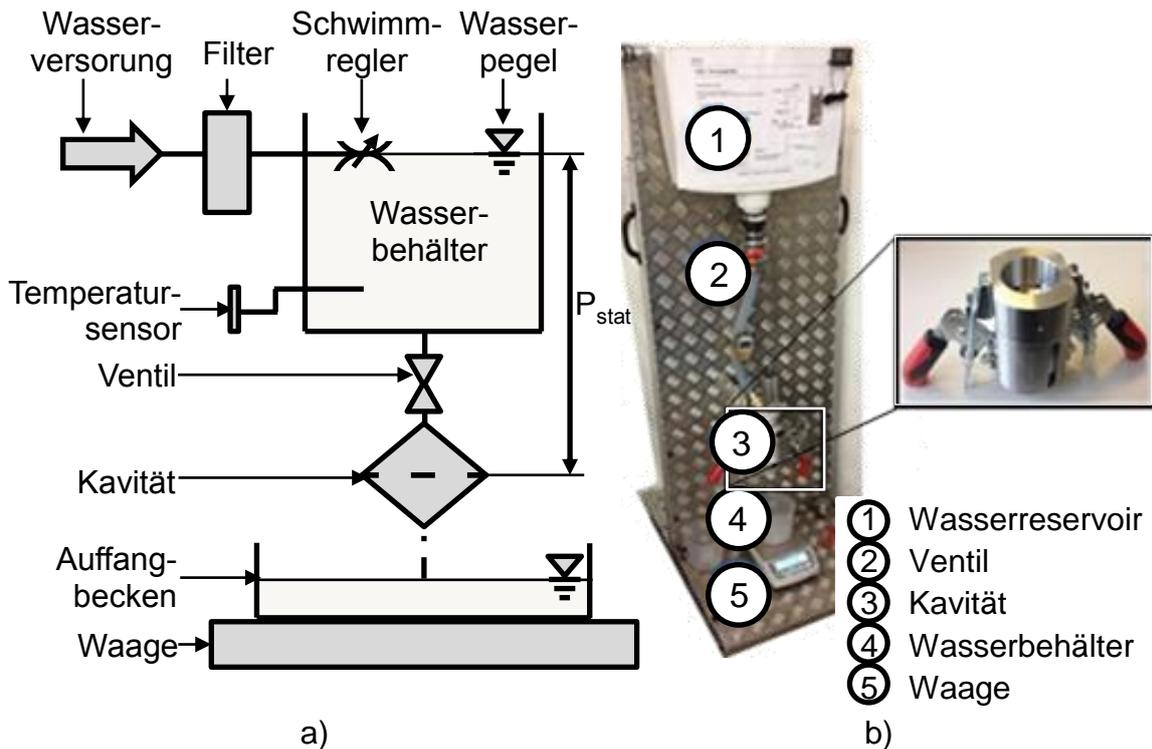


Abbildung 5.5: Funktionsskizze (a) und Realdarstellung (b) des verwendeten Wasserpermeationsprüfstands

Um die beiden Permeabilitäten in Dicken- und Ebenenrichtung ermitteln zu können, werden Einsätze in die Kavität eingebracht, um die in Abbildung 5.6 dargestellten Fluidflüsse in Ebenen- und Dickenrichtung umsetzen zu können.



Abbildung 5.6: Fluidfluss zur Messung der Permeabilität

Während der Analysen werden die Prüfkörper zunächst bei geringstem Faservolumengehalt und entsprechend größter Kavitätshöhe eingebracht und anschließend für 60 s

mit Fluid gespült beziehungsweise gesättigt. Anschließend wird für weitere 60 s die erste Messung bei diesem Faservolumengehalt durchgeführt, ehe innerhalb weiterer 60 s die Permeabilität bei Bauteilzielfaservolumengehalt und schließlich für 60 s beim höchsten Faservolumengehalt und entsprechend geringster Kavitätshöhe gemessen wird.

Aus den entsprechenden Versuchsauswertungen können schließlich zwei textilcharakterisierende Größen abgeleitet werden. So wird einerseits die Permeabilität beim Zielfaservolumengehalt (K_{Ziel} -Wert) des Bauteils kalkuliert. Andererseits ermöglicht die Permeabilitätsbestimmung bei drei verschiedenen Faservolumengehalten den Steigungsparameter der Permeabilitätskurven (B-Wert) abzuleiten, der die Abhängigkeit der Permeabilität vom jeweils vorherrschenden Faservolumengehalt beschreibt (siehe Anhang 6). Während diese Werte zur vergleichenden Analyse der verschiedenen Werkstoffe verwendet werden, fließen als Input für die Simulation die K_1 -, K_2 - und K_3 -Werte der Kohlenstofffasergelege aus einer externen Untersuchungsreihe ein (siehe Anhang 7). Zur Werkstoffcharakterisierung wird dagegen eine mittlere Permeabilität in der Ebene (K_{12}) und die Permeabilität in K_3 -Richtung ermittelt und im weiteren Verlauf vorgestellt. Im Rahmen der Ergebnisdarstellung werden analog den Ergebnissen der Kompaktierungsversuche der Mittelwert und die Standardabweichung dargestellt.

5.2.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Permeabilitäten beim Bauteilzielfaservolumengehalt (K-Werte) vorgestellt, diskutiert und interpretiert. Bezüglich des Sensitivitätsfaktors, welcher die Abhängigkeit der Permeabilität vom Faservolumengehalt angibt (B-Wert), wird auf die im Anhang 6 aufgeführten Diagramme verwiesen.

Als erste Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 die K_{12} - und die K_3 -Werte der Textilien aus dem Basisprogramm der Untersuchungen an Kohlenstofffasergelegen aufgeführt. Dabei sind verschiedene Charakteristika ersichtlich. So ist einerseits die Zunahme der Permeabilität vom Gelege Grundlaminat, über den Gelege $90^\circ/90^\circ$ - bis hin zum Gelege $90^\circ/0^\circ$ -Aufbau zu erkennen. Zusätzlich kann dieser Darstellung entnommen werden, dass die Permeabilität in K_3 -Richtung durchwegs einen deutlich geringeren Fluidfluss zulässt, als dies in K_{12} - beziehungsweise Ebenenrichtung der Fall ist. Während sich die Permeabilitäten in Ebenenrichtung im Bereich zwischen $4,0\text{E-}12\text{ m}^2$ bis $7,5\text{E-}12\text{ m}^2$ befinden, liegen die Permeabilitätswerte in K_3 -Richtung insbesondere im Grundlamint

bei $5,0E-13 \text{ m}^2$ deutlich niedriger. Dies liegt an der Struktur des Textils, die in K_1 -Richtung Fließkanäle zwischen den Fasern und den Faserbündeln ausbildet, während senkrecht dazu in K_2 - und K_3 -Richtung kaum Gassen und Fließkanäle vorhanden sind.

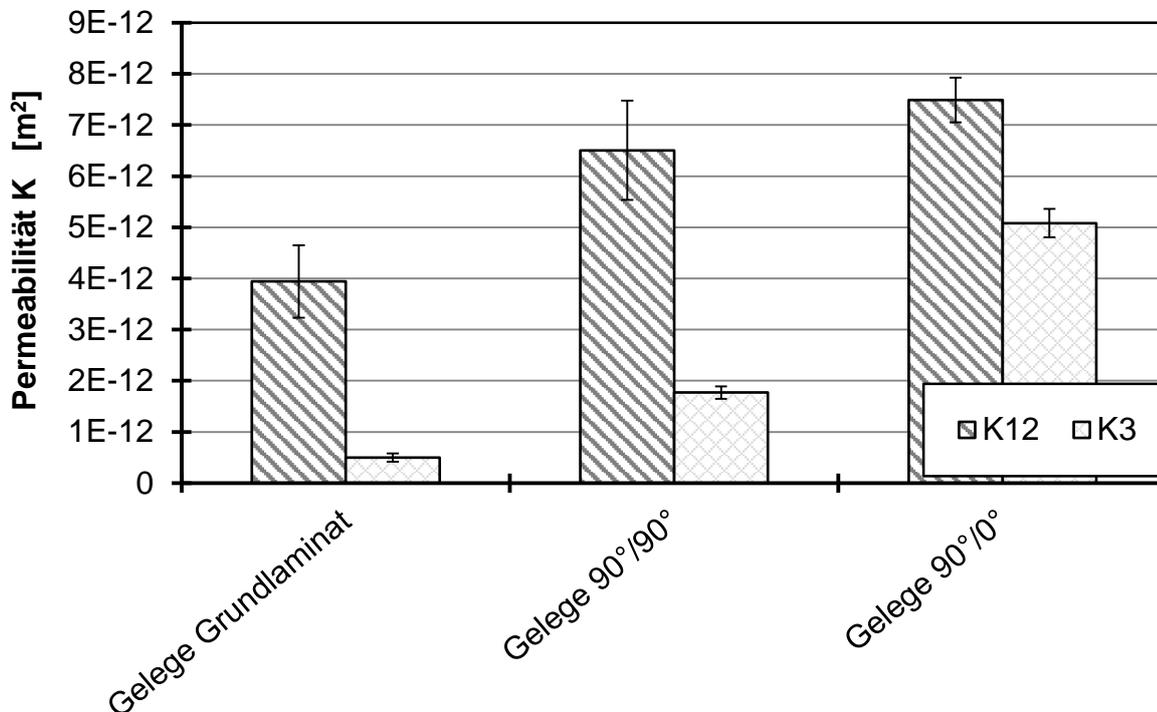


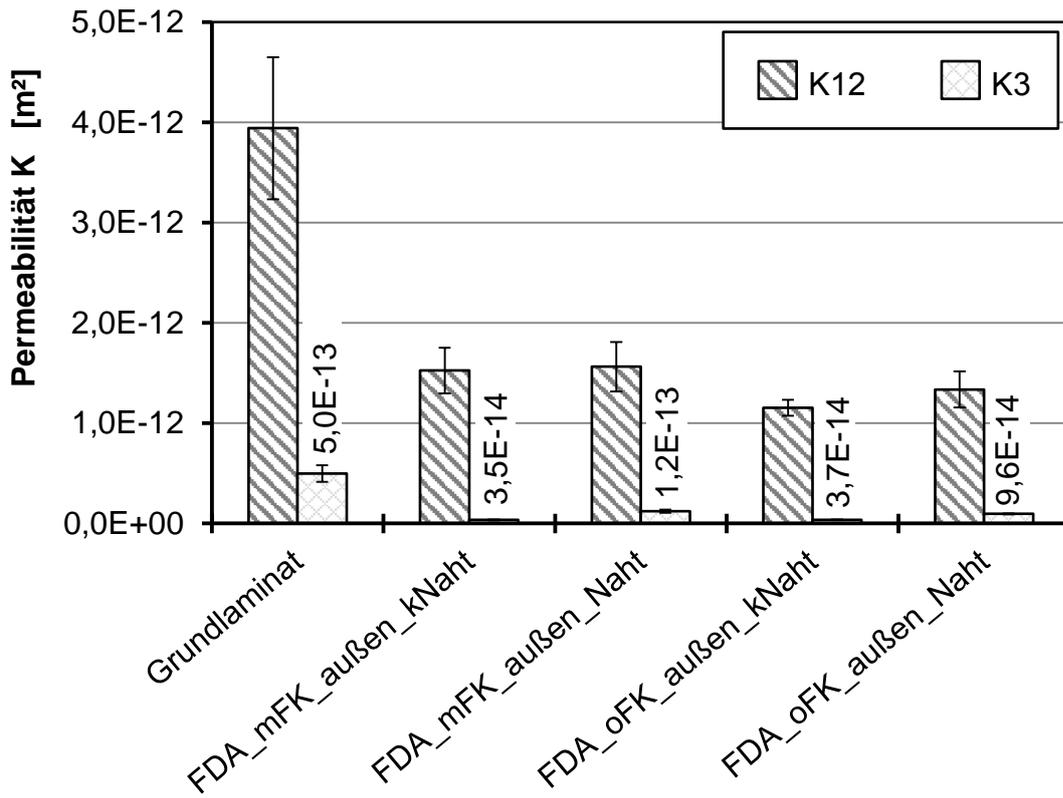
Abbildung 5.7: Permeabilität K von Kohlenstoffasergelegen bei Zielfaservolumengehalt in binderaktiviertem Zustand (RTM-Verfahren)

Diese Permeabilitätsergebnisse der Basistextilien sind dahingehend von großer Relevanz, da verschiedene im weiteren Verlauf ermittelte Erkenntnisse, wie zum Beispiel nicht vorhersehbare Fließfrontverläufe, auf diese Tatsache zurückgeführt und darüber modellhaft rekonstruiert werden können.

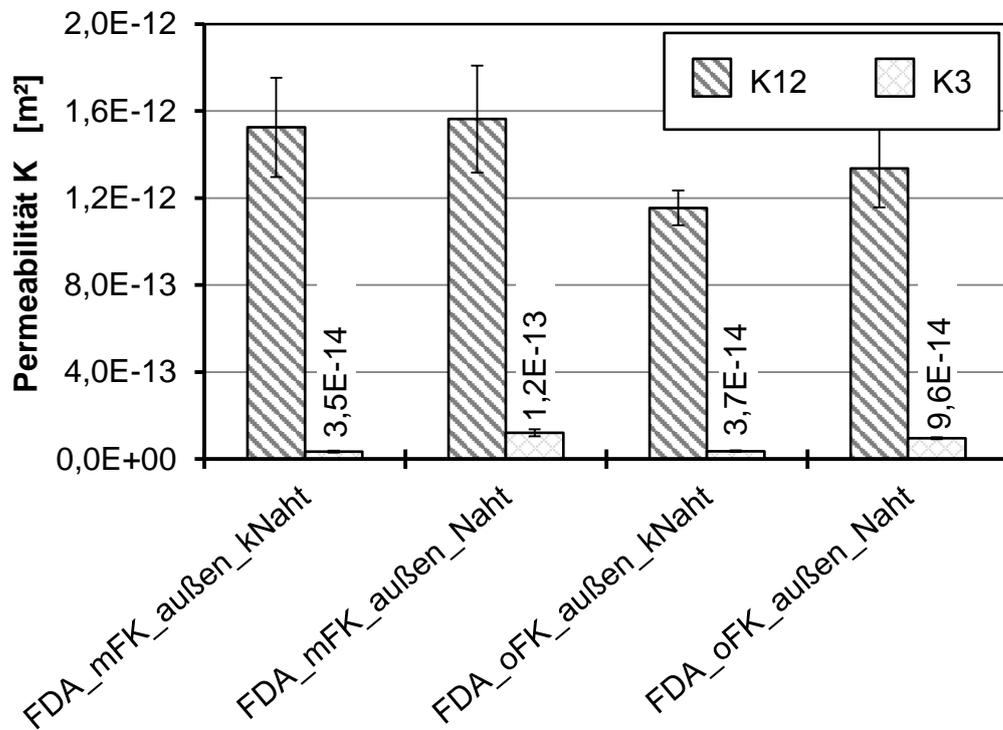
Analog zu den Basiswerkstoffen werden auch die Faserdirektablageprodukte untersucht. Die Ergebnisse der Permeabilitätsbestimmung der beleuchteten Varianten aus FDA-Material sind in Abbildung 5.8a zusammen mit dem Gelege Grundlaminat als Referenzwerkstoff zu sehen.

Daraus kann die vergleichsweise geringe Permeabilität des FDA-Werkstoffs sowohl in K_{12} - als auch in K_3 -Richtung entnommen werden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass im Fasermaterial eingebrachte Fließkanäle die Permeabilität insbesondere in der Ebene (K_{12}) erhöhen, was Anlass zur Hoffnung gibt, dass durch entsprechendes Einbringen von Gassen in den Werkstoff der lokalen Verstärkungen eine für die Imprägnierprozesse ausreichende Permeabilität erreicht werden kann. Zusätzlich führen eingebrachte Vernähungen im Doppelsteppstich mit 4 mm Stichelänge (siehe Tabelle 4.3),

welche zur Fixierung der lokalen Verstärkungen auf dem Grundlaminat dienen, zu einer geringfügigen Erhöhung der Permeabilität insbesondere in K_3 -Richtung (siehe Abbildung 5.8). Dies ist dadurch begründet, dass die Naht Ondulationen in den Verstärkungsfasern hervorruft, die zu Gassen und Fließkanälen im Textil und somit zu einer höheren Fluiddurchlässigkeit führen.



a)



b)

Abbildung 5.8: Ersatz-Permeabilität mit FDA-Werkstoffen verstärkter textiler Halbzeuge auf dem Standard-Gelege-Grundlaminat: Relation Gelege zu FDA (a) und FDA im Variantenvergleich (b)

Zusätzlich werden im Rahmen der Untersuchungen die aufgeführten Werkstoffe zur Substitution der Grundlaminatlagen hinsichtlich deren Permeabilität analysiert. Während die oben aufgeführten Permeabilitätswerte jeweils bei identischem Faservolumengehalt von 48% dargestellt wurden, sind die Werkstoffe zur Grundlaminatrealisierung aufgrund deren deutlichen Unterschiede in der Struktur bei den in Kapitel 5.1.1 aufgeführten Faservolumengehalten von 32% für Glasfasermatten und 50% für Glasfasergelege dargestellt.

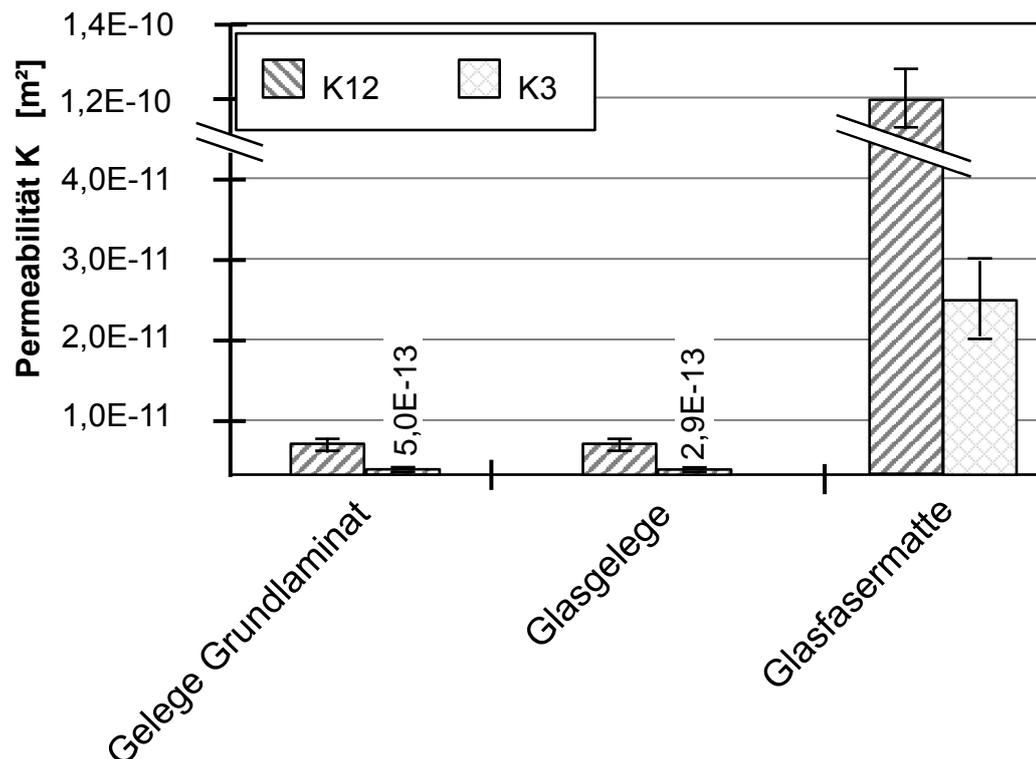


Abbildung 5.9: Permeabilitätswerte der Werkstoffe zur Substitution des CF-Gelege-Grundlaminats mit Glasgelegen oder Glasfasermatten

Wie in Abbildung 5.9 zu sehen, weisen auch bei diesen Werkstoffen die K_3 -Permeabilitäten einen deutlich geringeren Wert auf, als diejenigen in K_{12} -Richtung. Das Glasgelege (GG: $4,51E-12 \text{ m}^2$) weist dabei etwas höhere Permeabilitäten auf, als das Gelege Grundlaminat (GL: $3,94E-12 \text{ m}^2$) aus den Basisuntersuchungen. Zusätzlich zu erkennen ist jedoch, dass die Glasfasermatte mit K_{12} -Werten von $1,16E-10 \text{ m}^2$ und K_3 -Werten von $2,42E-11 \text{ m}^2$ deutlich höhere Permeabilitäten sowohl in Ebenen-, als auch in Dickenrichtung aufweist, als sämtliche andere Werkstoffe. Diese hohen Permeabilitätswerte, welche durch die Wirrstruktur mit Gassen sowohl in der Ebene, als auch in der Dicke begründet sind, fördern den Harzfluss während des Injektionsprozesses. Sie

ermöglichen Injektionen mit vergleichsweise geringen Drücken und auftretenden Injektionskräften, beeinträchtigen aber voraussichtlich auch die Gleichmäßigkeit des Fluidflusses. Es wird vermutet, dass diese Textilien zu inhomogenen Fließfronten und Lufteinschlüssen während des Injektionsprozesses führen, da die lokalen Verstärkungen aus Kohlenstofffasergelegen (LV 90°/90° oder LV 90°/0°) und die FDA-Werkstoffe deutlich geringere Permeabilitäten aufweisen.

5.2.3 Fazit

Zusätzlich zu den Kompaktierungswiderständen konnten im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung die Permeabilitäten der verwendeten Kohlenstofffasergelege einerseits im Grundlaminat und andererseits in den lokalen Verstärkungslagen untersucht werden.

Während anhand der Untersuchungen des Kompaktierungswiderstands bei den FDA-Werkstoffen keine Kennwerte festgestellt werden konnten, die als prozesskritisch eingestuft werden, ist dies bei den Permeabilitätswerten anders. So stellen sich die Permeabilitäten sowohl in der Ebene (K_{12}), als auch in Dickenrichtung (K_3) beim multidirektional aufgebauten Grundlaminat geringer dar, als bei den Kohlenstofffasertextilien, die in den lokalen Verstärkungslagen Verwendung finden. Trotz der Tatsache, dass bei den durchgeführten Untersuchungen nicht die K_{11} -Permeabilität der Textilien, sondern eine mittlere Permeabilität in Ebenenrichtung (K_{12}) ermittelt wurde, ist dieser Wert bei den Kohlenstofffasergelegen bis zu einem Faktor acht höher, als in Dickenrichtung, was einen Fluidfluss in der Ebene gegenüber einem in Dickenrichtung fördert.

Die Permeabilitätswerte der FDA-Werkstoffe sind dagegen sowohl in K_{12} - als auch in K_3 -Richtung deutlich geringer. Dies lässt hohe Drücke während des Injektionsprozesses und auch vergleichsweise hohe, auf die LV in Ebenenrichtung wirkende Kräfte erwarten. Auf Basis der Permeabilitätswerte wird die Imprägnierung der FDA-Werkstoffe als kritisch betrachtet und muss in den folgenden Untersuchungen der Fließfrontvisualisierung im Detail analysiert werden.

Bei der Analyse der Alternativwerkstoffe hinsichtlich einer Substitution der Grundlaminatlagen wurden die Lagenaufbauten so definiert, dass möglichst identische Kompaktierungswiderstände zwischen Kohlenstofffasergelege Grundlaminat, Glasgelege und dem Glaswirrtexil resultieren. Während sich die Permeabilitätswerte des entsprechenden Glasgelegeaufbaus sowohl in Ebenen-, als auch in Dickenrichtung im Bereich des

Kohlenstoffgeleges befinden, führt das Glaswirrtexil bei vergleichsweise geringem Faservolumengehalt von 32% zu deutlich höheren Permeabilitätswerten in beiden analysierten Textilrichtungen. Dies lässt vergleichsweise niedrige Injektionsdrücke bzw. Injektionszeiten und gegebenenfalls ein Fluidvordringen im Glaswirrtexil gegenüber den lokalen Verstärkungen aus Kohlenstofffasergelege oder vor allem den FDA-Werkstoffen vermuten. Um das weitere Vorgehen hierzu festlegen zu können, wird auf die prozessnäheren Analysen der Fließfrontvisualisierung und Laminatherstellung verwiesen.

5.3 Fließfrontvisualisierung am Glasplattenwerkzeug

Nach Charakterisierung der Ausgangswerkstoffe im vorangegangenen Abschnitt, gilt es nun die Analyse des Fertigungsprozesses lokal verstärkter Bauteile und der angeführten Werkstoffkombinationen durchzuführen.

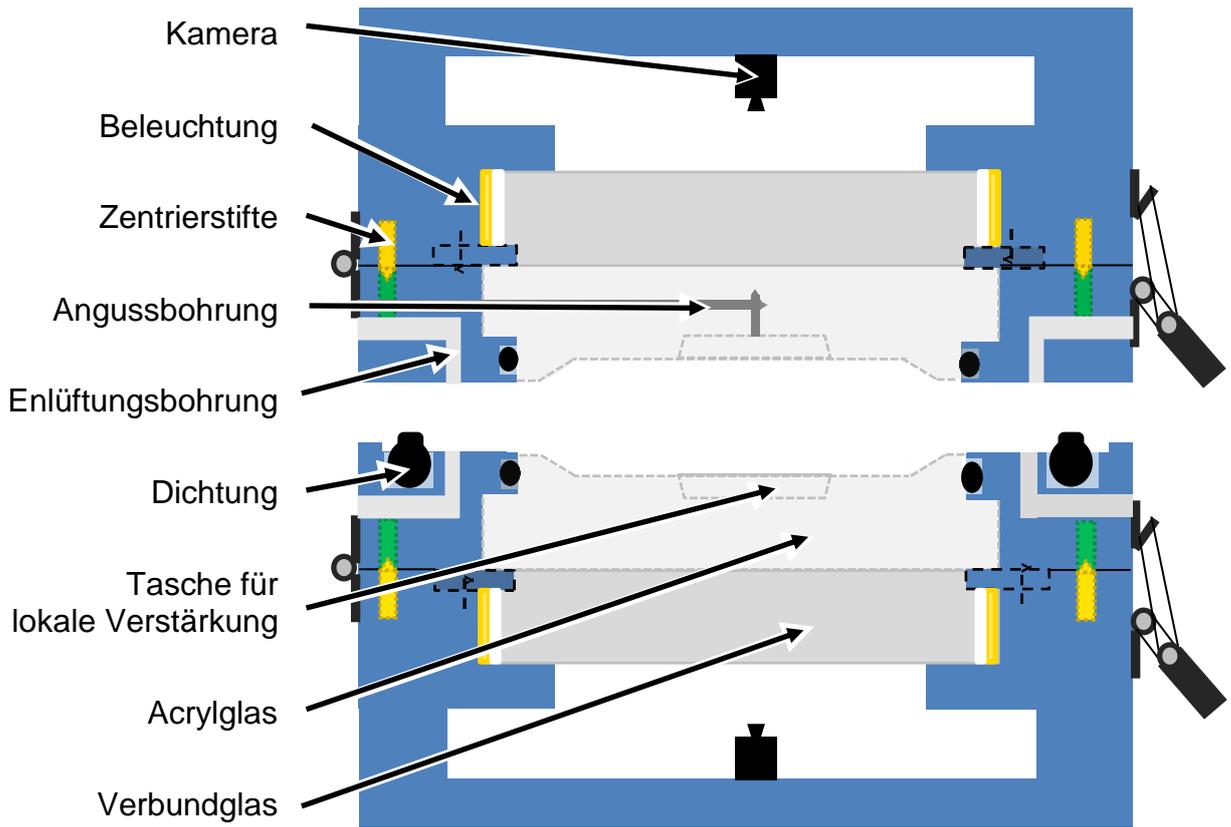
In diesem Abschnitt erfolgt die Untersuchung des Imprägnierverhaltens im RTM-Prozess. Basierend auf ausführlichen Recherchen, wird die Analyse der Fließfrontprogression im vorliegenden Fall an einem doppelseitigen Glasplattenwerkzeug durchgeführt, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellt wurde.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden die in Kapitel 4.3.1 dargestellten, mit verschiedenen Parametern charakterisierten textilen Halbzeuge im vakuumunterstützten RTM-Verfahren (VA-RTM) auf deren Fließfrontverläufe hin untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist es, einen Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Parameter an einem detailgetreu aufgelösten Fließfrontverlauf durchzuführen, um daraus anschließend Richtlinien für die Konzeptionierung lokal verstärkter Lamine und die entsprechende Werkzeugtechnologie ableiten zu können.

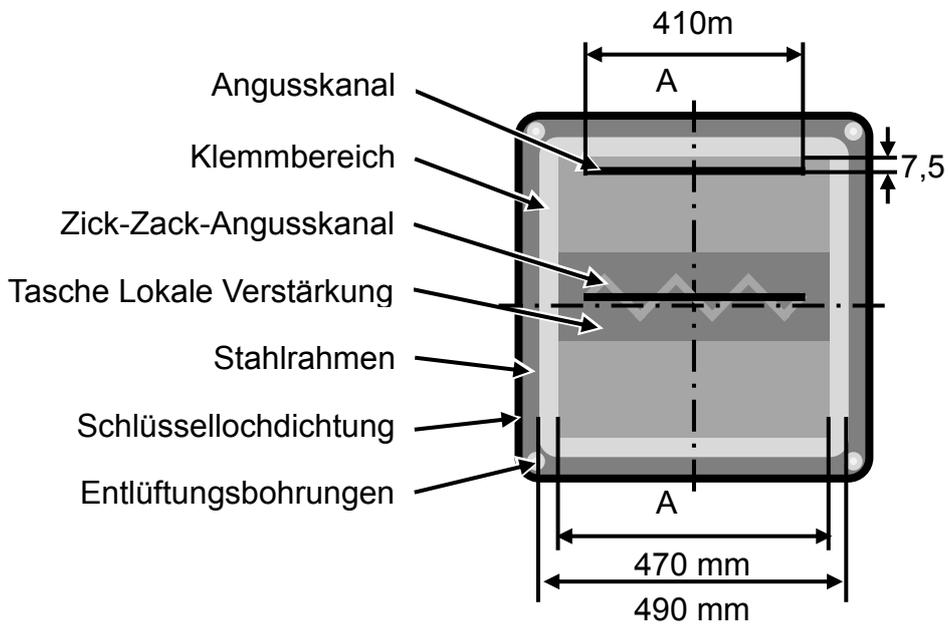
5.3.1 Werkzeug- und Systemtechnik

Das zur kontinuierlichen Ermittlung des Fließfrontverlaufs an der Ober- und Unterseite erstellte, doppelseitige Glasplattenwerkzeug besteht, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, aus einer oberen und einer unteren Einheit und wird in einer Universalprüfmaschine vom Typ Z250SW der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm betrieben. Die Fließfront wird dabei während des Füllprozesses über zwei Kameras vom Typ DMK 72BUC02 der Firma The Imaging Source Europe GmbH, Bremen aufgezeichnet. Diese Aufzeichnung der Fließfront erfolgt, wie in Abbildung 5.10a zu sehen ist, durch Verbundsicherheits- und Acrylglasplatten hindurch. Das Verbundsicherheitsglas, das

zur Stabilisierung der Kavität dient, besteht dabei aus miteinander verklebten Glasplatten und ist für Kräfteinleitungen von bis zu 250 kN auf die Glasplattenfläche von 490 x 490 mm und eine maximale Durchbiegung der Kavität beziehungsweise der Verbund-sicherheitsglasplatten von 0,05 mm ausgelegt. Dieser Wert kann entsprechend Vorversuchen auch für die durchgeführten Analysen angenommen werden. Der kavitätsformende Teil, der das Halbzeug aufnimmt, ist aus Gründen der mechanischen Bearbeitbarkeit und der erforderlichen Transparenz aus Polymethylmethacrylat (Acrylglas) gefertigt. In diese Acrylglaseinleger sind die Taschen für das textile Halbzeug und die lokalen Verstärkungen, der Angusskanal sowie die Nuten für die Abdichtung zu den Nachbarkomponenten (Stahlrahmen und Anguss) über O-Ringe eingebracht. Die Abdichtung des Ober- und Unterwerkzeugs zueinander ist über eine sogenannte Schlüsselochdichtung ebenso im Stahlrahmen realisiert, wie die Bohrungen zur Aufbringung des Vakuums und Parallelführungen zur Positionierung des Ober- und Unterwerkzeugs zueinander. Zum Schutz der Acrylglaseinleger vor der Aushärtungsreaktion von Harzen wird bei Versuchen zur FFV in diesem Werkzeug mit einem Sonnenblumenöl der Firma Vita D'Or injiziert.



a)



b)

Abbildung 5.10: Darstellung des Glasplattenwerkzeugs (a) in einer schematischen Schnittansicht und der Visualisierungsfläche des Werkzeugs (b)

Die Geometrie des WDÜ (Abbildung 5.10) ist analog der in Kapitel 4.3.2 dargestellten Abmessungen ausgeführt. Im Klemmbereich, am Rand des Acrylglases ist die Kavitätshöhe umlaufend von 2,1 mm auf 1,7 mm verringert. Wie im Rahmen der Werkzeugauslegung ermittelt wurde, führt dies zu einer Erhöhung des Kompaktierungsdrucks um den Faktor 6,5, aber auch zu einer Steigerung des Fließwiderstands in diesem Bereich. Dies ist erforderlich, um ein Voreilen des Injektionsmediums am Kavitätsrand zwischen Textil und Schlüssellochdichtung sowie damit verbundene Fehlfüllungen zu verhindern. Möglich ist diese lokale Erhöhung des Faservolumengehalts bei diesem Werkzeug aufgrund der hohen mechanischen Steifigkeit des massiv ausgelegten Verbundsicherheitsglases, das die im Injektionsbereich liegenden Acrylglaseinsätze stützt. Das Verbundsicherheitsglas ist während des Schließ- und Injektionsprozesses in der Lage, die auftretenden Kräfte auf den Werkzeugrahmen abzuleiten, ohne die angeführte maximale Durchbiegung zu überschreiten.

Die Parameter, die während des Formfüllvorgangs geregelt werden, sind die Drücke in den Injektions- und Vakuumleitungen sowie die Schaltzeitpunkte der Ventile. Zudem werden zur Gewährleistung einer maximalen Interpretationsgüte vor den Versuchen die vorliegende Kavitätshöhe, die Halbzeugstärke im Grundlaminat und im Verstärkungsbereich, die Werkzeug- und Öltemperatur, der Massenstrom am Anguss, die Prozesszeit sowie der Schließkraftverlauf ermittelt. Neben der Interpretation der FFV-Ergebnisse dienen diese Daten, wie zum Beispiel die Dokumentation der Temperatur dazu, Viskositätsveränderungen des Injektionsmediums aufgrund Temperaturschwankungen im Versuchsumfeld zu berücksichtigen. Neben anderen grundlegenden Vorversuchen wurden deshalb die Viskositätsverläufe verschiedener Injektionsmedien entlang einer Temperaturrampe ermittelt und entsprechend das bei diesen Versuchen verwendete Sonnenblumenöl als das Geeignetste identifiziert. Dieses weist bei Raumtemperatur, bei der dieses Werkzeug betrieben wird, eine auch von (s. [HDN11]) bestätigte, für Großserienprozesse adäquate Viskosität von 50 mPas auf. Zur Vorstellung der verschiedenen Komponenten der Krafteinleitung, der Systemsteuerung, der Datenaufzeichnung sowie der Injektions- und Vakuumtechnik um das Glasplattenwerkzeug herum, ist die verwendete Systemtechnik in Abbildung 5.11 schematisch und in Realdarstellung aufgeführt.

Während zur Schließkraft- und Schließprofilaufzeichnung die Software „testXpert II“ der Universalprüfmaschine (Zwick Roell Z250) verwendet wird, erfolgt die Prozess- und Bilddatenerfassung mit der Software LabVIEW 2013 der Firma National Instru-

ments, Austin, USA. Für die Auswertung der Prozessdaten wird die Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) der Firma Microsoft Corporation, Redmond, USA, verwendet, während Fließfrontbilder mit Hilfe der Software MATLAB R2013b der Firma The MathWorks Inc., Natick, USA ausgewertet werden. Wie in Abbildung 5.11 zu sehen, besteht die im Rahmen dieser Untersuchungen zusammengestellte Systemtechnik aus vier Hauptkomponenten, dem Datenaufzeichnungswagen (Firma HBM, Darmstadt, Deutschland), der Injektionskomponente, der Schließeinheit mit Werkzeug sowie einer Evakuierungseinheit des Typs Vacmobile 2S der Firma Wolfangel, Ditzingen/Heimerdingen, Deutschland.

Die mit der visuellen Analyse verbundenen Hemmnisfaktoren sind gegenüber den Potentialen fundiert abgewogen und wurden schließlich in Kauf genommen. Die Tatsache, dass bei der verwendeten Vorgehensweise keine komplexen Geometrien analysiert werden können, stellt keine Limitation dar. Zum Verständnis der Grundlagen der lokalen Verstärkungen wurde bewusst eine wenig komplexe Grundgeometrie gewählt. Zudem wird der Nachteil, dass keine Harzinjektion, sondern eine FFV mit Ersatzmedien erfolgen muss, dadurch kompensiert, dass die Herstellung der identischen FKV Laminat in einem separaten Prozess und Werkzeug im Hochdruck-RTM-Verfahren realisiert werden. Die Tatsache, dass mit diesem Verfahren ausschließlich die Ober- und Unterseite des textilen Halbzeugs visualisiert werden kann, wird aufgrund der Dünnwandigkeit der zu injizierenden Textilien von maximal 4,2 mm (bei Einfachgurten) beziehungsweise 6,3 mm (im Zentrum sich kreuzender Gurte) zugunsten der hohen Detailtreue und der Beispielhaftigkeit der Ergebnisse ebenfalls akzeptiert.

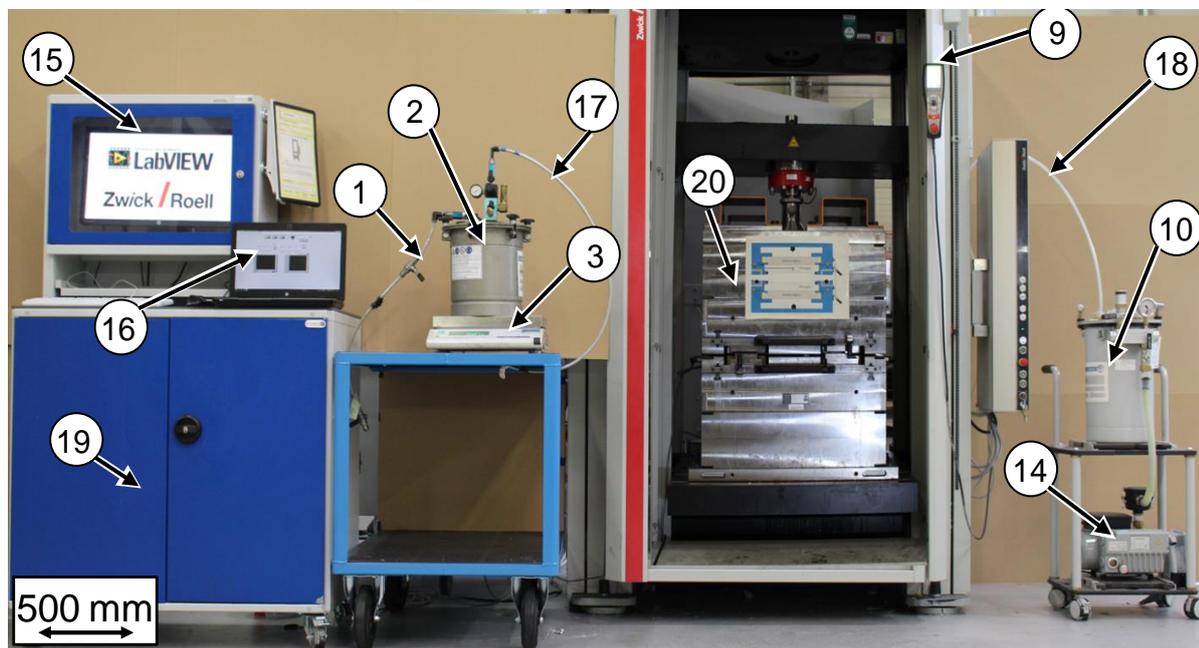
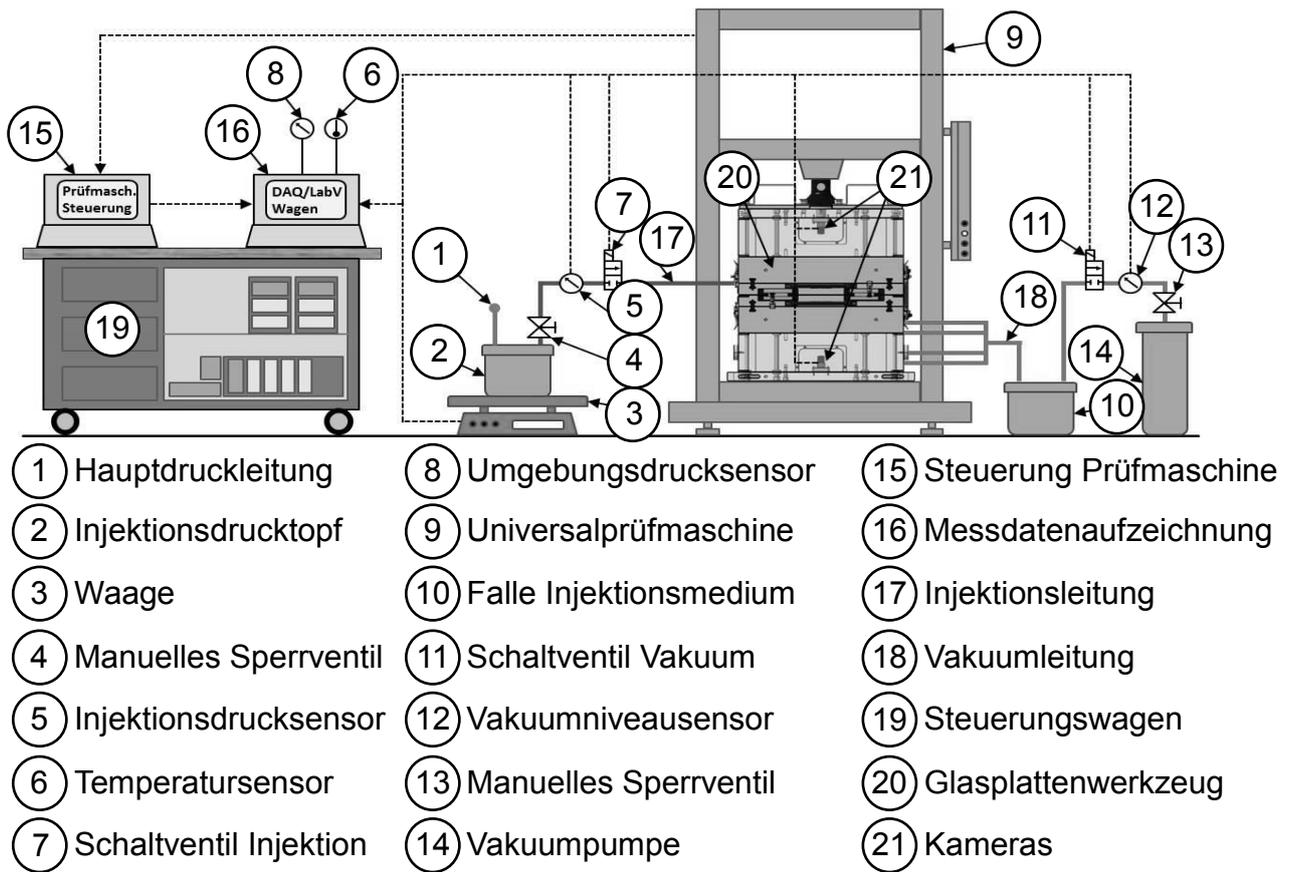


Abbildung 5.11: Systemtechnik zur Visualisierung der Fließfrontprogression im RTM-Verfahren
Oben: schematische Darstellung, unten: Realdarstellung

5.3.2 Versuchsdurchführung und Vorgehensweise

Während eines Fließfrontvisualisierungszykluses wird zunächst der Zielabstand im Werkzeug über Distanzplatten hergestellt. Dabei erfolgt die Einstellung der Kavitätshöhe nicht kraft-, sondern weggesteuert, was dazu führt, dass die Zielwanddicke in der Kavität zuverlässig erreicht wird und keine aufgrund unterschiedlicher Textilsteifigkeiten zu befürchtenden Schwankungen in der Kavitätshöhe zu erwarten sind. Während des Visualisierungszykluses wird nach Einlegen der zu untersuchenden textilen Halbzeuge die jeweilige Bauteil-Zielwandstärke angefahren, bevor die Evakuierung auf einen Absolutdruck von 1,5 kPa erfolgt. Anschließend wird das Injektionsmedium mit einem Druck von 300 kPa injiziert, wobei die Fließfrontprogression sowie die oben aufgeführten Prozessdaten aufgezeichnet werden.

Das in Abbildung 5.12 skizzierte Vorgehen wird zur Datenauswertung verfolgt, um den Injektionsvorgang, der in automatisiert aufgezeichneten Bildern detektiert wird, für wissenschaftliche Betrachtungen zugänglich zu machen. Dabei werden an den aufgezeichneten Originalbildern die Fließfrontpositionen anhand einer im Rahmen der Untersuchungen erstellten Softwareroutine detektiert, in verschiedenen Graustufen überlagert und zu einem codierten Gesamtbild zusammengetragen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die codierten Bilder als Diskussionsgrundlage herangezogen, um die Übersichtlichkeit über die Ergebnisse zu gewährleisten.

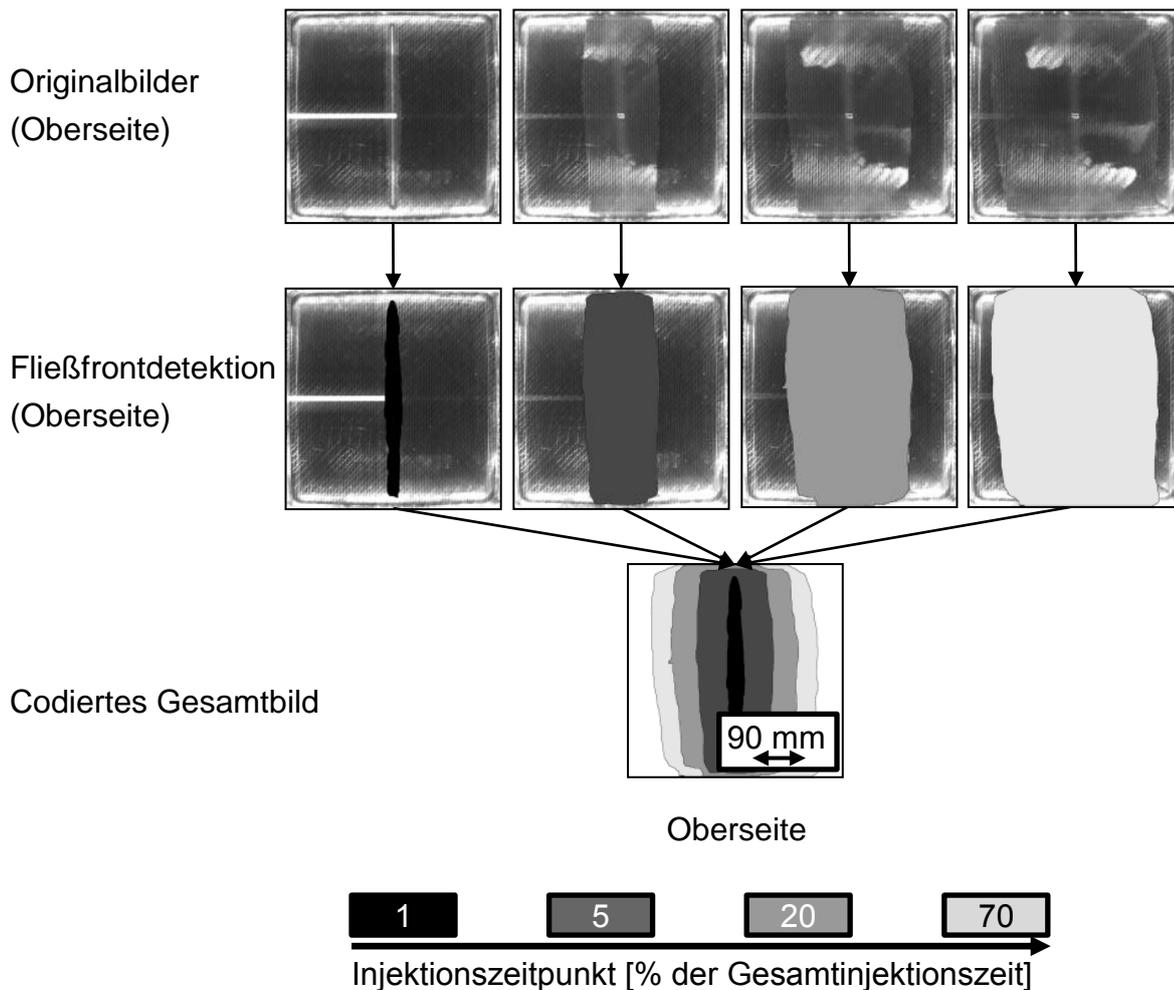


Abbildung 5.12: Vorgehensweise zur Aufbereitung der FFV-Ergebnisse exemplarisch an der Oberseite eines unverstärkten textilen Kohlenstofffaserhalbzeugs

Anhand des verwendeten beidseitig starren Werkzeugs kann der Fließfrontverlauf während des RTM-Injektionsprozesses auf der Ober- und Unterseite visualisiert und aufgezeichnet werden. Zur Validierung der Ergebnisse aus der Fließfrontvisualisierung werden, wie schon aufgeführt, zudem FKV-Lamine mit identischer Geometrie und identischen Lagenaufbauten an einem modularen Plattenwerkzeug im Hochdruck-RTM-Prozess hergestellt. Insbesondere teilgefüllte Lamine dienen zum Vergleich der Ergebnisse aus der FFV und dem RTM-Prozess.

Die sich ergebenden Füllbilder können deshalb auf Basis des Gesetzes von Darcy und der in Kapitel 5.2.2 dargestellten Permeabilitätswerte interpretiert werden, da es sich bei der Prozessführung der teilgefüllten Lamine um eine massengesteuerte Injektion handelt. Die während der Injektion mit 30 g/s berechnete maximale Reynoldszahl beträgt 536. Wie es bei Flüssigimprägnierverfahren häufig der Fall ist, tritt dementsprechend keine turbulente, sondern eine laminare Strömung auf, was für die Anwendung

des Gesetzes von Darcy neben weiteren Rahmenbedingungen nach (s. [ShS10, MLK+12]) essentiell ist.

Die Ergebnisse, die anhand der eigens erstellten Werkzeug-, Systemtechnik und der geschilderten Vorgehensweise generiert werden konnten, sind im weiteren Verlauf dargestellt.

5.3.3 Ergebnisdarstellung und Interpretation

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Resultate der durchgeführten Versuche gegenübergestellt. So erfolgt zunächst die Analyse der Basisuntersuchungen, ehe auf die Alternativwerkstoffe eingegangen wird.

Die Infiltration ebener Halbzeuge ohne lokale Verstärkungslagen (Referenzuntersuchung) erfolgt, wie bei einem zentral, einseitig auf dem Halbzeug platzierten linienförmigen Angussverteilerkanal ohne WDÜ zu erwarten war, sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite gleichmäßig (siehe Abbildung 5.13). Bei der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge beziehungsweise von Halbzeugen mit Wanddickenübergängen zeigen sich im Gegensatz dazu unerwartete Fließfrontverläufe. Bei der in Abbildung 5.13 aufgeführten Zusammenstellung sind die qualitativen Ergebnisse bei außenliegenden LV gemäß der Vorgehensweise aus Abbildung 5.12 dargestellt.

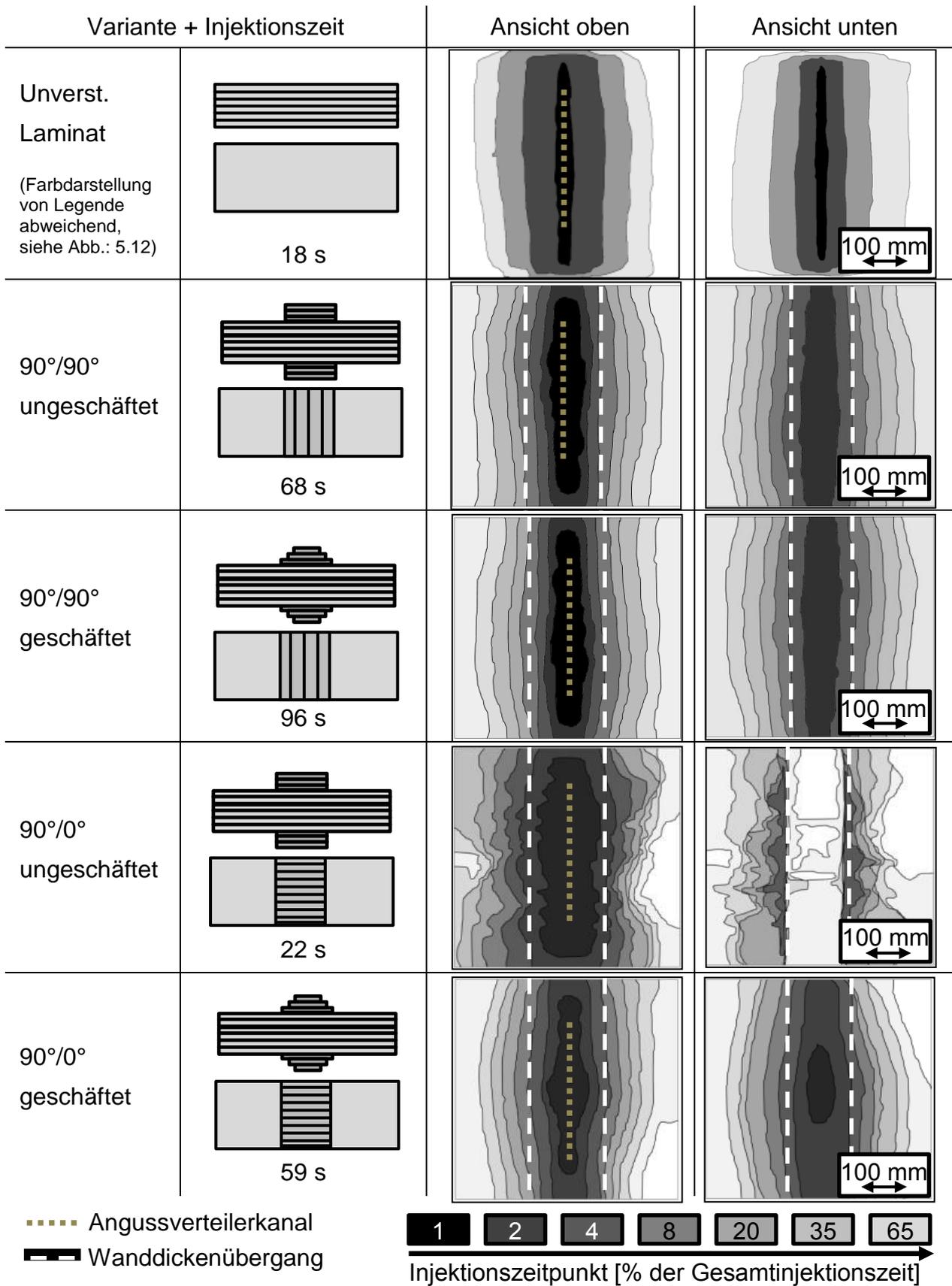


Abbildung 5.13: Ergebnisse der FFV an Halbzeugen mit außenliegenden Verstärkungslagen und mittigem Linienangusskanal

Die textilen Halbzeuge, die mit lokalen Gelegelagen ungeschäftet in $90^\circ/90^\circ$ -Richtung verstärkt sind, werden sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite vom Angussverteilerkanal ausgehend gleichmäßig gefüllt. Sie verhalten sich somit im Injektionsprozess mit den angeführten Parametern analog unverstärkten Halbzeugen, was einen stabilen Imprägnierprozess mit geringen Ausschusszahlen erwarten lässt. Demgegenüber erfolgt die Imprägnierung textiler Halbzeuge mit ungeschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungen bei den gegebenen Konfigurationen und der angewandten Prozessführung auf der Halbzeugunterseite nicht wie erwartet. In diesem Fall fließt das Injektionsmedium auf der Oberseite vom Angussbereich in den unverstärkten Bereich hinein. Das Injektionsmedium gelangt aber anschließend im unverstärkten Grundlaminatbereich an die untere Kavitätsfläche, bevor dies im lokal verstärkten Bereich am Angussverteilerkanal erfolgt. Dadurch imprägniert das Injektionsmedium den Bereich des Wanddickenübergangs, ehe das Fluid im Bereich der lokalen Verstärkung durch das Textil dringt. Dies führt im lokal verstärkten Bereich zu Lufteinschlüssen, die im Laminat und Bauteil in Poren und Trockenstellen resultieren und zu Ausschussteilen führen. Aufbauend auf den vorgelagerten Untersuchungen aus den Kompaktierungs- und Permeabilitätsmessungen wurde dann versucht Lösungen zu finden, um lokal verstärkte Halbzeuge dieser Konfiguration imprägnieren zu können. Eine Maßnahme kann gemäß der Ausführungen in Kapitel 4.3.2 eine geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs sein. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, führt eine geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs zu einer partiellen Erhöhung des Faservolumengehalts und dementsprechend nach Darcy zu einer Reduzierung der lokalen Permeabilität in diesem Bereich. Dies führt aufgrund einer Art Reihenschaltung der Ebenenpermeabilitäten mit hohem Widerstand im WDÜ aus der LV heraus zu einer Verlangsamung des Fluidflusses, während in K_3 -Richtung, aufgrund einer Art Parallelschaltung der Permeabilitäten im lokal verstärkten Bereich die Fließeigenschaften unverändert bleiben. Dies führt zu einer Verschiebung des Verhältnisses zwischen der Permeabilität in der Ebene und der in Dickenrichtung, was eine prozesssichere Imprägnierung der Variante $90^\circ/0^\circ$ mit geschäftetem Übergang erwarten lässt.

Wie aus der aufgeführten Interpretation der Permeabilitäten erwartet, stellen sich die Füllvorgänge der Variante mit $90^\circ/0^\circ$ -Patches und geschäftetem Übergang entgegen dem Verhalten ungeschäfteter Übergänge sowohl auf der Unter-, als auch auf der Oberseite gleichmäßig dar. Zusätzlich zu den $90^\circ/90^\circ$ verstärkten Halbzeugen ist es durch die der geänderte Übergangsgestaltung ist es möglich den Fließfrontverlauf so

zu modifizieren, dass ohne zusätzliche Maßnahmen auch die $90^\circ/0^\circ$ -Varianten prozesssicher imprägniert werden können.

Die Tatsache, dass die K_{0° -Permeabilität, welche in einer $90^\circ/0^\circ$ -LV entlang der Fasern vom Angusskanal in Fließrichtung zum Grundlaminat führt, um den Faktor 10 höher ist, als die $K_{90^\circ\pm}$, ist einer der Gründe für das vorab unerwartete Füllverhalten dieser Variante. Ein zusätzlicher Faktor ist das an der Kavitätsfläche reduzierte Nesting (Ineinanderlegen von Faserbündeln) gemäß (s. [NVB+13]), welches dazu führt, dass in K_{0° -Richtung liegende Gassen an der Werkzeugfläche weniger verschlossen werden und zusätzlich die Progression der Fließfront fördern. Dies erhöht den Unterschied zwischen K_{0° und $K_{90^\circ\pm}$ zusätzlich. Darüber hinaus führt der ungeschäftete Übergang dazu, dass keine Reduzierung dieser K_{0° -Permeabilität im Bereich des Wanddickenübergangs erfolgt, sondern durch den dortigen Reinharzbereich sogar eine Reduzierung des Fließwiderstands in $K_{90^\circ\pm}$ -Richtung. Dies begünstigt zusätzlich einen Fluidfluss auf der Oberseite bis zum Randbereich der LV, ehe der Matrixwerkstoff im Bereich des Wanddickenübergangs mit hoher $K_{90^\circ\pm}$ -Permeabilität in z-Richtung durch das Halbzeug hindurch strömt und an der unteren Kavitätsseite angelangt. Durch den Reinharzbereich im Wanddickenübergang bei einer ungeschäfteten LV (Abbildung 4.4) ist die Permeabilität auch in K_3 -Richtung in diesem Bereich höher als im sonstigen Laminat. Die lokalen Verprägungen des Textils bei linearem Werkzeug- und gestuftem Textilübergang in der Schäftung führen zu einer Erhöhung des Faservolumengehalts und einer Verringerung der Permeabilität im Übergangsbereich. Diese Reduktion der Permeabilität bedingt eine Erhöhung des Injektionsdrucks bei volumengesteuerter Injektion, beziehungsweise eine Reduzierung des Volumenstroms bei druckgesteuerter Prozessführung. Der Fließwiderstand, der einem Fluidfluss aus dem Patch heraus entgegensteht, nimmt dadurch zu. Dies fördert bei gegebenen Parametern einen anfänglichen Fluidfluss in z-Richtung am Angussverteilerkanal und ruft eine gleichmäßige Füllung hervor, die Lufteinschlüsse verhindert.

Zur Untersuchung des Imprägnierprozesses und der Fließfrontprogression auch an komplexeren Geometrien, wurden Fließfrontvisualisierungen zusätzlich an gekreuzt angeordneten, sich zu Dreierpaketen überlagernden, $90^\circ/90^\circ$ - und $0^\circ/0^\circ$ -Kohlenstofffasergelegegurten in geschäfteter und ungeschäfteter Form durchgeführt. Wie auch bei den Untersuchungen an den einfachen Gurten führen ungeschäftete und außenliegende Verstärkungslagen gemäß Abbildung 5.14 während des Injektionsvorgangs, über einen auf der oberen LV befindlichen Linienangusskanal, zu einem ungleichmäßigen Füllverhalten. Es bilden sich Lufteinschlüsse in verschiedenen Bereichen der

lokalen Verstärkungslagen, sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite aus. Dabei erhöht das bei dieser Geometrie vorliegende, sich kreuzende System von Reinharzbereichen die Ausprägung der Lufteinschlüsse ebenso, wie die erhöhte Wandstärke von 6,3 mm im Bereich der Verstärkungskreuzung. Demgegenüber zeigt sich bei der Injektion sich kreuzender Verstärkungslagen mit geschäftetem Wanddickenübergang, analog den Einfachgurten, ein deutlich gleichmäßigerer und stabilerer Fließfrontverlauf. Das Injektionsmedium strömt nicht entlang der Wanddickenübergänge der lokalen Verstärkungslagen vor und es sind weder auf der Ober-, noch auf der Unterseite Lufteinschlüsse zu erkennen. Die Verprägung des Textils an beiden WDÜ, und die dadurch realisierte, gezielte Modifikation der Permeabilität führt auch bei der Injektion sich kreuzender LV zu einer gleichmäßigen Fließfront ohne Lufteinschlüsse. Besonders interessant sind in Abbildung 5.14 die eingekreisten Bereiche der geschäfteten Variante. Dort strömt das Injektionsmedium aufgrund einer Fehlpositionierung der lokalen Verstärkungslage um 4 mm nach oben versetzt an der unten dargestellten Seite des WDÜ vor. Grund ist hier die durch den Versatz resultierende lokale Überpressung des Textils, beziehungsweise das Öffnen von Reinharzbereichen. Dies beeinträchtigt die lokale Permeabilität und entsprechend den Fluidfluss im Injektionsprozess wie hier dargestellt.

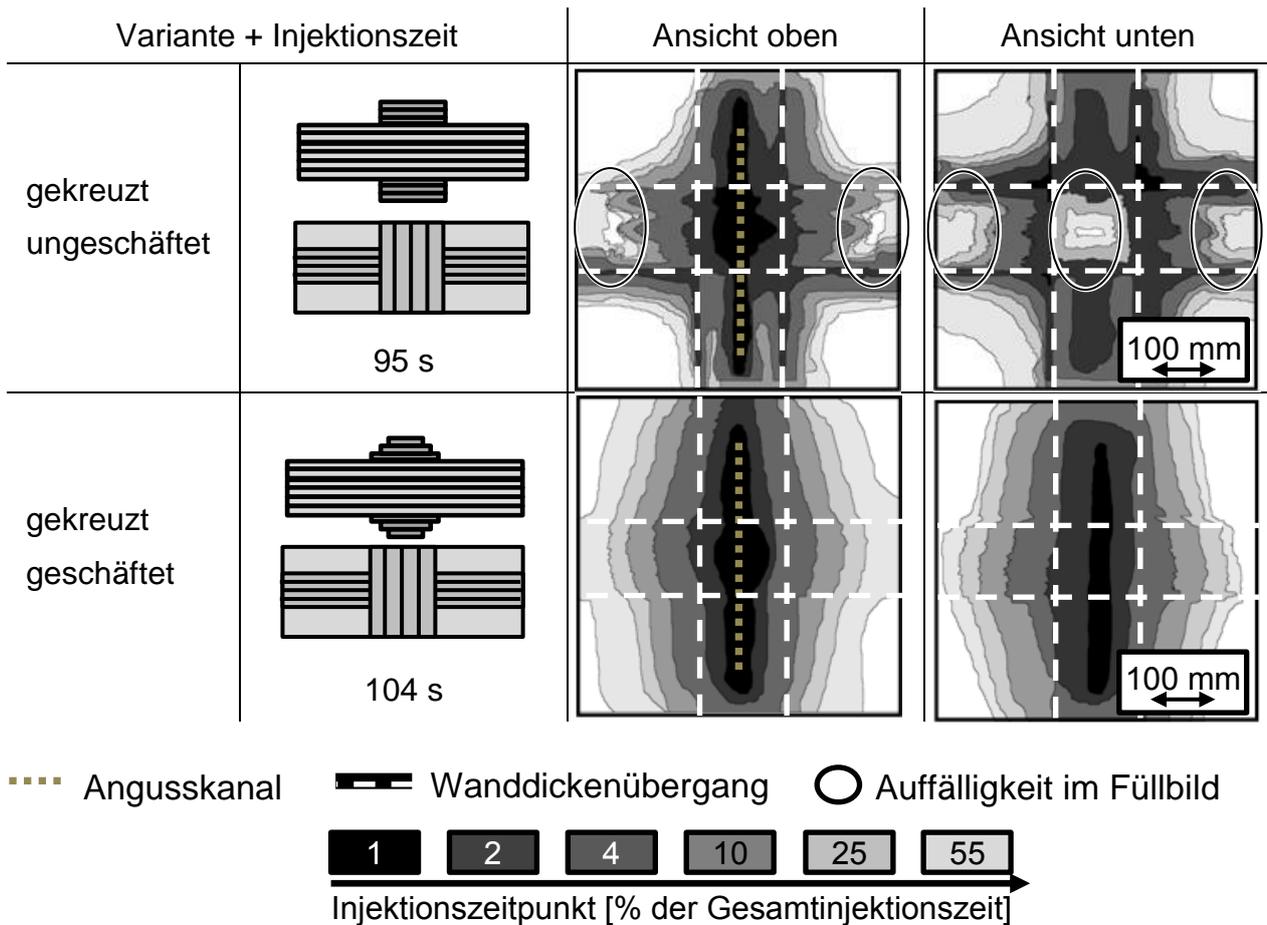


Abbildung 5.14: Fließfrontvisualisierungsergebnisse sich kreuzender 90°/90°- und 0°/0°-Gelege mit geschäftetem und ungeschäftetem Übergang

Um neben dem zentral auf der Verstärkungslage befindlichen Angusskanal auch die Variante eines quer zur Verstärkungslage befindlichen Verteilers zu beleuchten, wurden Versuche anhand eines quer zur LV liegenden, außerhalb dem Zentrum verschobenen Angusskanal durchgeführt. Die in Abbildung 5.15 dargestellten Ergebnisse zeigen ebenfalls den mittlerweile bereits erwarteten positiven Effekt des geschäfteten Übergangs. Während bei der 90°/90°-Variante mit ungeschäftetem Wanddickenübergang ein deutliches Voreilen des Injektionsmediums am WDÜ zu sehen ist, kann dies durch die lokale Verprägung des Textils im Fall des geschäfteten WDÜ verhindert und eine gleichmäßige Fließfront ohne Voreilen am Übergangsbereich gegenüber der lokalen Verstärkung erreicht werden.

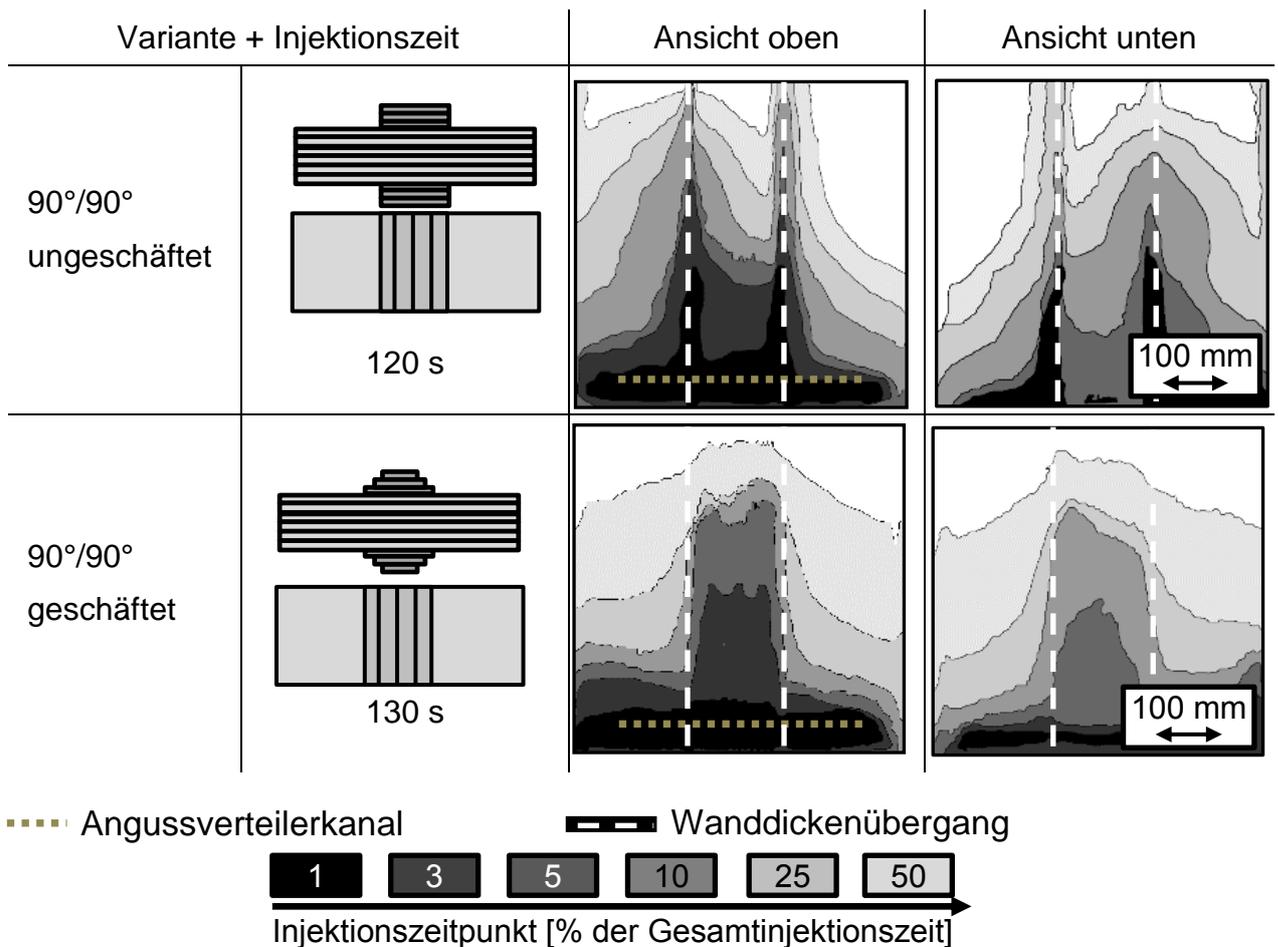


Abbildung 5.15: Ergebnisse der FFV an einfachen 90°/90°-lokal verstärkten textilen Halbzeugen mit querliegendem Angusskanal

Das Voreilen des Injektionsmediums am WDÜ ist bei dieser Variante des Injektionsprozesses besonders deutlich zu sehen. Der Grund dafür ist, dass das Fluid aus dem Angussverteilerkanal unmittelbar in den Reinharzbereich am Wanddickenübergang einströmen kann. Vor Eintritt in den Reinharzbereich ist kein Fluidfluss durch das Textil erforderlich, der das Voreilen am WDÜ wie eine Art Dämpfer abschwächen würde.

Der Einfluss, der Fixierungsnähte lokaler Verstärkungen ist, hinsichtlich des Injektionsprozesses in den vorliegenden Parametern insbesondere an den Basiswerkstoffen von untergeordneter Bedeutung (siehe Abbildung 5.16). Dies wird auf deren vergleichsweise ohnehin hohes Permeabilitätsniveau zurückgeführt. Während an der Halbzeugoberseite bei lokalen Verstärkungen mit 90°/90° und 0°/0° Faserorientierungen die Fixierungsnähte am Füllbild nicht zu erkennen sind, führen sie an der Halbzeugunterseite aufgrund einer Begünstigung des Fluidflusses in z-Richtung zu einem geringfügigen Voreilen des Matrixwerkstoffs. Dies führt jedoch bei sämtlichen geprüften Va-

rianten nicht zu Fehlteilen, da sich der Einfluss der Nähte lediglich in den ersten Sekunden nach Injektionsbeginn zeigt, sofern sich der Angussverteiler direkt an der Naht befindet, wie in Abbildung 5.16 zu sehen ist. Sobald sich die Fließfront vom Angussverteilerkanal entfernt, gleicht sie sich an und der Nahteinfluss nimmt mit zunehmendem Fließweg ab.

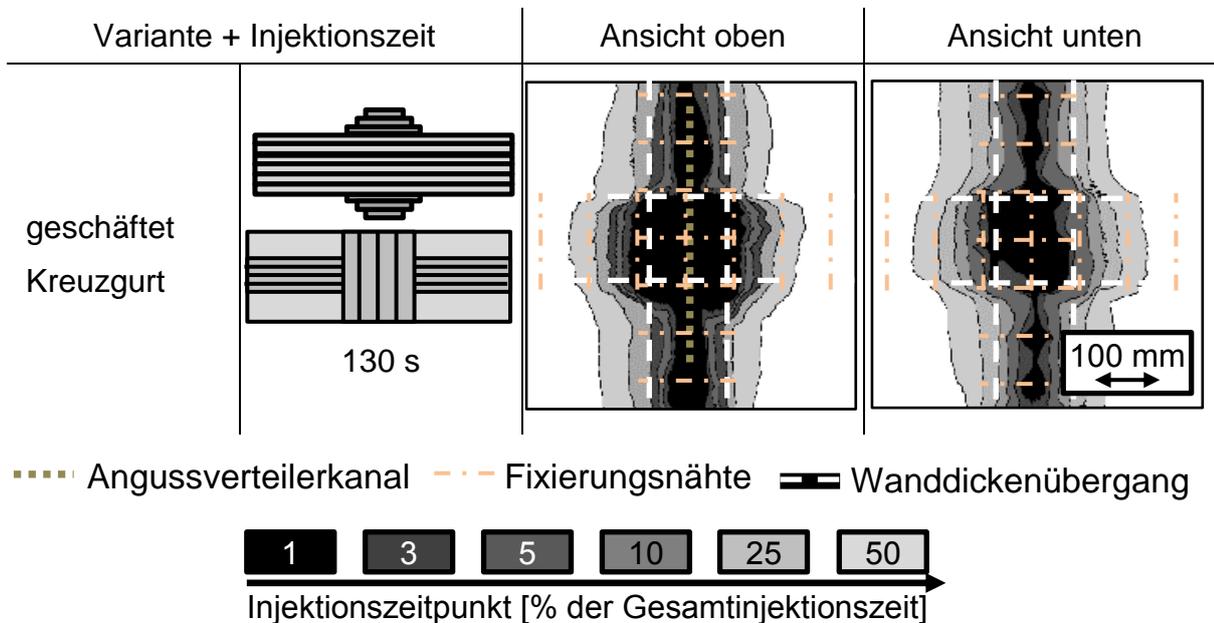


Abbildung 5.16: Ergebnisse aus der FFV mit vernähten textilen Halbzeugen

Wie bei den Permeabilitätsmessungen wurden die vorgestellten FFV zusätzlich zu den Basisuntersuchungen auch an den Alternativwerkstoffen durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Abbildung 5.17 und Anhang 8 dargestellt. Im Rahmen der FFV mit der FDA als lokale Verstärkung auf Grundlaminaten aus Kohlenstofffasergelegen der Basisuntersuchungen, wird ein deutlicher Einfluss von Gassen im FDA-Werkstoff ersichtlich. Dies erfolgt bei vergleichsweise sehr geringer Permeabilität im FDA-Roving und einer ausgeprägten Dominanz eingebrachter Vernähungen auf das Injektionsbild. Die niedrige Permeabilität führt zu langen Imprägnierzeiten und niedrigen Injektions-Massenströmen im Vergleich zur Injektion von Gelegen in den LV. Die „Ersatzpermeabilität“ im Bereich der lokalen Verstärkungslage kann, wie anhand der FFV-Bilder ersichtlich wird, durch Einbringen von Gassen deutlich erhöht werden. Dies verbessert und stabilisiert die Imprägnierung jedoch nicht. Durch eine resultierende ungleichmäßige Fließfrontbewegung wird vielmehr eine Bildung von Lufteinschlüssen hervorgerufen. Ähnlich wirken sich auch die Vernähungen auf das Füllbild aus. Auch diese führen beim FDA-Werkstoff mit der ermittelten, sehr geringen „Ersatzpermeabilität“ zu einer ungleichmäßigen Fließfrontausbreitung. Sie fördern die Bildung lokaler Fließkanäle in

Ebenen- und vor allem in Dickenrichtung. Wie in Abbildung 5.17 dargestellt, besteht während der Injektion mit FDA-LV die Gefahr von Lufteinschlüssen sowohl an der Ober- als auch der Unterseite. Ein Voreilen des Injektionsmediums an den Wanddickenübergängen ist bei den FDA-Untersuchungen deshalb zu erkennen, da sie prozessbedingt ausschließlich mit ungeschäftetem Übergang durchgeführt werden konnten. Die Maßnahme der Fließfrontstabilisierung durch eine geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs wird auch in diesem Fall als hilfreich eingeschätzt, könnte aber die aufgrund eingebrachter Fließkanäle und Vernähungen auftretenden Lufteinschlüsse nicht eliminieren.

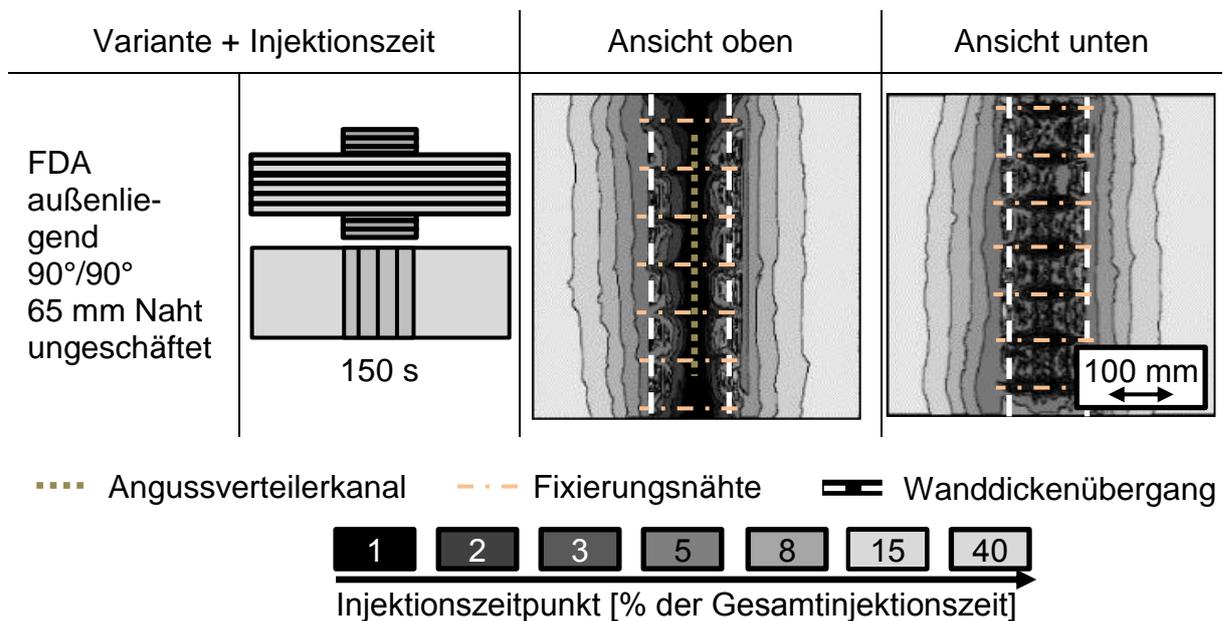


Abbildung 5.17: Ergebnisse der FFV an textilen Halbzeugen aus FDA-Werkstoffen

Während die Fließfrontbilder des FDA-Werkstoffs als lokale Verstärkung nicht darauf hindeuten, dass diese Technologie für den Hochdruck-RTM-Prozess zielführend sein kann, stellt sich das Bild für die Alternativwerkstoffe zur Substitution des Grundlaminats durch Glaslege, oder Glasfasermatten anders dar. Die entsprechenden Halbzeuge zeigen sich deutlich geeigneter im Laufe des Injektionsprozesses (siehe Anhang 8). Analog der Untersuchungen an den Kohlenstofffasergelegen sind durch die geschäftete Gestaltung des WDÜ gleichmäßige Füllbilder, sowohl mit, als auch ohne lokale Fixierungsnähte zu erzielen. Basierend auf den Ergebnissen der FFV wird eine Herstellung lokal verstärkter Bauteile auf Basis dieser Werkstoffe als möglich bewertet, da sich im Abstand von 65 mm eingebrachte Fixierungsnähte aufgrund des allgemein hohen Permeabilitätsniveaus (z.B. K₁₂-Glaslege: 4,51E-12 m² gegenüber K₁₂-FDA:

1,4E-12 m²) im Vergleich zu FDA-Werkstoffen deutlich weniger nachteilig auf den Injektionsprozess auswirken. Auch die Halbzeuge mit Glasfasermatten zeigen positive Eigenschaften in der Fließfrontvisualisierung und werden auf Basis des Erkenntnisstands zum aktuellen Zeitpunkt als vielversprechend eingeschätzt.

5.3.4 Fließfrontquotient zur Ergebnisquantifizierung

In diesem Abschnitt wird auf die Gesamtfüllzeit bei druckgesteuerter Injektion und auf den im Rahmen dieser Untersuchungen entwickelten und etablierten Fließfrontquotienten (FFQ) eingegangen. Dieser wurde eingeführt, um über das qualitative Füllverhalten hinaus anhand der generierten Bilder die Versuche auch quantitativ gegenüberstellen zu können. Dieser Wert beschreibt die Gleichmäßigkeit der Fließfront und setzt sich aus dem Quotient aus der Länge der detektierten Fließfront und der Benetzungsfläche des textilen Halbzeugs zusammen. Die detaillierte Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse folgt im Rahmen dieses Kapitels.

Im Vergleich der Varianten mit einem einfachen Gurt in geschäfteten zu ungeschäfteten Halbzeugen der Faserorientierung 90°/90° zeigt sich, dass die Füllzeit der Halbzeuge mit ungeschäfteten lokalen Verstärkungen geringer ist, als die der geschäfteten (siehe Abbildung 5.13). Dies wird durch die Erhöhung des Faservolumengehalts im geschäfteten Übergang und der damit einhergehenden Verringerung der Permeabilität erklärt. Zusätzlich bewirkt die lokale Erhöhung der Permeabilität im ungeschäfteten Übergang einen geringeren Fließwiderstand, wobei die damit verbundene Erhöhung der Fließfrontprogression eine Reduzierung der Gesamtfüllzeit ergibt. Zudem wird der Faserorientierungseinfluss anhand der Gesamtfüllzeiten bei druckgesteuerter Imprägnierung deutlich. So beträgt sie bei 90°/90°-Faserorientierung aufgrund der vergleichsweise geringeren Permeabilität vom Angusskanal in Richtung Grundlaminat grundsätzlich länger (ungeschäftet: 68 s, geschäftet: 96 s), als bei den 90°/0°-Varianten (ungeschäftet: 22 s, geschäftet: 59 s).

Der angesprochene Quotient (siehe Gleichung 5.1) von Fließfrontlänge zu Fließfrontfläche wird als quantitative „Maßeinheit“ für die Güte des Injektionsverlaufs definiert.

$$\text{Fließfrontquotient [mm}^{-1}\text{]} = \frac{\text{Fließfrontlänge } L \text{ (mm)}}{\text{Imprägnierte Fläche } A \text{ (mm}^2\text{)}} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass der FFQ neben Werkstoffeinflüssen auch vom Angusskanalkonzept, der Bauteilgeometrie und der Prozessführung abhängig ist

und ausschließlich innerhalb der Betrachtung einer identischen Angusskonstellation eine Gegenüberstellung erlaubt. Während im Vergleich verschiedener Angusskonzepte, wie exemplarisch zwischen einem Linienanguss und einem Ringanguss ein höherer Fließfrontquotient zur Reduzierung der erforderlichen Fließwege, Fließdrücke und Fließzeiten führen kann und somit positiv wirkt, ist innerhalb eines Angusskonzepts und einer Geometrie wie bei den vorliegenden Versuchen ein minimaler FFQ erstrebenswert.

Analog der Darstellungen in Abbildung 5.18, die ein schematisches Fließfrontbild mit geringem und eines mit hohem FFQ zeigt, ist ein minimaler FFQ zielführend und anzustreben, um ein porenfreies Bauteil bei definierter Prozessgestaltung prozesssicher zu erreichen.

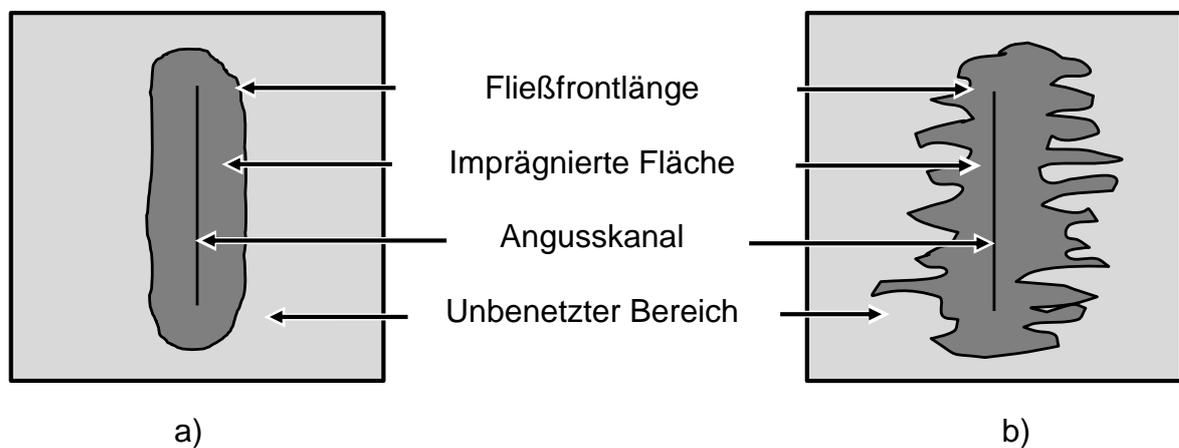


Abbildung 5.18: Exemplarische Darstellung des Füllbilds eines niedrigen (a) und hohen (b) Fließfrontquotienten bei gegebener Angussgeometrie

Für die Charakterisierung des Fließfrontverlaufs wird der FFQ für die jeweiligen Zeitschritte berechnet und über der Injektionszeit (Zeit zwischen Injektionsstart und Momentaufnahme) aufgetragen. Je geringer das Verhältnis von Fließfrontlänge zu Fläche, umso geringer ist der FFQ. Ein Injektionsszenario mit minimalem FFQ indiziert ein gleichmäßiges Füllverhalten, bei dem das Injektionsmedium in keinem Bereich vorseilt, und somit die Gefahr der Bildung von Lufteinschlüssen und Poren aufgrund von Werkstoffinhomogenitäten im Bauteil entsprechend gering ist.

Die Verläufe der FFQ der 90°/90°- und 90°/0°-Halbzeuge (geschäftet und ungeschäftet) sind in Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 aufgeführt. In der Darstellung der 90°/90°-Variante ist festzustellen, dass die FFQ der repräsentativen ungeschäfteten Versuchsreihe einen geringeren Betrag auf der Ober- und auch Unterseite aufweisen

als die Geschäfteten. Dies deutet bei durchwegs gleichmäßigen Fließfronten bei ungeschäftetem Übergang auf eine Fließfront mit vergleichsweise kreisförmiger Ausprägung hin (Kreis hat minimales Verhältnis von Umfang zu Fläche). Wie bereits angemerkt, kann die Fließfront bei ungeschäfteter Gestaltung des WDÜ, aufgrund des lokal geringeren Fließwiderstands rascher vom Anguss in Richtung unverstärkten Bereich füllen, als bei geschäftetem Übergang. Grund hierfür ist, dass im geschäfteten Fall der Fließwiderstand in Ebenenrichtung höher ist und die Fließfront entsprechend zunächst eher der Linienform des Angusses entspricht. Ebenfalls aus Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 zu entnehmen, sind die erwähnten, längeren Füllzeiten bei geschäfteten Übergängen. So konvergiert der FFQ in diesen Versuchen zu einem späteren Zeitpunkt mit der x-Achse (nimmt den Wert 0 an), was bedeutet, dass die im Dividend stehende Fließfrontlänge im Bildverlauf später eine Länge von 0 mm aufweist und das Textil entsprechend vollständig gefüllt ist.

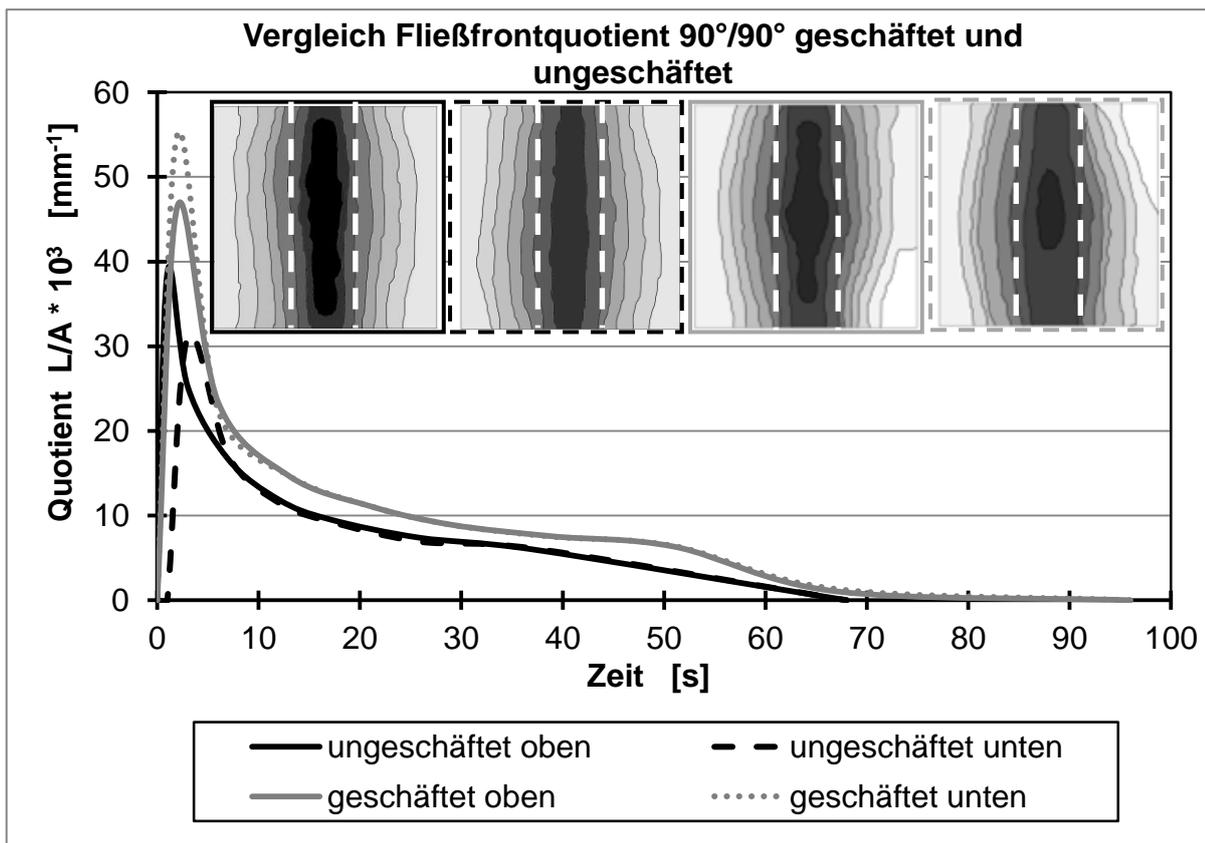


Abbildung 5.19: Fließfrontquotienten bei Halbzeugen mit lokalen 90°/90°-Verstärkungslagen mit geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen

Beim Versuch mit $90^\circ/90^\circ$ ist in der ungeschäfteten Variante ein verzögertes Auftreten der Fließfront an der Unterseite im Vergleich zur Oberseite festzustellen. Im Gegensatz dazu treten bei der geschäfteten Variante die Fließfrontspitzen in den FFQ annähernd zeitgleich, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt, auf. Die Kurvenverläufe des oberen und unteren FFQ nähern sich im geschäfteten Fall schnell an und verlaufen bis zum Ende der Injektion deckungsgleich, was auf ein identisches Füllbild auf der Ober- und Unterseite hindeutet.

In Abbildung 5.20 zeigt sich bei der ungeschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Variante demgegenüber ein anderer Verlauf der FFQs zueinander. Der Maximalwert des Fließfrontquotienten tritt an der Werkzeugunterseite im Vergleich zur Oberseite deutlich verspätet und mit 132 mm^{-1} sehr ausgeprägt auf. Das verzögerte Auftreten des Maximalwerts ist der Fall, weil das Injektionsmedium zunächst, wie bei den Fließfrontbildern diskutiert, an der Oberseite vom Angusskanal in Richtung Grundlaminat fließt und erst im Anschluss durch das Grundlaminat in Dickenrichtung hindurch dringt (siehe Kapitel 5.3.3). Der hohe Maximalwert auf der Unterseite resultiert neben einer vergleichsweise unruhigen Fließfront vor allem aus den geteilten Füllflächen in den Randbereichen der lokalen Verstärkungslagen an der Werkzeugunterseite. Die damit verbundene Zweiteilung des Imprägnierbereichs (siehe Abbildung 5.13) führt zu einer Verdoppelung des Umfang-Flächen-Verhältnisses und zu einem dementsprechend hohen Fließfrontquotienten. Während sich bei sämtlichen anderen Varianten der Fließfrontquotient der Unter- und Oberseite während der Injektion einander annähern, ist dies bei der ungeschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Variante nicht der Fall. Dies ist auf die in den Füllbildern erkennbaren deutlichen Unterschiede zwischen der Fließfront auf der oberen und unteren Textilstelle zurückzuführen.

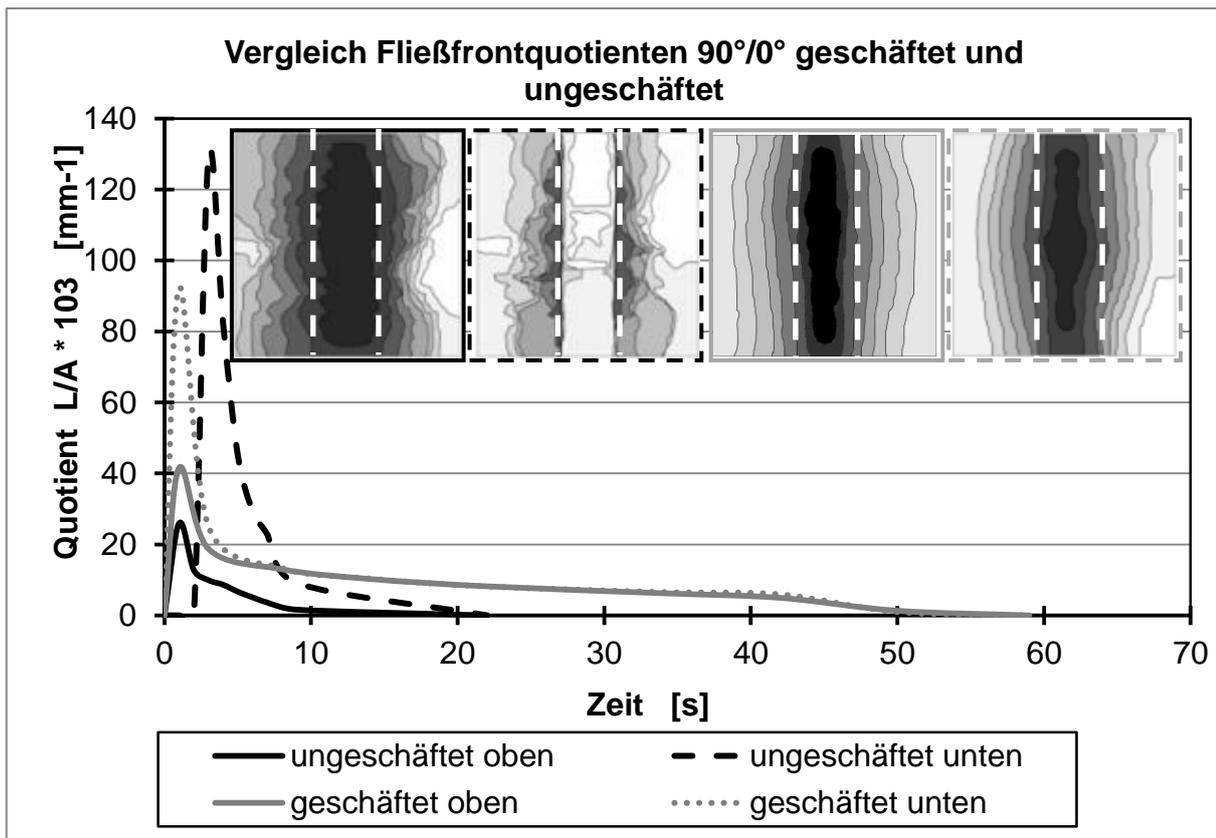


Abbildung 5.20: Fließfrontquotienten bei Halbzeugen mit lokalen 90°/0°-Verstärkungslagen mit geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen

Entsprechend der dargestellten Erkenntnisse können auf Basis der FFQ, insbesondere in Kombination mit den qualitativen Fließfrontdarstellungen aus Abbildung 5.13, Rückschlüsse auf das Füllverhalten textiler Halbzeuge sowohl qualitativ, als auch quantitativ gezogen und diese für ein definiertes Prozesskonzept charakterisiert werden.

5.3.5 Fazit

Basierend auf der qualitativen und quantitativen Analyse des Füllverhaltens lokal verstärkter textiler Halbzeuge zeigen sich unterschiedliche Charakteristika der analysierten Variationsparameter. Wie vorgestellt, konnten an lokal verstärkten Halbzeugen aus Kohlenstofffasergelegten die Einflüsse der Faserorientierungen in den lokalen Verstärkungen auf den Füllvorgang im RTM-Verfahren aufgezeigt und bewertet werden. So zeigen sich Luftpneinschlüsse bei ungeschäfteten Wanddickenübergängen im Fall der

90°/0°-Varianten, wohingegen unverstärkte Halbzeuge sowie Halbzeuge mit lokalen Verstärkungslagen in 90°/90°-Richtung keine Fehlfüllungen aufweisen.

Ebenso sind beträchtliche Einflüsse der Gestaltung des WDÜ im textilen Halbzeug sowie in der Kavität zu erkennen. Die positiven Auswirkungen der Schäftung auf das Imprägnierverhalten zeigen sich dabei eindeutig und reproduzierbar. Durch eine Erhöhung des Faservolumengehalts im Randbereich der lokalen Verstärkungslagen resultiert auch bei der mit ungeschäftetem WDÜ kritischen Variante mit 90°/0°-Faserorientierung eine gleichmäßige Fließfrontprogression ohne Lufteinschlüsse. Was jedoch die lokale Faservolumengehaltserhöhung im geschäfteten WDÜ mit sich bringt, sind längere Gesamtfüllzeiten bei druckgesteuerter Injektion beziehungsweise höhere Kavitätsdrücke bei volumengesteuerter Injektion als im ungeschäfteten Fall.

Zudem wurde im Rahmen der Basisuntersuchungen der Injektionsvorgang von Halbzeugen mit lokalen Vernähungen untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Doppelsteppstichvernähungen (4 mm Stichlänge) von Kohlenstofffasergelegen unter den gegebenen Bedingungen nur einen geringen Einfluss auf die Fließfront haben. Durch eine Öffnung der Rovings führen sie zu einer geringfügigen Fließfrontbeschleunigung, insbesondere im Bereich des Angussverteilerkanals in z-Richtung, jedoch kaum in davon entfernten Bereichen.

Im Rahmen der Analyse textiler Halbzeuge mit lokalen FDA-Verstärkungen verschiedener Varianten wird augenscheinlich, dass die geringe Permeabilität der Alternativwerkstoffe zu einer vergleichsweise langsamen und aufgrund unterschiedlicher Permeabilitäten ungleichmäßigen Fließfrontausbreitung führt. Zwischen einzelnen Rovings eingebrachte Fließkanäle erhöhen die „Ersatzpermeabilität“ des LV-Werkstoffs zwar, resultieren aber auch in Lufteinschlüssen innerhalb der Rovings.

Da die Integrität der FDA-Werkstoffe aufgrund fehlender Verwirkungen und hoher Fließwiderstände eine Fixierung erforderlich machen, wurden die Einflüsse lokaler Vernähungen explizit auch auf die Fließfrontausbreitung untersucht. Dabei zeigt sich, dass durch die Vernähungen ein starkes Permeabilitätsgefälle im Halbzeug geschaffen wird. Dies führt dazu, dass sich Lufteinschlüsse zwischen fließfrontfördernden Fixierungsnähten ausbilden, die im Laufe des Injektionsvorgangs nicht wieder gefüllt werden können und entsprechend zu Fehlteilen führen. Beruhend auf den Erkenntnissen aus der FFV wird eine Fertigung lokal verstärkter Bauteile über diese Werkstoffkombination nicht weiter verfolgt.

Zusätzlich werden die Alternativwerkstoffe Glaslege und Glasfasermatte zur Substitution der Grundlaminatlagen untersucht. Beide Werkstoffe zeigen während des Injektionsprozesses mit komplexen, sich kreuzenden Gurten und geschäftetem WDÜ eine gleichmäßige Fließfrontprogression. Aufgrund allgemein vergleichsweise hoher Permeabilitäten dieser Werkstoffe in Kombination mit Kohlenstofffasergelegen als lokale Verstärkungen, bildet sich auch in Bereichen von Fixiernähten eine gleichmäßige Füllfront aus. Basierend auf den Ergebnissen der FFV scheint eine Herstellung lokal verstärkter Bauteile mit diesen Werkstoffkombinationen möglich.

Als hilfreiche Kenngröße für die Auswertung und den Vergleich der durchgeführten Versuche hat sich der vorgestellte FFQ herausgestellt. Zusätzlich zu den codierten Bildern liefert der FFQ eine bedeutende Interpretationsstütze im Rahmen der Auswertung der Fließfrontvisualisierungsversuche. Er gibt Aufschluss über die Gesamtinjektionszeit, die Gleichmäßigkeit der Fließfront im Sinne von Abbildung 5.18 sowie über den quantitativen Versatz der Fließfrontprogression zwischen Ober- und Unterseite.

5.4 Füllsimulation im RTM-Verfahren

Eine virtuelle Darstellung und Simulation des Injektionsprozesses im RTM-Verfahren ist ein bedeutender, für den Großserienprozess unerlässlicher Schritt, um die Werkzeug- und Prozessauslegung für die Herstellung lokal verstärkter Bauteile möglichst zeiteffizient bei minimalen Kosten durchführen zu können. Basierend auf dem Stand der Technik in der Großserienfertigung, werden anhand zweidimensionaler Modelle zur Simulation großflächiger Serienbauteile die erforderlichen Modifikationen für die virtuelle Abbildung von Bauteilen mit lokalen Verstärkungen abgeleitet und die Ergebnisse daraus vorgestellt.

5.4.1 Vorgehensweise

Während in der virtuellen Darstellung des Imprägnierprozesses im Nasspressverfahren bis dato wenig Erkenntnisse vorhanden sind und die lokalen Verstärkungen aufgrund des Harzauftragsprozesses und dem Fluidfluss vor allem in K_3 -Richtung keinen fließfrontbeeinflussenden Faktor darstellen, wird der Injektionsprozess textiler Halbzeuge im Hochdruck-RTM-Verfahren gemäß dem Stand der Technik in zweidimensionalen Schalenmodellen modelliert. Dieses zweidimensionale Simulationsmodell findet Anwendung, um die teilweise großflächigen und komplexen Bauteile effizient virtuell abbilden und daraus Richtlinien für die Prozess- und Werkzeuggestaltung ableiten

zu können. Für die Vernetzung beziehungsweise Modellierung wird dazu die Software „HyperMesh“ der Firma Altair Engineering Inc., Troy, USA, verwendet, während als numerische Berechnungssoftware das Programm „PAM-RTM“ der Firma ESI Group, Paris, Frankreich, zum Einsatz kommt. Für Bauteile ohne Dickensprung werden die beschriebenen, zweidimensional aufgebauten Schalenelemente mit entsprechendem Offset zur Darstellung der Bauteilwanddicke versehen. Auf diese Weise kann eine gemittelte Fließfrontausbreitung für den gesamten Textilaufbau abgeleitet werden, was für nicht lokal verstärkte Bauteile ausreichend und maximal effektiv ist. Eine Auflösung der Einzellagen, beziehungsweise eines unterschiedlichen Fließverhaltens an Ober- und Unterseite kann dadurch jedoch nicht erreicht werden. Basierend auf den Erkenntnissen aus der FFV (siehe Kapitel 5.3.3 und 5.3.4) wird der Bedarf nach einer dreidimensionalen virtuellen Darstellung jedoch offensichtlich. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird diese aufgebaut und ein Vergleich der Ergebnisse aus der virtuellen Betrachtung und den Versuchen zur FFV durchgeführt. Um die Darstellbarkeit des Injektionsprozesses in der Simulation und den geschilderten Abgleich zu ermöglichen, werden die in Tabelle 5.1 aufgeführten Konfigurationen über die FFV hinaus auch simulativ abgebildet:

Tabelle 5.1: Charakteristika der simulativ abgebildeten textilen Halbzeuge mit beidseitig außenliegenden lokalen Einfachgurten

Faserorientierung	Wanddickenübergang
90°/0°	ungeschäftet
90°/0°	geschäftet
90°/90°	ungeschäftet
90°/90°	geschäftet

Das im Rahmen der dreiminensionalen Abbildung verwendete Netz zur 3D-Simulation des lokal verstärkten Halbzeugs ist in Abbildung 5.21 dargestellt. So ist in der Aufsicht die Segmentierung der Flächen in den Klemmbereich (Zone 12), Grundlaminatbereich (Zone 10) und Verstärkungsbereich (Zone 11) zu sehen. Darüber hinaus sind in dieser Darstellung in rot die Wanddickenübergänge (Zone 5) und in blau die möglichen Angusskanäle (Zone 3) dargestellt. In der darunter platzierten Schnittansicht sind die einzelnen Verstärkungslagen im Halbzeug sowie die Gestaltung des Wanddickenübergangs zu erkennen. Während dem Grundlaminat und dem Bereich der lokalen Ver-

stärkung entsprechende Werkstoffcharakteristika zugeordnet werden (siehe Anhang 7), weichen diese im Übergangsbereich (Zone 1–5) ab. Diese Abweichungen der Eigenschaften sind in der Zonendarstellung über unterschiedliche Einfärbungen visualisiert. Die geometrische Anpassung des Wanddickenübergangs ist aufgrund eines unverhältnismäßigen Rechenaufwands bei entsprechend fein vernetzter WDÜ-Gestaltung im geschäfteten Fall nicht möglich. Die entsprechenden Permeabilitäten und Wandstärken werden jedoch variantenspezifisch den verschiedenen Zonen zugeordnet.

Zonen:

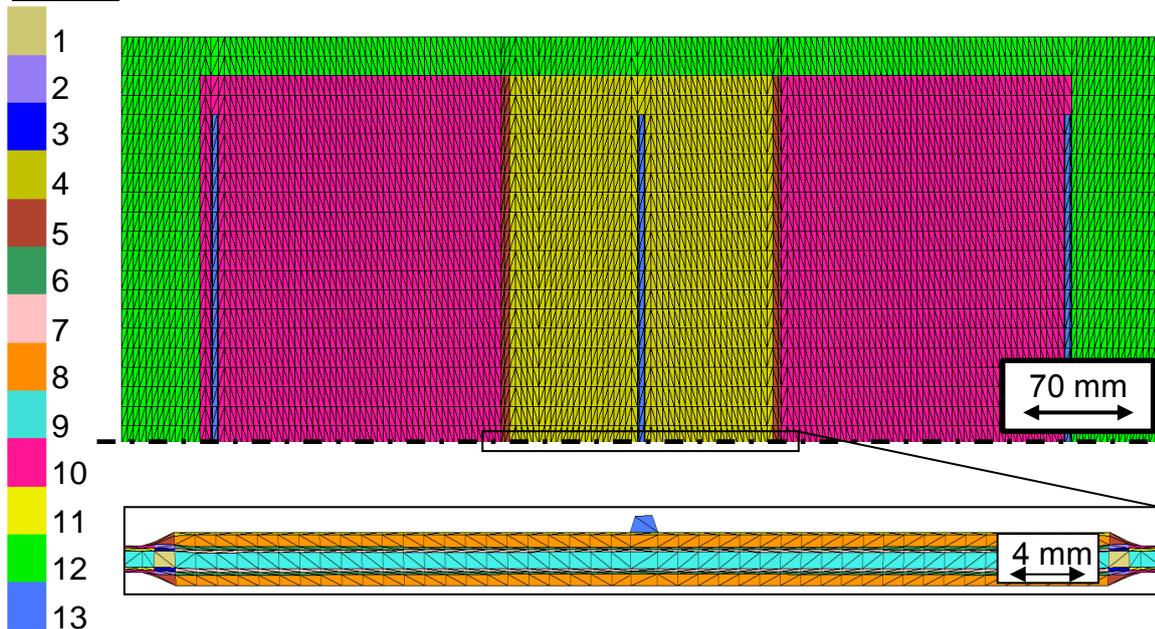


Abbildung 5.21: Netz zur 3D-Simulation des lokal verstärkten textilen Halbzeugs

Die Simulationsergebnisse werden gemäß der in Abbildung 5.22 dargestellten Vorgehensweise analog den Fließfrontvisualisierungsergebnissen aufbereitet, um sie mit den qualitativen Ergebnissen der FFV vergleichbar zu machen. Analog Abbildung 5.12 werden die aus der Simulation erhaltenen Füllbilder zu definierten Zeitpunkten ausgeleitet und die in rot dargestellten, bis dahin vollständig imprägnierten Bereiche analog der Auswertungen in Kapitel 5.3.2 mit verschiedenen Graustufen hinterlegt. Durch Überlagerung der einzelnen Graustufenbilder erfolgt analog den FFV-Ergebnissen eine plakative Darstellung der Fließfrontprogression in einer Abbildung. Aus Gründen der Simulationseffizienz wird nicht die komplette Kavität virtuell dargestellt. Es erfolgt vielmehr die Darstellung einer senkrecht zur lokalen Verstärkungslage geteilten Symmetriehälfte.

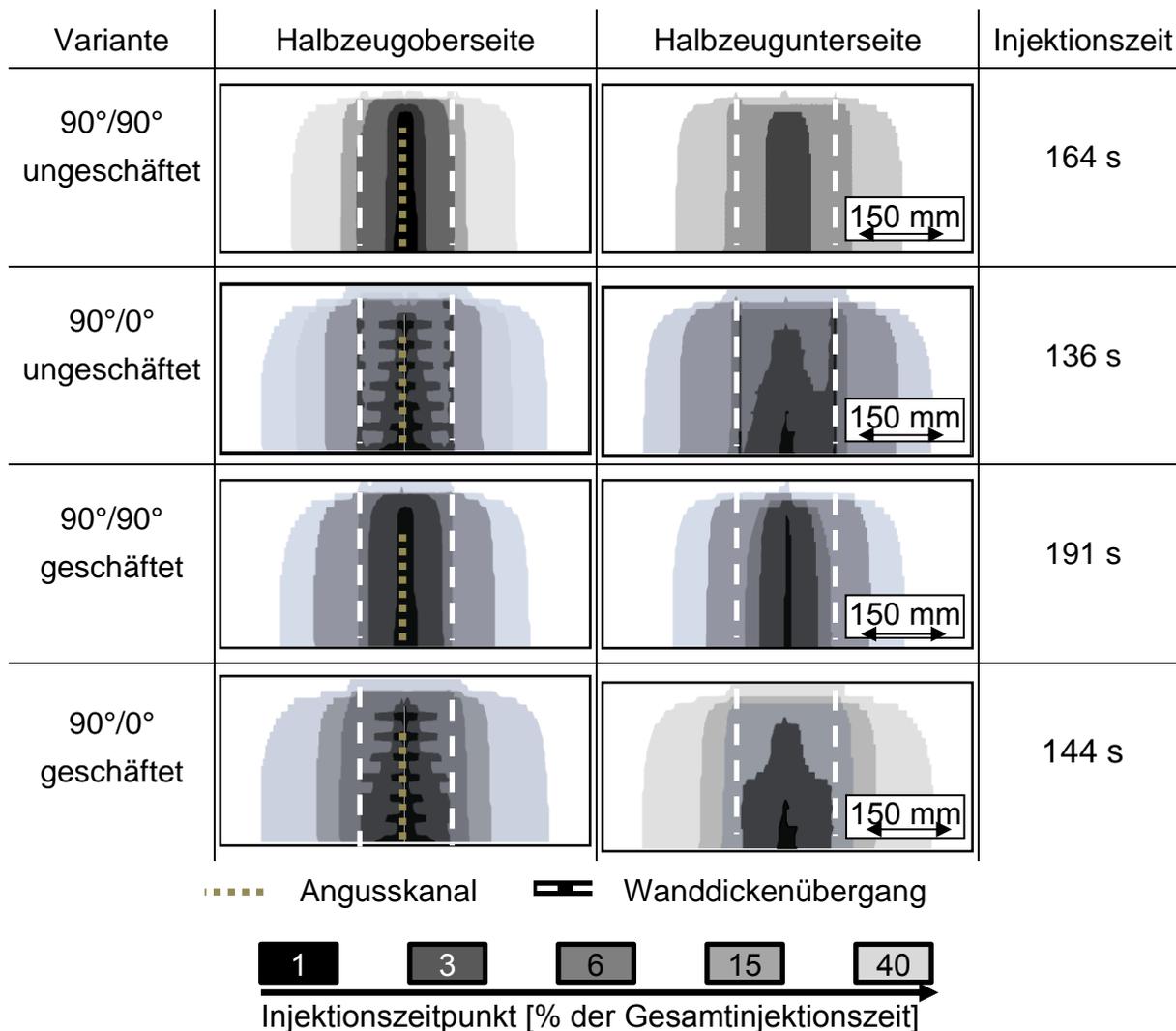


Abbildung 5.23: Ergebnisse der virtuellen Abbildung des Fließfrontverlaufs anhand der Plattengeometrie mit lokalen Verstärkungen

Die Simulation des Fließfrontverlaufs bei Halbzeugen mit 90°/0°-Verstärkungslagen und ebenfalls Werkstoffcharakteristika eines ungeschäfteten Übergangs ergibt das in Zeile 2 von Abbildung 5.23 dargestellte Imprägnierbild. An der Halbzeugoberseite, an der sich auch der Angussverteilerkanal befindet, erfolgt die Fließfrontprogression vom Zentrum nach außen. Auf der Unterseite hingegen dringt die Fließfront direkt im Angussbereich und zeitgleich im Bereich des WDÜ als erstes durch das Textil, bevor der lokal verstärkte Bereich an der Unterseite vollständig imprägniert wird. Zur Darstellung der Fließkanäle in den lokalen Verstärkungslagen, die auch an den Versuchen der FFV erkennbar sind, werden im Simulationsmodell die einzelnen Zellensegmente gemäß den Ausführungen aus Kapitel 5.4.1 mit erhöhten Permeabilitäten versehen. Am Ergebnis der Unterseite der 90°/0°-Variante kann zudem eine Eigenheit des Simulationsmodells festgestellt werden. Aufgrund der tetraedrischen Vernetzung erfolgt so eine asymmetrische Fließfrontausbreitung. Dadurch tritt das Fließfrontvorgehen an den rechts dargestellten Laminathälften stärker auf, als links. Dieser Sachverhalt ist ein

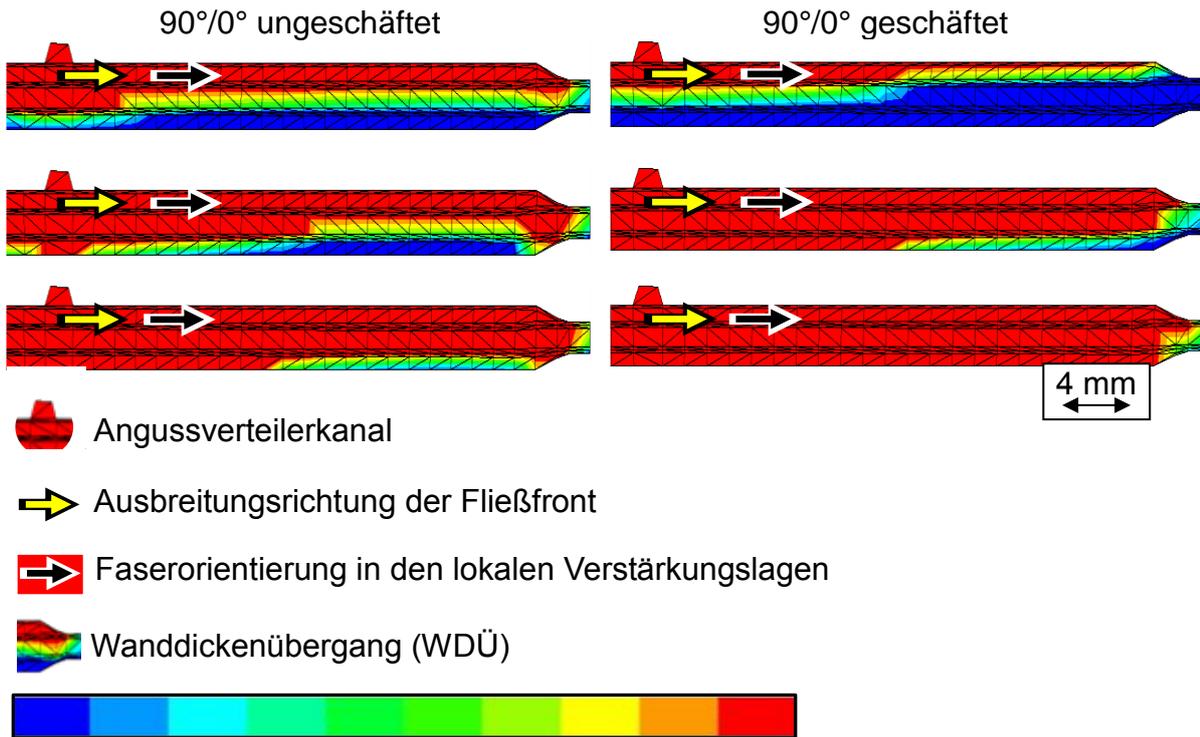
Beispiel für die Unterschiede zwischen Simulation und Realität, welche geringe, auftretende Unterschiede in den Imprägnierprozessen erklären können.

Neben der Simulation der ungeschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Variante wird diese Faserorientierung auch mit Materialeigenschaften eines geschäfteten Übergangs virtuell abgebildet. Während es bei den Simulationsergebnissen der ungeschäfteten Variante auf der Halbzeugunterseite zu Lufteinschlüssen kommt, erfolgt die Imprägnierung in der Simulation beim geschäfteten Übergang im Bereich zwischen lokal verstärktem und unverstärktem Bereich analog den $90^\circ/0^\circ$ -Varianten. Sowohl an der Ober-, als auch an der Unterseite erfolgt die Ausbreitung der Fließfront vom Angussverteilerkanal aus dem Verstärkungsbereich heraus ohne Lufteinschlüsse in der lokalen Verstärkungslage, oder im Grundlaminatbereich.

Die in der Simulation errechneten Füllzeiten weichen teilweise von den im Experiment ermittelten Zeitintervallen ab, zeigen aber identische Relationen zwischen den Versuchen hinsichtlich der Füllzeit und liefern eine qualitativ sehr gute Übereinstimmung mit den FFV-Ergebnissen. Dadurch können zusätzliche Erklärungen für die im Fließfrontverlauf detektierten Phänomene abgeleitet und die Gestaltungsparameter, wie der Grad der Verprägung im Bereich des Wanddickenübergangs für zukünftige Auslegungprozesse bauteilspezifisch modifiziert werden.

Die aufgeführten Unterschiede zwischen der Fließfrontprogression mit geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen sind in den Schnittansichten in Abbildung 5.24 besonders gut zu sehen.

Bei der Modellierung des ungeschäfteten Wanddickenübergangs in Abbildung 5.24a (entsprechende Textilfaservolumengehalte und Permeabilitäten sind hinterlegt) eilt die Fließfront an der Halbzeugoberseite der lokalen Verstärkungslagen voraus, ehe das Injektionsmedium in K_3 -Richtung das Textil durchdringt. Die Fließfront gelangt im Bereich hoher Permeabilität im Wanddickenübergang auf die Unterseite (siehe Zeitschritte 2 und 3 Abbildung 5.24a), bevor der lokal verstärkte Bereich vollständig imprägniert werden kann. Dies führt zu Lufteinschlüssen im Bauteil und zu dessen Ausschuss im Fertigungsprozess. In Abbildung 5.24b hingegen breitet sich das Injektionsmedium in K_3 -Richtung aus, bevor die Imprägnierung in Ebenenrichtung und in den Übergangs- und Grundlaminatbereich hinein erfolgt. Dementsprechend ist der Fließfrontverlauf in der geschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Variante (Abbildung 5.24b) deutlich gleichmäßiger und führt zu keinem Ausschuss im Produktionsprozess, da eine vollständige Imprägnierung des lokal verstärkten Bereichs erfolgt, bevor im WDÜ das Fluid zur Laminatunterseite gelangt.



Imprägnierstatus: unimprägniert (0 s) bis imprägniert (9 s)

Abbildung 5.24: Schnittansicht der Füllsimulationsergebnisse mit 90°/0°-LV ungeschäftet und geschäftet durch den Plattenmittelpunkt

Aus dem simulierten Infiltrationsverlauf lassen sich analog der FFV folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Gleichmäßiger Fließfrontverlauf vom Anguss-Verteiler-Kanal ausgehend auf Ober- und Unterseite bei Halbzeugen mit lokalen Verstärkungen der Faserorientierungen 90°/90° geschäftet und ungeschäftet.
- Keine Lufteinschlüsse bei der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge mit 90°/90°-Verstärkungslagen
- Füllzeit bei Halbzeugen mit geschäfteten Wanddickenübergängen höher als bei welchen mit ungeschäfteten
- Gleichmäßige Imprägnierung vom Angusskanal aus bei 90°/0° verstärkten Halbzeugen auf der Injektionsseite
- Lufteinschlüsse auf der Unterseite bei Halbzeugen mit 90°/0° Faserorientierungen und ungeschäftetem Wanddickenübergang
- Fehlerfreie Füllung bei Halbzeugen mit 90°/0° Faserorientierungen und geschäfteten Wanddickenübergängen

Die auftretenden quantitativen Unterschiede in den Imprägnierzeiten zwischen den Ergebnissen der FFV und der Simulation werden aufgrund von Experteneinschätzungen vor allem unterschiedlichen Halbzeugzuständen zugewiesen. Bei der Simulation wurden Permeabilitätswerte aus dem identischen Verstärkungswerkstoff in optimalem Zustand ermittelt. Die FFV erfolgte dagegen anhand von textilen Halbzeugen, die entlang des Lagenstapels und durch die Binderaktivierung zahlreichen Handhabungsschritten unterzogen waren. Aufgrund einer inperfekten Ausrichtung wird vermerkt, dass die Permeabilitätswerte der Werkstoffe aus der FFV höher gewesen sind, als die idealisierten Werte, die in die Simulationen eingeflossen sind. Dies führt zu höheren Gesamtinjektionszeiten in der Simulation. Ein weiterer Faktor, der die längeren Füllzeiten der Simulation erklären kann, ist insbesondere bei den geschäfteten Wanddickenübergängen das bereits angeführte, in der Praxis auftretende Faserarrangement, das durch Schließ- und Injektionskräfte hervorgerufen wird; in der Simulation jedoch keine Berücksichtigung findet.

5.4.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass es durchaus möglich ist den RTM-Injektionsprozess der vorgestellten lokal verstärkten textilen Halbzeuge simulativ darzustellen. Besonders im Fall der 90°/0°-Variante mit ungeschäftetem WDÜ ist es jedoch dafür erforderlich, das lokal verstärkte Halbzeug dreidimensional abzubilden, was insbesondere bei großflächigen, komplexen Geometrien einen vergleichsweise hohen Vernetzungs-, Programmier- und Rechenaufwand verursacht. Zur realitätsnahen Darstellung des Imprägnierprozesses lokal verstärkter Halbzeuge im Hochdruck-RTM-Verfahren ist diese Vorgehensweise jedoch unumgänglich, da ein identisches Imprägnierverhalten über die Halbzeug- bzw. Bauteildicke nicht immer gegeben ist. Auf Basis der vorgestellten Simulationsergebnisse kann nachgewiesen werden, dass die virtuellen Untersuchungen den Injektionsprozess sehr gut abbilden können. Für zukünftige Befähigungsprozesse wird die Prozesssimulation deshalb als geeignetes Mittel zur Validierung des Injektionsprozesses lokal verstärkter Halbzeuge im RTM-Verfahren bestätigt, ist aber vor dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Vereinfachungs- und Effizienzsteigerungsmöglichkeiten weiter zu beleuchten.

5.5 Prozessdaten der Laminat- und Bauteilherstellung

5.5.1 Vorgehensweise

Zusätzlich zu den vorgestellten Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Versuchsparameter auf den Injektionsvorgang anhand der Prozessdaten des Imprägniervorgangs im Nasspress- und RTM-Verfahren analysiert.

Im Rahmen der Prozessdatenanalyse werden zunächst die Massenströme selektierter Injektionsverläufe am Glasplattenwerkzeug ausgewertet und einander gegenübergestellt. Die dafür erforderliche Datenermittlung erfolgt durch Aufzeichnung der Injektionsmasse mit einer Frequenz von 1 Hz anhand einer Waage des Typs MS 16001L/01 der Firma Mettler Toledo. Darüber hinaus werden Schließkraftprofile im Rahmen der FFV ermittelt und anhand der Software testXpert II aufgezeichnet. In den vorliegenden Analysen erfolgt eine Gegenüberstellung dieser Daten.

5.5.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Wie angeführt, werden die Prozessdaten der FFV zur Charakterisierung der Variationsparameter herangezogen. Während bei sämtlichen Versuchen die in Abbildung 5.25 dargestellten Prozessdaten aufgezeichnet werden, erfolgen im Rahmen dieser Versuche Gegenüberstellungen hinsichtlich des Verlaufs der injizierten Massen über die Prozesszeit.

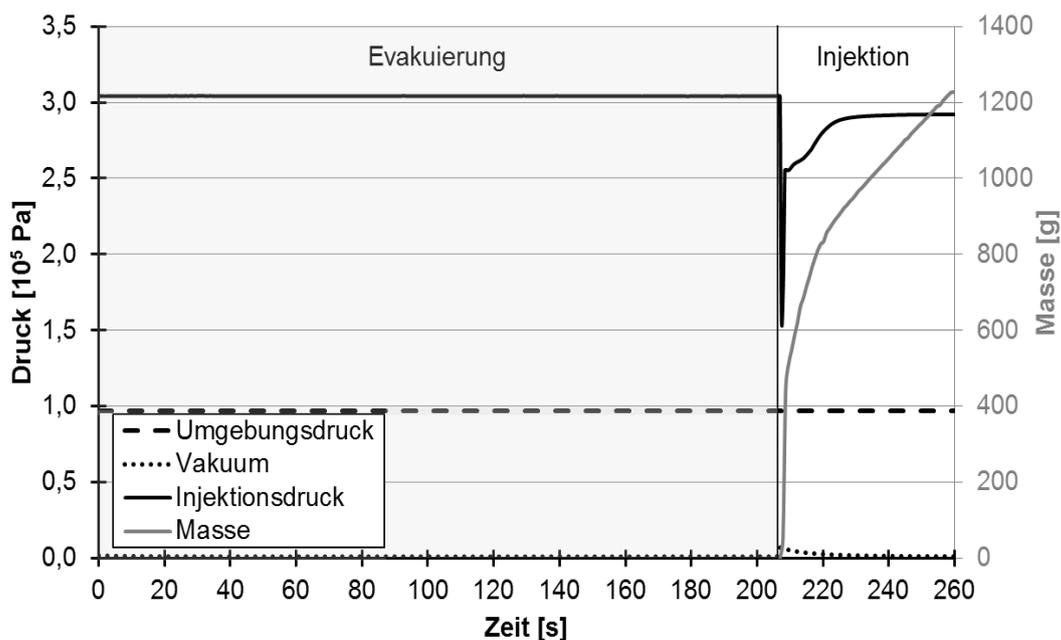


Abbildung 5.25: Prozessdaten aus den Untersuchungen zur Fließfrontvisualisierung

Während der Injektionsdruck von $3 \cdot 10^5$ Pa, der Umgebungsdruck von circa $1 \cdot 10^5$ Pa und der Vakuumdruck von circa $1,5 \cdot 10^3$ Pa für die Versuche annähernd konstant sind, resultiert der Verlauf des Massenstroms aus den Variationsparametern der Halbzeug- und Werkzeuggestaltung. Um den Einfluss der Gestaltung des Wanddickenübergangs auf den Verlauf der Injektionsmasse zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.26 der Mittelwert der Injektionsmassen von jeweils drei Wiederholungsmessungen der Varianten $90^\circ/0^\circ$ außenliegend ungeschäftet und $90^\circ/0^\circ$ außenliegend geschäftet bei Injektion über einen zentralen Linienangusskanal gegenübergestellt. Je Messwert ist dabei jeweils die Standardabweichung positiv und negativ angetragen. Wie dargestellt, erfolgt im Fall des geschäfteten Wanddickenübergangs die Injektion über einen deutlich flacheren Massenstromverlauf, als im ungeschäfteten Fall. Grund hierfür ist, wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten angemerkt, die partielle Verprägung des Textils im geschäfteten WDÜ. Im ungeschäfteten Fall erfolgt dagegen keine Kompaktierung im Übergang und somit ist der Fließwiderstand deutlich geringer. Abbildung 5.26 zeigt eine Art Homogenisierung von Wiederholungsversuchen hinsichtlich der Injektionsmassenverläufe bei geschäfteten WDÜ. Während sowohl im ungeschäfteten, als auch im geschäfteten Fall die textilen Halbzeuge reproduzierbar positioniert wurden, weisen die Versuche an Halbzeugen mit geschäftetem Wanddickenübergang deutlich geringere Standardabweichung auf, als die mit ungeschäftetem Wanddickenübergang. Diese Tatsache ist insbesondere für die Großserie von großer Bedeutung, da großer Wert auf eine maximale Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit der Infiltration gelegt werden muss.

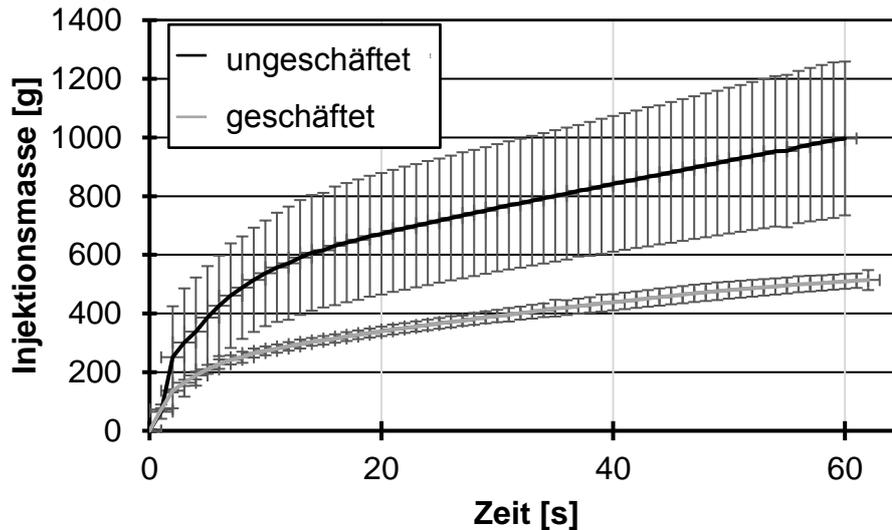


Abbildung 5.26: Massenstrom bei geschäftetem und ungeschäftetem Wanddickenübergang und zentral auf der lokalen Verstärkung befindlichem Verteilerkanal (Variante $90^\circ/0^\circ$)

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Faserorientierung auf den Injektionsmassenstrom beziehungsweise den Injektionswiderstand sind in Abbildung 5.27 der Injektionsstrom der außenliegenden, geschäfteten Halbzeugvariante mit $90^\circ/0^\circ$ - und $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung bei Injektion über einen linienförmigen, zentralen Angusskanal gegenübergestellt. Auch in dieser Abbildung sind für jeden Zeitschritt der Mittelwert und die Standardabweichung aufgetragen. Zwar wirkt sich die Faserorientierung nicht so stark auf den Injektionsmassenverlauf aus, wie die Gestaltung des WDÜ, jedoch ist in untenstehender Darstellung zu erkennen, dass bei der vorliegenden Prozessgestaltung die Injektionsmassen bei $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierung höher liegen, als bei der $90^\circ/90^\circ$ -Variante.

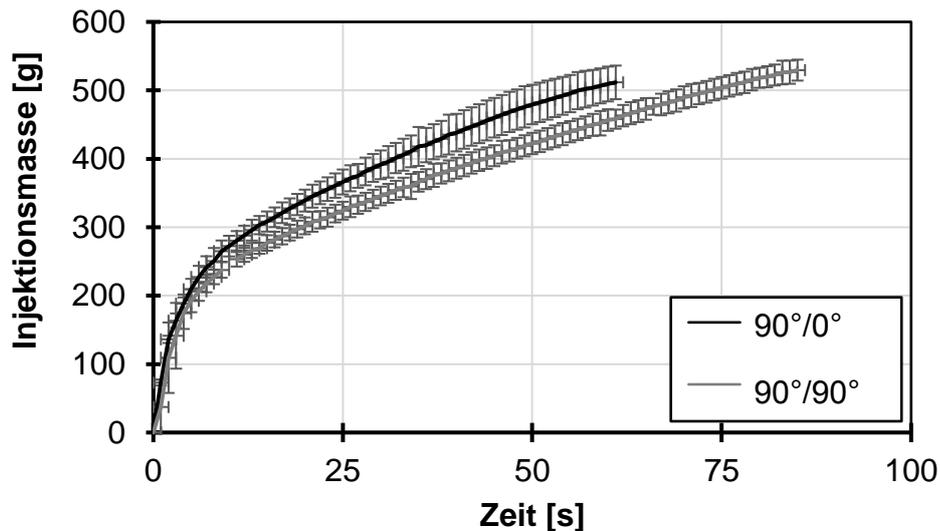


Abbildung 5.27: Massenströme bei 90°/0°- und 90°/90°-Faserorientierung in der LV bei zentral liegendem Verteilerkanal

Grund hierfür ist der Faserverlauf der 90°/0°-Variante, was zu Fließkanälen parallel zur Fluidflussrichtung und somit zu einer hohen K_1 -Permeabilität entlang der Fließfrontprogression aus der LV heraus führt. Bei der 90°/90°-Variante liegen die Verstärkungsfasern dagegen senkrecht zur Fließrichtung (K_2 -Permeabilität) und führen dadurch zu einer vergleichsweise langsameren Injektion bei druckgesteuertem Eintrag des Injektionsmediums.

Während die geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs zu deutlichen Vorteilen hinsichtlich der tolerierbaren Positionsgenauigkeit und der Gleichmäßigkeit der Fließfrontprogression führt, sind in Abbildung 5.28 exemplarisch die Schließkraftprofile anhand textiler Halbzeuge der Variante 90°/90° ungeschäftet und geschäftet aus den Versuchen der Fließfrontvisualisierung gegenübergestellt. Wie bereits in den oben angeführten Abbildungen sind wiederum Mittelwert und Standardabweichung aus drei durchgeführten Wiederholungsmessungen zu sehen. Wie bereits aus den geometrischen Gegebenheiten aus Abbildung 4.4 erwartet, führt die Gestaltung des WDÜ in geschäfteter Form am Beispiel der Kavität des Glasplattenwerkzeugs zu einer zusätzlich erforderlichen Schließkraft von bis zu 10 kN (Maximalkraft geschäftet: ca. 125 kN; Maximalkraft ungeschäftet: ca. 115 kN).

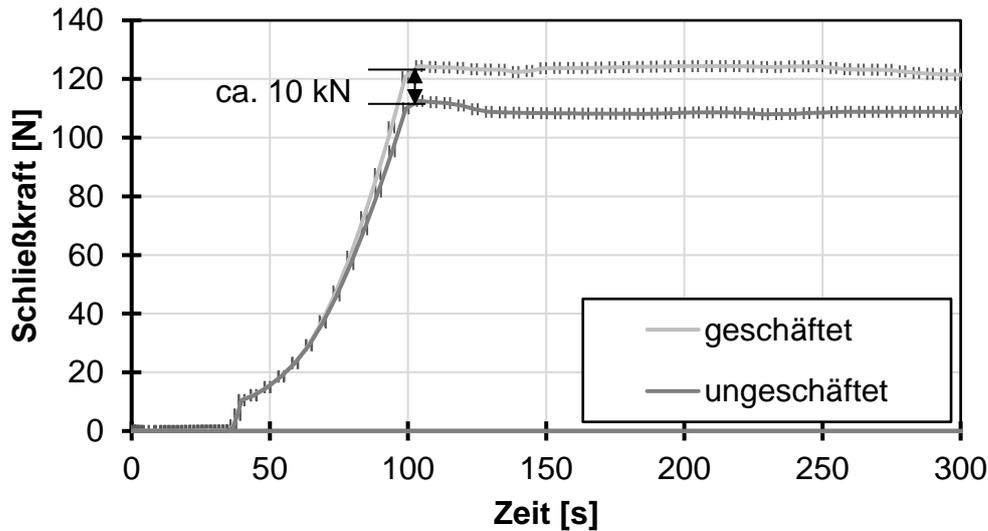


Abbildung 5.28: Gegenüberstellung der Schließkraftverläufe eines ungeschäfteten und geschäfteten WDÜ anhand 90°/90° verstärkter textiler Halbzeuge

Sehr ähnlich zeigt sich der Schließkraftverlauf bei den 90°/0°-Verstärkungsvarianten, die in Anhang 9 aufgeführt sind. Dies kann bei großflächigen Bauteilen dazu führen, dass Pressen mit höheren Schließkräften für den Imprägnierprozess einzusetzen sind. Zur Erlangung einer prozesssicheren Fließfrontprogression auf Basis der oben aufgeführten Erkenntnisse ist dies für die Serienfertigung dennoch unbedingt zu empfehlen.

5.5.3 Fazit

Die Einflüsse relevanter Parameter auf das Imprägnierverhalten werden anhand der vorgestellten Untersuchungen dargestellt. So ist der Einfluss der Gestaltung des Wanddickenübergangs sowohl auf die Schließkräfte, als auch auf den Injektionsmassenstrom in den aufgeführten Ergebnissen klar ausgewiesen. Ein geschäfteter Wanddickenübergang führt aufgrund der lokalen Verprägung des textilen Werkstoffs sowohl zu erhöhten Schließkräften, als auch zu einem geringeren Injektionsmassenstrom. Grund dafür ist eine Reduzierung der Permeabilität aufgrund der mit der Schäftung verbundenen Erhöhung des Faservolumengehalts im Wanddickenübergang. Dafür kann aber insbesondere bezüglich des Injektionsmassenstroms bei 90°/0° verstärkten Bauteilen durch diese Art der WDÜ-Gestaltung eine deutliche Homogenisierung und Vereinheitlichung von Wiederholungsversuchen erreicht werden. Darüber hinaus zeigt sich in den Prozessdaten der Einfluss der Faserorientierung in den lokalen Verstär-

kungslagen bei einem zentral auf dem Verstärkungstreifen befindlichen Angussverteilerkanal. Wie in Kapitel 5.2 dargestellt, führen Faserorientierungen zu einer anisotropen Permeabilitätsverteilung und beeinflussen damit die resultierenden Injektionsmassenströme. Faserorientierungen entlang der Fließfrontausbreitungsrichtung ($90^\circ/0^\circ$) führen aufgrund deren Struktur mit Gassen in Fließfrontrichtung zu höheren Injektionsmassenströmen im Vergleich zu $90^\circ/90^\circ$ verstärkten Halbzeugen. Die Einflüsse anderer Parameter sind dagegen nicht klar über die Prozessdaten zu verifizieren. Die Auswirkungen der Position lokaler Verstärkungslagen innerhalb des Lagenaufbaus sind offenbar zu gering, als dass sie im Rahmen der durchgeführten Analysen nachgewiesen hätten werden können. Aufgrund von überlagerten Schwankungen in den verwendeten Ausgangswerkstoffen geht dieser Effekt unter, weshalb die Entscheidungsgrundlage für verschiedene andere Parameter wie die Position der Verstärkungslagen in z-Richtung nicht die Prozessdaten, sondern die in Kapitel 6 vorgestellte Laminatanalyse, oder die mechanischen Eigenschaften sein können.

5.6 Teilfüllungen

5.6.1 Vorgehensweise

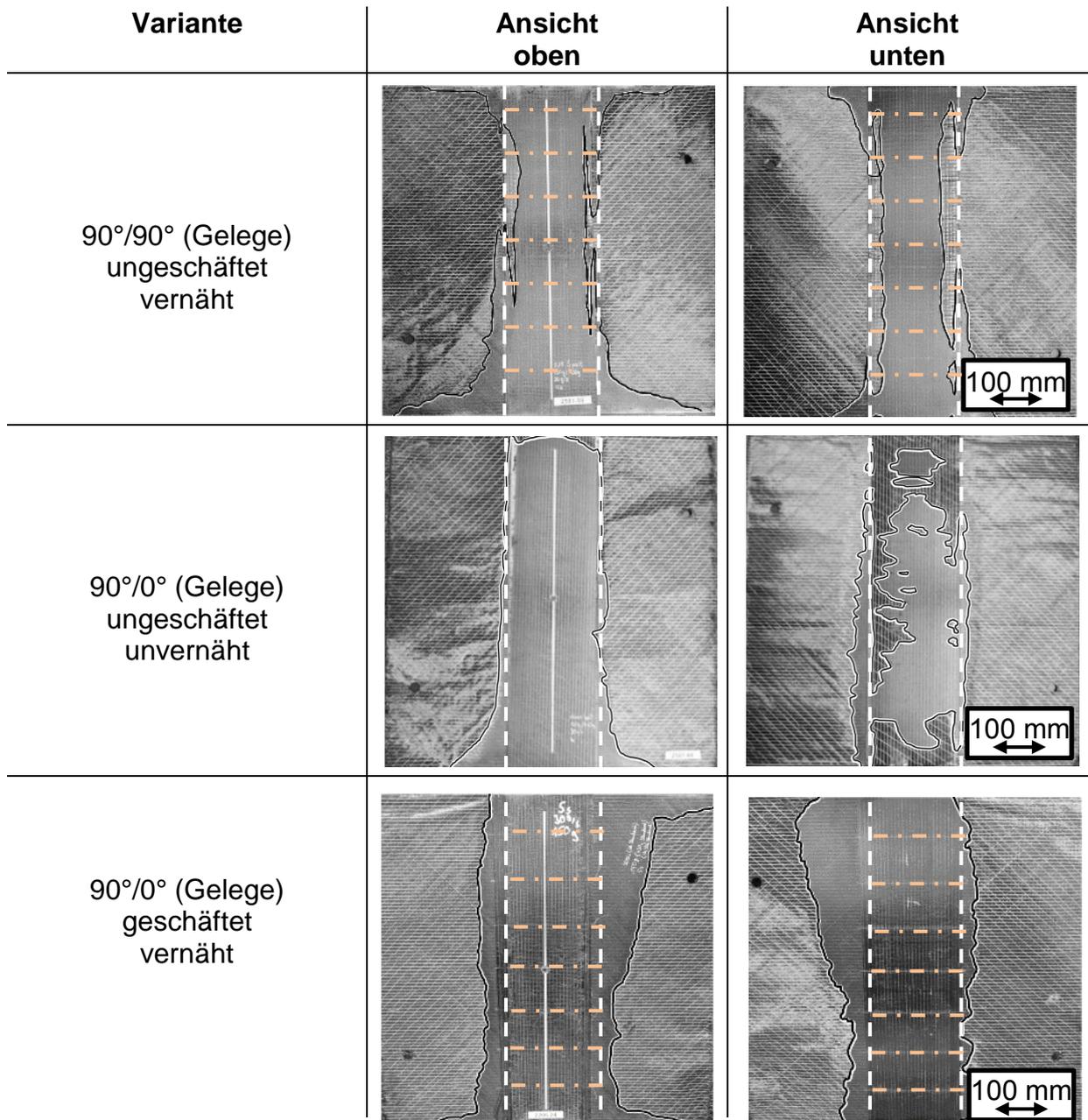
Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der FFV und der Simulation auf den Harzinjektionsprozess darzustellen, werden in diesem Abschnitt ausgewählte Ergebnisse der oben betrachteten Parametervarianten als sogenannte Teilfüllungen/Füllstudien aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren (HD-RTM-Verfahren) vorgestellt.

Zur Validierung der bislang vorgestellten Erkenntnisse werden partiell gefüllte Lamine mit identischem Lagenaufbau und identischer Geometrie hergestellt. Analog der Laminat- und Bauteilherstellung zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften erfolgt zur Herstellung von Teilfüllungen die Injektion des Textils mit einem großserientauglichen Harzsystem der Firma Hexion. Dies setzt sich aus den drei Komponenten Harz: EPIKOTE™ Resin 04695-1, Härter: EPIKURE™ Curing Agent 05357 und dem internen Trennmittel: HELOXY™ Additive 112 zusammen. Beim Injektionsprozess wird analog der FFV mit einem maximalen Volumenstrom von 30 g/s injiziert. Zur Visualisierung der Fließfrontposition zum relevanten Zeitpunkt wird die Injektion nach einer gewissen Zeit und einer injizierten Matrix-Masse gestoppt.

Bei den in diesem Abschnitt vorgestellten Teilfüllungen erfolgt die Prozessführung ohne Injektionsspalt, um zur FFV und Simulation identische Parameter zu gewährleisten. So wird vor der Injektion des Matrixwerkstoffs die Kavität auf die finale Bauteilwanddicke geschlossen und eine Evakuierung auf einen Druck von circa 10 kPa in der Kavität vorgenommen. Anschließend werden für die Teilfüllungen im Vergleich zur Prüfplattenherstellung reduzierte Mengen (25 %, 50 % und 75 %) Harz-Härter-Trennmittel in die Kavität eingebracht und das duomere Matrixmaterial bei einer Temperatur von 120 °C ausgehärtet. Durch die auf diese Weise hergestellten, teilgefüllten Laminat können Rückschlüsse auf den Fließfrontverlauf im HD-RTM-Verfahren gezogen und mit den in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Ergebnissen verglichen werden. Um einen fundierten Brückenschlag zwischen den vorgelagerten Versuchen und der Laminat- und Bauteillherstellung zu erlangen, werden zur statistischen Absicherung sämtliche vorgestellten Varianten mit jeweils drei Wiederholungen abgeprüft.

5.6.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Bei den Teilfüllungen der verschiedenen vorgestellten Parameterkonstellationen stellen sich die Fließbilder in guter Übereinstimmung mit der FFV und der Simulation des Injektionsprozesses dar. Wie in Abbildung 5.13 aufgeführt, erfolgt die Fließfrontprogression bei sämtlichen 90°/90°-Laminaten (Verstärkungslage innen- und außenliegend) mit geschäftetem und auch ungeschäftetem Übergangsbereich sowohl auf der Ober-, als auch auf der Unterseite vom Anguss ausgehend aus dem Verstärkungsbereich heraus in Richtung Grundlaminat. Dabei sind an den Teilfüllungen am oberen und unteren Rand der Kavität Bereiche mit voreilendem Harz zu sehen, die jedoch nicht auf dem Einfluss lokaler Verstärkungen, sondern auf der Gestaltung des Klemmbereichs im Hochdruck-RTM-Werkzeug beruhen und dementsprechend für die vorliegenden Analysen eine untergeordnete Rolle spielen. Was der ersten Darstellung in Abbildung 5.29 zusätzlich entnommen werden kann, ist der bereits aufgeführte, untergeordnete Einfluss der Fixierungsnähte, welcher in der repräsentativen Teilfüllung weder auf der Laminatoberseite, noch auf der Unterseite zum Tragen kommt.



 Fließfrontposition
  Wanddickenübergang
  Fixierungsnähte

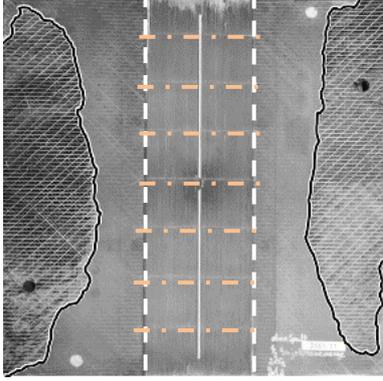
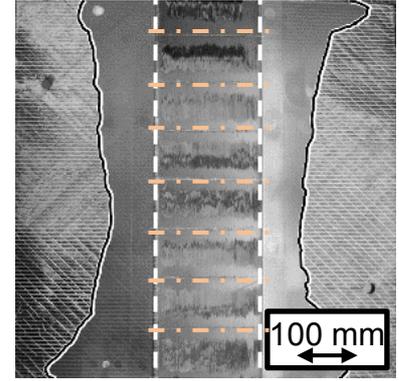
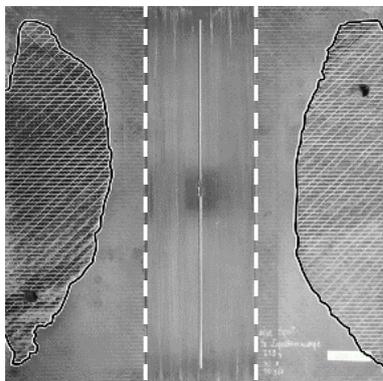
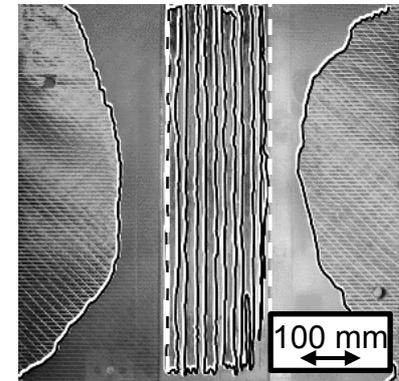
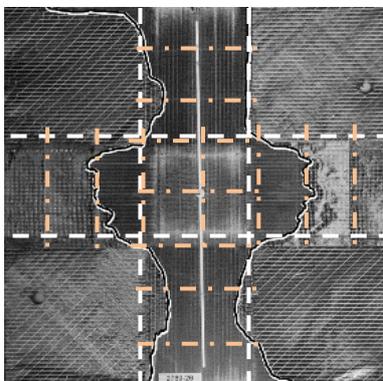
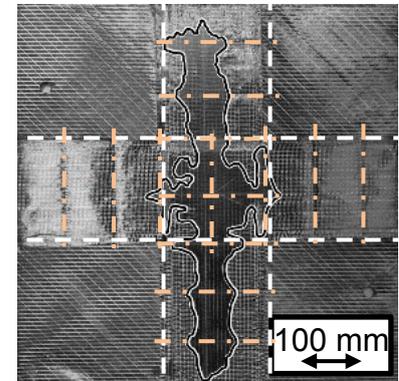
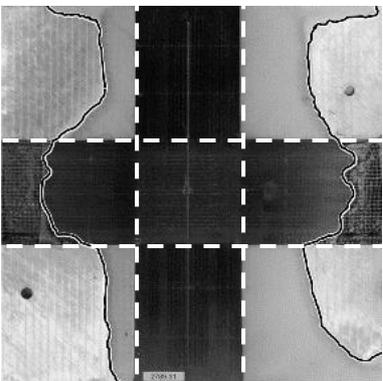
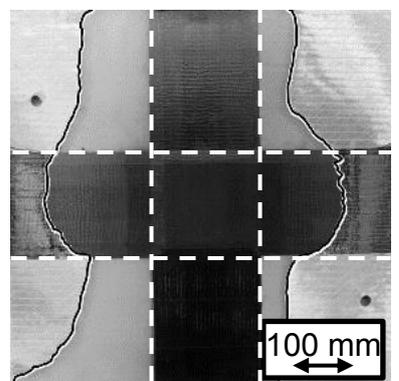
Abbildung 5.29: Teilfüllungen aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren:
Basisuntersuchungen

Bei der Variante 90°/0° außenliegend mit ungeschäftetem Übergang bestätigt sich das Bild des komplexen Fließfrontverlaufs, der auf der Unterseite des Halbzeugs zu großflächigen Lufteinschlüssen und zu Poren im Laminat beziehungsweise Bauteil insbesondere im lokal verstärkten Bereich führt. Analog der FFV ist auch an den Teilfüllungen das vorzeitige Durchdringen des Matrixwerkstoffs am unverstärkten Grundlaminat zu erkennen. Zwar zeigt sich dies bei den Teilfüllungen weniger ausgeprägt als im

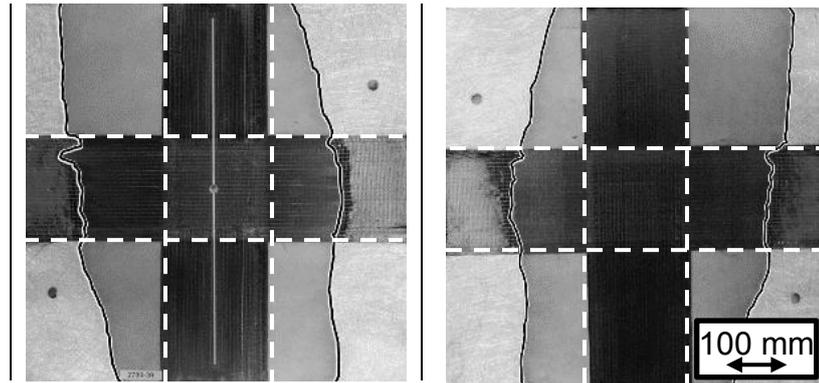
Rahmen der FFV, jedoch ist das beobachtete Füllverhalten mit einem frühzeitigen Imprägnieren im Wanddickenübergang und den resultierenden Lufteinschlüssen im Verstärkungsbereich durchaus auch anhand der Teilfüllungen zu erkennen.

Dass im Fall des geschäfteten Übergangs bei Variante 90°/0° die Fließfrontentwicklung auch im Harzinjektionsverfahren analog der FFV gleichmäßig erfolgt, ist anhand Abbildung 5.29 ebenfalls zu erkennen. So zeigt sich auch in diesem Fall ein derart gleichmäßiges Füllverhalten, dass keine Gefahr von Lufteinschlüssen und Poren im Bauteil besteht. Eine Verstärkungsvariante, welche unter anderem aufgrund der Inhomogenität durch die Vernähung nicht injiziert werden kann, ist die bereits anhand der Fließfrontvisualisierung ausgeschlossene lokale Verstärkung flächiger Kohlenstofffasergelege mit lokalen Faserdirektablagewerkstoffen. Aufgrund starker Inhomogenitäten der Fließfront durch unterschiedliche Permeabilitäten (siehe Kap. 5.2.2 und 5.3.3) kommt es zu zahlreichen Lufteinschlüssen in den Nahtzwischenbereichen, wie in Abbildung 5.30 zu sehen ist. Dies verhindert eine prozesssichere Injektion.

Was zudem aus Abbildung 5.13 ersichtlich wird, sind sehr gleichmäßige Fließfrontbilder bei der Injektion textiler Halbzeuge mit sich kreuzenden lokalen Verstärkungslagen unter geschäfteten Wanddickenübergängen. Sowohl rein aus Kohlenstofffasern bestehende Halbzeuge, als auch Hybridbauten aus Glasgelegen und Glasfasermatten als Grundlage und Kohlenstofffasergelege als lokale Verstärkungen lassen sich prozesssicher injizieren. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 (Permeabilität) und 5.3.3 (Fließfrontvisualisierung) dargestellt, sind die Permeabilitätsverhältnisse der jeweiligen Werkstoffe auch in den Teilfüllungen zu erkennen. Während die Fließfront bei einem reinen Kohlenstofffasergelegeaufbau in der lokalen Verstärkungslage verhältnismäßig stark vorströmt (aufgrund K_1 in Fluidflussrichtung), ist dies beim Glasgelege-Hybrid-Aufbau mit höherer Grundlaminatpermeabilität weniger der Fall. Beim Aufbau aus Glaswirrfasertextil im GL zeichnet sich ein Voreilen in der unidirektionalen LV aufgrund einer hohen Permeabilität im Grundlaminat am geringsten ab. Die Imprägnierung erfolgt bei den analysierten Parametern sehr gleichmäßig, was den bereits aus der FFV erwarteten gleichmäßigen Fließfrontverlauf auch anhand der Analysen am HD-RTM-Prozess bestätigt.

Variante	Ansicht oben	Ansicht unten
<p>90°/90° (FDA-Material) ungeschäftet vernäht ohne Gassen</p>		
<p>90°/90° (FDA-Werkstoff) ungeschäftet unvernäht mit Gassen</p>		
<p>90°/90° und 0°/0° (Gelege-Gelege) Kreuzgurte geschäftet vernäht</p>		
<p>90°/90° und 0°/0° (K-Gelege-Glasgelege) Kreuzgurte geschäftet unvernäht</p>		

90°/90° und 0°/0°
(K-Gelege-Glaswarr)
Kreuzgurte
geschäftet
unvernäht



— Fließfrontposition (Übergangsbereich imprägniert – trocken)

▬ Wanddickenübergang - - - - - Fixierungsnähte

Abbildung 5.30: Teilfüllungen aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren;
Untersuchungen Alternativwerkstoffe

So bestätigen die Teilfüllungen das auf Basis der vorgelagerten Untersuchungen basierende Bild der Variationsparameter, dass FDA-Werkstoffe nicht prozesssicher imprägniert werden können, sämtliche textilen Halbzeuge mit anderen Variationsparametern dagegen unter Berücksichtigung werkzeug- und prozesseitiger Anforderungen gut imprägnierbar sind.

5.6.3 Fazit

Die Erwartungen aus den vorgelagerten Versuchen konnten im Rahmen der Teilfüllungen durchwegs bestätigt werden. So ist der positive Einfluss eines geschäfteten Wanddickenübergangs bei der Halbzeugvariante mit 90°/0° Faserorientierung analog den Fließfrontvisualisierungsergebnissen auch an den Teilfüllungen zu sehen. Die Vermutung, dass die textilen Halbzeuge mit lokalen Verstärkungslagen aus FDA-Werkstoffen nicht injiziert werden können, muss anhand der Teilfüllungen ebenso bestätigt werden. Die Erkenntnis, dass die Halbzeuge mit Glasgelegen und Glasfaser-matten als Grundlaminatwerkstoff insbesondere mit den dargestellten geschäfteten Wanddickenübergängen auch bei sich kreuzenden Gurten analog den reinen Kohlenstofffaserhalbzeugen prozesssicher imprägniert werden können, konnte zudem bestätigt werden.

6 Laminatanalyse

Um die Ergebnisse der vorgelagerten Versuche auf den HD-RTM- und Nasspressprozess übertragen zu können, den Einfluss verschiedener Parameter der Halbzeug- und Werkzeuggestaltung auf die Qualität und auf die mechanischen Eigenschaften zu ermöglichen sowie einen Vergleich zwischen Struktursimulation und mechanischen Versuchen durchführen zu können, werden Lamine mit lokalen Verstärkungen im RTM- und Nasspressverfahren hergestellt und analysiert. Da im Rahmen der Prozessanalyse bereits eine Herstellung lokal verstärkter Bauteile mit Kohlenstofffasergelegen als Grundlaminat und FDA-Werkstoffen als lokale Verstärkungen ausgeschieden ist, wird in diesem Abschnitt nicht weiter darauf eingegangen.

Zur Bewertung der Laminatqualität wird eine optische Makrobewertung, eine Schnitt- und partiell eine Schlifffbildanalyse herangezogen, damit die Unterschiede der Varianten in Bezug auf ihre Qualität und die mechanischen Eigenschaften möglichst strukturiert erfasst und charakteristische Merkmale der Variationsparameter identifiziert werden können. Über diese Vorgehensweise wird einerseits ein Gesamteindruck über die Plattenvarianten gewonnen, andererseits aber auch detaillierte Informationen über die einzelnen Lamine im Bereich der ausgewählten Prüfkörperentnahmestellen generiert. Die im Rahmen der makroskopischen Laminatbewertung beleuchteten Kriterien sind:

- Oberflächenqualität des Laminats
- Existenz von Lufteinschlüssen im Grundlaminat
- Existenz von Lufteinschlüssen im Bereich der lokalen Verstärkung
- Existenz von Fehlstellen im Wanddickenübergang
- Positionstreuung der lokalen Verstärkungslagen
- Laminatqualität im Angussbereich
- Harzreaktionskerben (Schwundmarken) im Bereich der lokalen Verstärkung

Auf Basis dieser Kriterien wird eine progressiv gewichtete Punktbewertung (1, 3 und 6) durchgeführt, deren Ergebnisse in Anhang 10 aufgeführt sind. Auf Basis der dort dargestellten Tabelle lässt sich festhalten, dass innenliegende LV mit durchschnittlich 37 Punkten eine bessere Laminatqualität an der Oberfläche aufweisen, als Lamine mit außenliegenden Verstärkungslagen. Ebenso weisen Lamine mit geschäfteten und ungeschäfteten WDÜ eine annähernd gleiche Qualität an der Oberfläche auf. Lamine mit geschäfteten WDÜ weisen dabei durchschnittlich 35 Zähler und die mit un-

geschäfteten Übergängen 36 Zähler auf. Als weiteres Ergebnis lässt sich aus den Ergebnissen der Makrobewertung ableiten, dass die Imprägnierung von $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslagen mit 38 Zählern zu einer höheren Laminatqualität führt, als eine Imprägnierung von $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungslagen (36 Punkte). Ebenso ist in der aufgeführten Tabelle zu sehen, dass Lamine, deren lokale Verstärkungen über Binder im Vergleich zu Vernähungen (37 Punkte) fixiert sind, eine schlechtere Qualität aufweisen (35 Punkte). Dabei stellen Lamine mit Quernähten im Abstand von 65 mm zueinander mit 37 Punkten die beste Variante dar.

Entsprechend diesen Auswertungen lässt sich konstatieren, dass eine Fixierung der lokalen Verstärkungen durch Vernähungen die Qualität der Lamine insbesondere hinsichtlich der Fixierung erhöht. Außerdem führen innenliegende Verstärkungslagen zu besseren Ergebnissen, als außenliegende Lagen. Während die WDÜ-Gestaltung einen untergeordneten Einfluss auf die Oberflächenqualität hat, führen LV mit $90^\circ/0^\circ$ - im Vergleich zu $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen zu einer höheren Qualität des Laminats.

6.1 Schnitt- und Schliffbilder

Basierend auf den Erkenntnissen aus der optischen Makrobewertung werden Schnitt- und Schliffbilder sowohl an Laminaten und Bauteilen aus dem RTM-, als auch aus dem Nasspressverfahren erstellt. Ziel dieser Untersuchungen ist eine fundierte Bewertung der Laminatqualität. So sollen sowohl die Einflüsse der verschiedenen Variationsparameter auf die Qualität beleuchtet, als auch eine gute Qualität der Lamine im Bereich der Probekörper für die mechanischen Prüfungen gewährleistet werden. Diese Schnitt- und Schliffbilder werden an den in Abbildung 6.1 gepunktet dargestellten Linien am Rand der Zug- und Biegeprüfkörperbereiche erstellt.

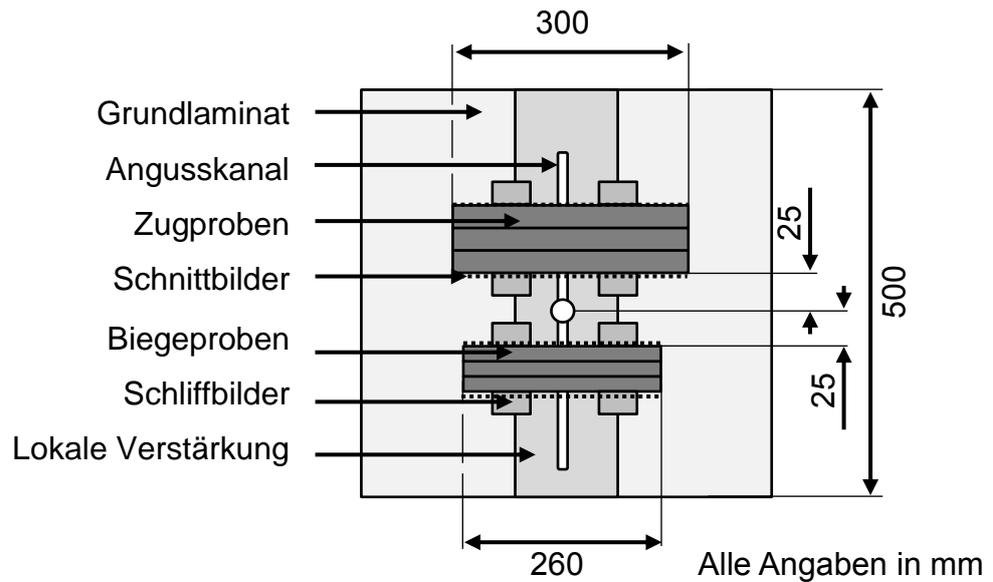


Abbildung 6.1: Probenentnahme zur Schnitt- und Schliffbildanalyse sowie für mechanische Prüfungen

Im Fokus der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen steht neben der lokal verstärkten Zone der für die Gestaltung von Bauteilen mit lokalen Verstärkungen relevante Bereich des Wanddickenübergangs. Dabei stehen Charakteristika wie die Ausbildung harzreicher Bereiche am Wanddickenübergang, der Porengehalt sowie die im WDÜ auftretenden Faserondulationen im Vordergrund. Bevor auf die Ergebnisse aus diesen Versuchen und deren Interpretation eingegangen werden kann, wird die Vorgehensweise zur Erstellung der Schnitt- und Schliffbilder vorgestellt.

6.1.1 Vorgehensweise

Die für die Biege- und Zugprüfungen sowie zur Schnitt- und Schliffbildererstellung verwendeten Prüfkörper werden mit einem Nasstrenner des Typs Brilliant 265 der Firma ATM GmbH, Mammelzen, Deutschland oder einer Wasserstrahlanlage des Typs WSS2020/1RWSK der Firma Perndorfer Maschinenbau KG, Kallham, Österreich aus den Laminaten geschnitten. Anschließend werden sie geschliffen und poliert, ehe sie photographisch erfasst und analysiert werden. Die Aufzeichnung der Schnittbilder erfolgt mit Hilfe eines sogenannten Makrostandes. Dieser besteht aus einer zwischen zwei Scheinwerfern positionierten Spiegelreflexkamera. Die über den Zoom der Kamera einstellbaren Auflösungs- und Aufzeichnungsbereiche ermöglichen einen Einblick in die Laminatqualität im Rahmen eines vergleichsweise großen Messbereichs von circa 40 mm pro Aufnahme.

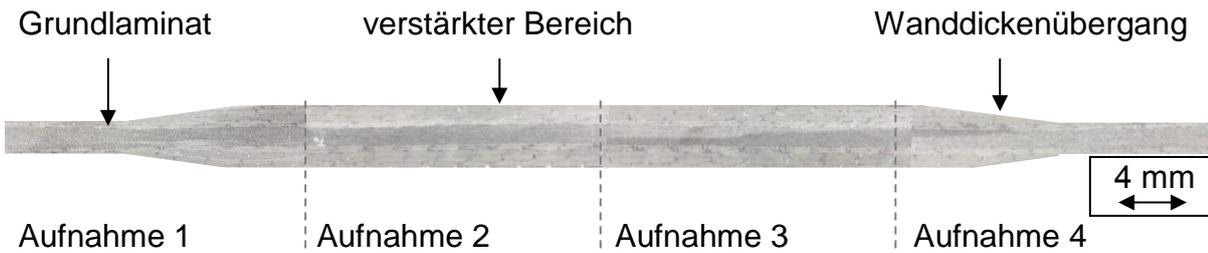


Abbildung 6.2: Einteilung der Schnittbildbereiche entlang eines Prüfkörpers der mechanischen Prüfung

In Abbildung 6.2 ist ein aus 4 Einzelaufnahmen aufgebautes Schnittbild zu erkennen, das einen Gesamtüberblick über die Laminatqualität im Bereich der lokalen Verstärkungslage gibt. Wie in Abbildung 6.1 aufgeführt, werden auf diese Weise je Platte im Bereich der Zug- und der Biegeprüfkörper Laminatuntersuchungen durchgeführt.

Was für die mechanischen Analysen und die entsprechenden Modelle zur Simulation der Struktur von Bedeutung ist und im Rahmen der Schnittbildanalyse ausgewertet wird, sind Faserumlenkungen, beziehungsweise Ondulationen der Grundlaminatfasern, die insbesondere bei innenliegenden LV gemäß Abbildung 6.3 auftreten.

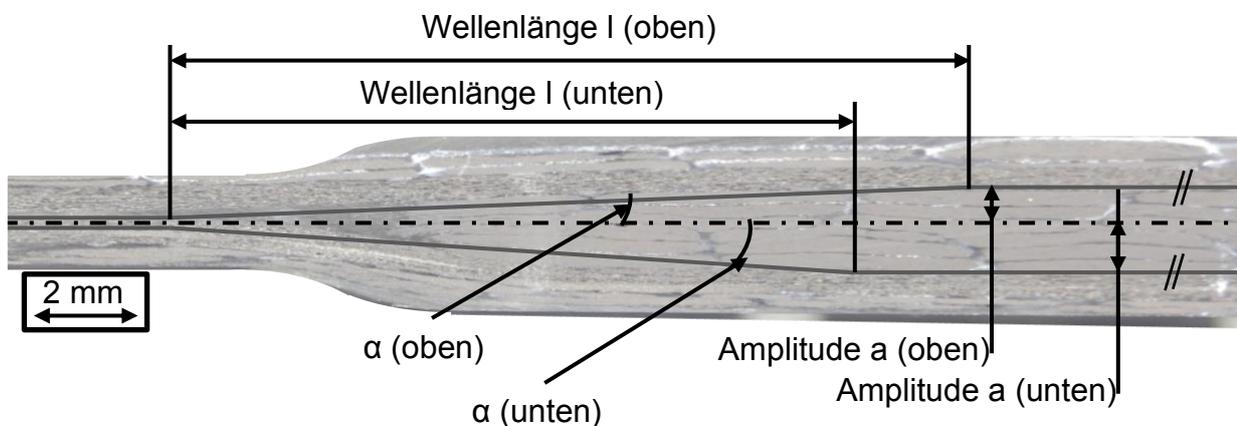


Abbildung 6.3: Charakterisierung von am WDÜ auftretenden Ondulationen

Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, werden anhand der Schnittbilder die Ondulationen der in 0° -Richtung orientierten Lagen des Grundlaminats an der Ober- und Unterseite des Wanddickenübergangs bestimmt. Dazu wird zunächst die Wellenlänge als horizontaler Abstand der in Plattenebene verlaufenden Verstärkungsfasern vor und nach dem WDÜ ermittelt. Zusätzlich wird die Amplitude als senkrechter Abstand zwischen der 0° -Grundlaminatlage vor und nach dem Wanddickenübergang detektiert, ehe sich

über den Tangenssatz der mittlere Ondulationswinkel für die Ober- und Unterseite ergibt.

$$\tan \alpha = \frac{\text{Ondulationsamplitude [mm]}}{\text{Ondulationswellenlänge [mm]}} \quad \text{Gleichung 6.1}$$

6.1.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Schnittbildanalyse an den verschiedenen Laminaten aus dem RTM-Verfahren diskutiert. Dabei zeigen die entsprechenden Lamine aus dem Nasspressverfahren durchwegs analoge Charakteristika.

Zunächst werden für die durchgeführten Untersuchungen repräsentative Ergebnisse aus der Betrachtung des Wanddickenübergangs der Varianten mit außen- und innenliegenden Verstärkungslagen, mit 90°/90°- und 90°/0°-Faserorientierungen sowie mit geschäftetem und ungeschäftetem WDÜ gegenübergestellt. Wie in Abbildung 6.4 zu sehen ist, bilden sich bei ungeschäfteten Wanddickenübergängen in der Übergangszone deutliche Reinharzbereiche aus, die mit einem Markierungskreis gekennzeichnet sind. Diese, ausschließlich den Matrixwerkstoff beinhaltenden Bereiche bilden sich bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit 90°/0° Faserorientierung an der Laminatoberfläche im Wanddickenübergang stärker aus, als bei 90°/90° Faserorientierungen. Grund dafür ist, dass sich die lokalen Verstärkungen mit 90°/90° während des Werkzeugschließ- und Injektionsprozesses besser an die Kavitätsgeometrie anschmiegen, als die senkrecht zum Wanddickenübergang orientierten 90°/0°-Verstärkungsfasern. Analoges Verhalten ist auch bei entsprechenden innenliegenden ungeschäfteten Varianten zu sehen. Während sich bei Verstärkungslagen in 90°/90° Richtung Reinharzbereiche geringerer Ausprägung bilden (siehe Abbildung 6.4), sind diese bei 90°/0° Faserorientierungen wiederum deutlich stärker ausgeprägt. Diese Reinharzbereiche sind aufgrund des in Kap. 5.3.3 und 5.6.2 dargestellten Einflusses auf den Injektionsprozess von großer Bedeutung für die Laminat- und Bauteilgestaltung mit lokalen Verstärkungen. Wie in der Literatur belegt, wirken Reinharzbereiche an genau der Stelle im Laminat als Schwachstellen, an der aufgrund der geometrischen Gegebenheiten ohnehin schon ein dreidimensionaler Spannungszustand vorliegt und hohe Belastungen herrschen.

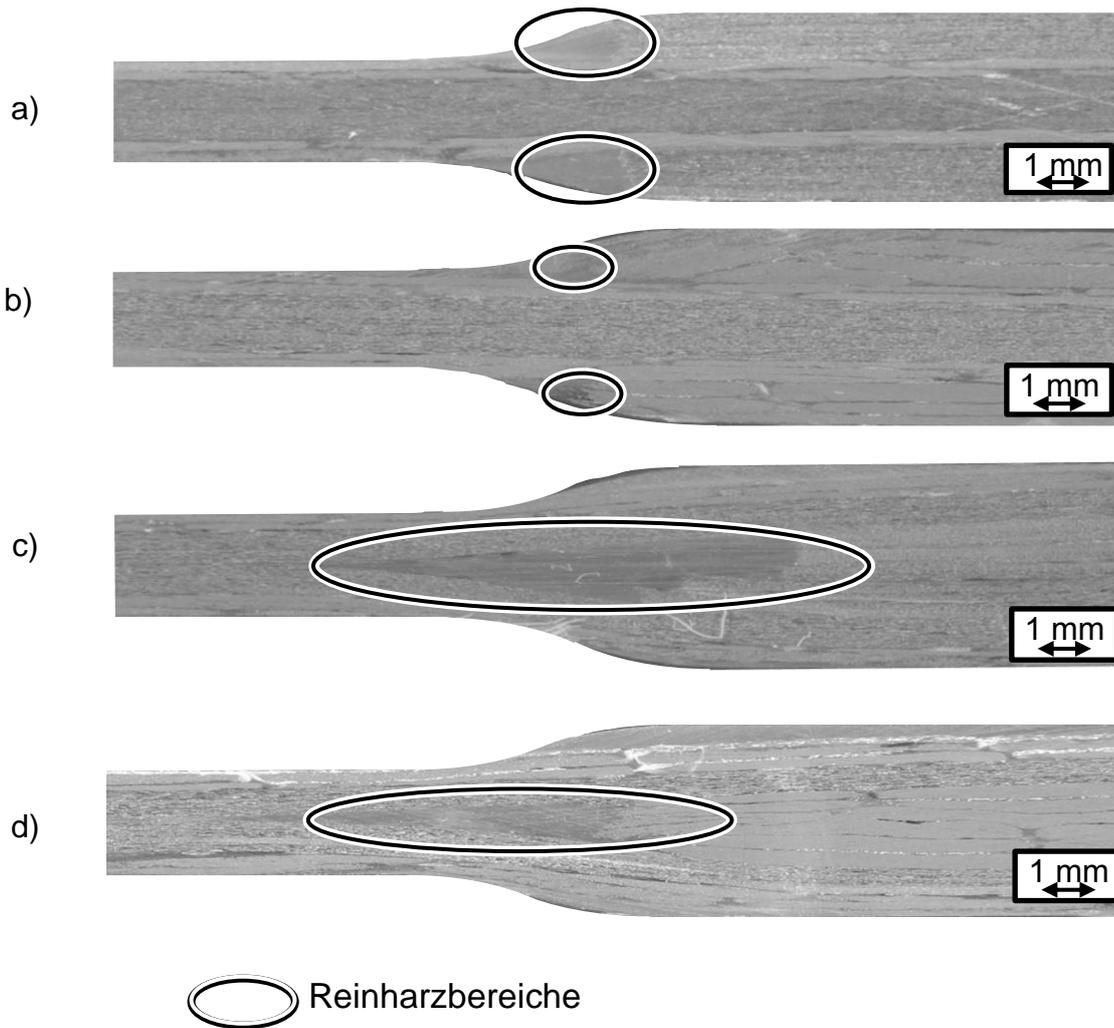


Abbildung 6.4: Schnittbilder lokal verstärkter Lamine mit ungeschäftetem Wanddickenübergang: 90°/0°-außenliegend (a), 90°/90°-außenliegend, (b) 90°/0°-innenliegend (c) und 90°/90°-innenliegend (d)

Während bei ungeschäfteten Varianten aufgrund gegebener Positionstoleranzen und des im Werkzeug erforderlichen, S-förmigen Wanddickenübergangs Reinharzbereiche im Laminat nicht zu vermeiden sind, ist dies bei der aufgeführten Gestaltung des geschäfteten Übergangs nicht der Fall. Durch die lineare Ausformung des WDÜ auf einer Breite von 18 mm und stufenförmig abgesetzten lokalen Verstärkungen (siehe Abbildung 4.4) kann die Ausbildung dieser Reinharzbereiche, insbesondere bei 90°/90°-Verstärkungslagen sowohl innen-, als auch außenliegend stark reduziert, beziehungsweise vollständig vermieden werden. Auch bei innenliegenden lokalen Verstärkungen mit 90°/0° Faserorientierungen bilden sich keine erkennbaren Reinharzbereiche aus.

Bei außenliegenden lokalen Verstärkungen sind zwar an den Enden der Textileinzel-lagen welche zu erkennen, diese sind jedoch aufgrund deren geometrischer Ausprägung gegenüber dem ungeschäfteten Übergang deutlich reduziert.

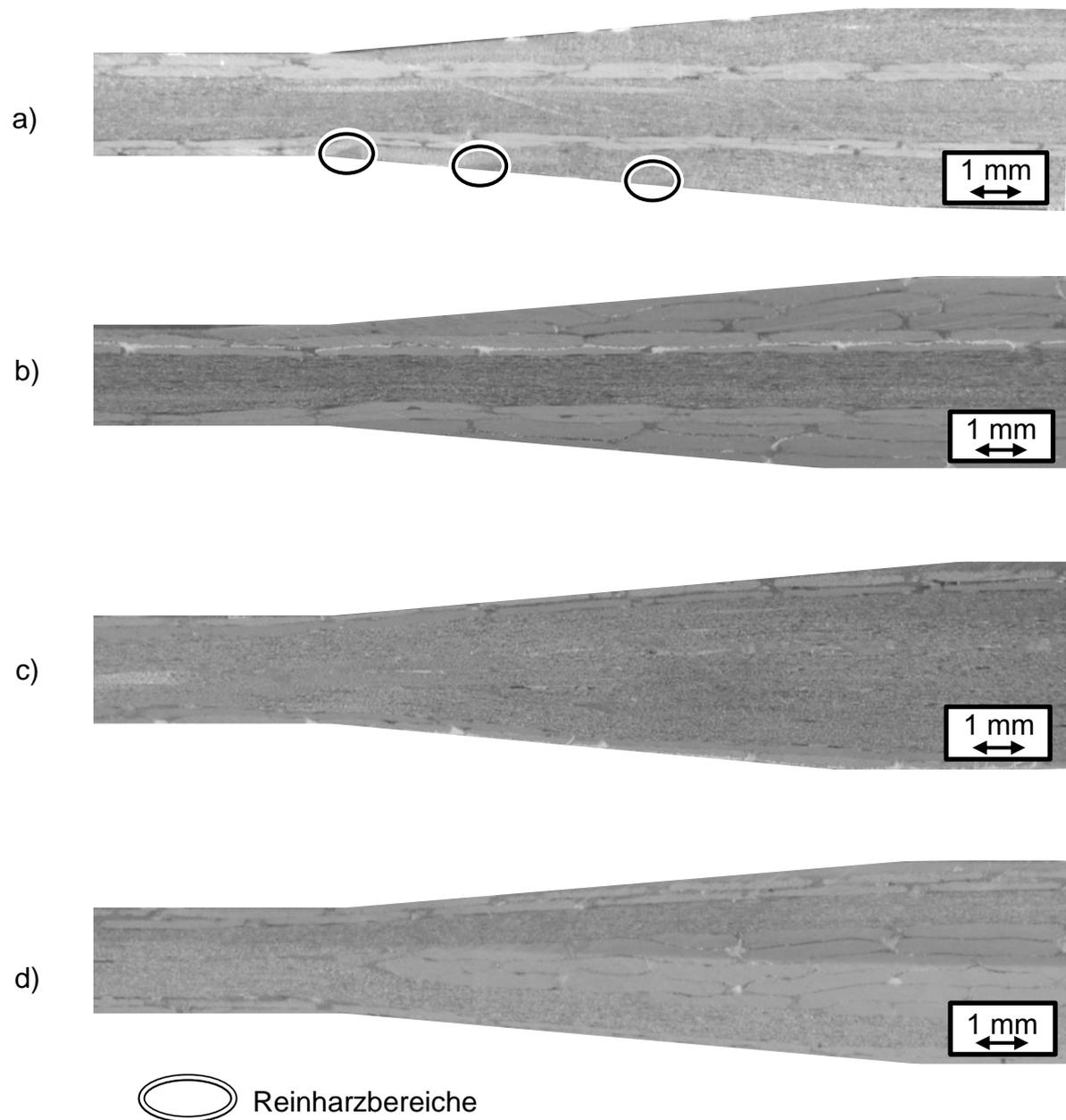


Abbildung 6.5: Schnittbilder lokal verstärkter Laminare mit geschäftetem Wanddickenübergang: $90^\circ/0^\circ$ -außenliegend (a), $90^\circ/90^\circ$ -außenliegend (b), $90^\circ/0^\circ$ -innenliegend (c) und $90^\circ/90^\circ$ -innenliegend (d)

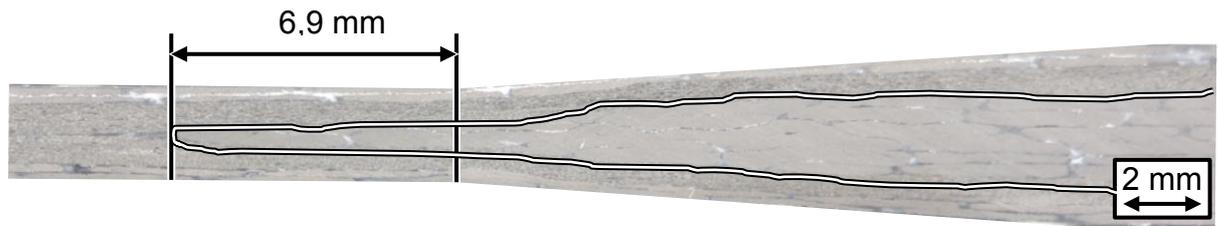
Zur Einordnung der verschiedenen Versuchsvarianten mit innenliegenden lokalen Verstärkungen hinsichtlich deren Ondulation werden wie beschrieben der Ondulationswinkel jeweils für die Ober- und Unterseite bestimmt. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 6.1 aufgeführt und werden anschließend interpretiert.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Ondulationswinkelbestimmung über Schnittbilder

Variante	Winkel oben	Winkel unten
90°/0° innen ungeschäftet	4,6	4,7
90°/90° innen ungeschäftet	3,3	4,3
90°/0° innen geschäftet	1,9	2,8
90°/90° innen geschäftet	2,2	2,7

Die Ondulation der Grundlaminatlagen, die oberhalb der lokalen Verstärkung ermittelt werden kann, ist grundsätzlich geringer, als diejenige unterhalb. Zusätzlich zu den bereits diskutierten Reinharzbereichen kann bei geschäfteten Übergängen auch die Ondulation der Grundlaminatlagen deutlich reduziert werden. Dies trägt, wie in der Literatur diskutiert, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei. Eine weitere Erkenntnis aus der Ondulationsbetrachtung ist, dass Lamine mit 90°/90°-Verstärkungslagen bei ungeschäftetem Übergang geringere Ondulationswinkel aufweisen, als jene mit 90°/0°-Verstärkungslagen. Wie bereits vorher bei den Reinharzbereichen angesprochen, wird auch hierfür die geringere Anpassung der Verstärkungslagen aufgrund deren Faserorientierung gesehen. Beim geschäfteten Übergang dagegen wirkt sich die Faserorientierung der lokalen Verstärkung ungleich geringer aus. So weisen Lamine der unterschiedlichen Faserorientierungen ähnliche Werte auf.

Ursache für die erwähnte höhere Ondulation an der Laminatunterseite ist die Prozessführung bei der Prüflaminatherstellung. Durch das Einbringen des Matrixwerkstoffs in die Kavität bei einem Injektionsspalt von 0,3 mm und anschließendem Schließvorgang der Kavität wirken einerseits durch den Injektionsprozess und andererseits durch den Komprimierungsvorgang (Compression-RTM) Kräfte auf das textile Halbzeug. Sie deformieren das Textil und führen zu einer Ondulationserhöhung an der Unterseite und zu einer Reduzierung an der Oberseite. Die geringeren Ondulationswinkel bei geschäfteten Wanddickenübergängen deuten auf fasergerechten, da gleichmäßigeren Wanddickenübergang hin.



= Position der lokalen Verstärkung

Abbildung 6.6: Schnittbild eines Laminats mit einer um 6,9 mm versetzten LV

Einen weiteren Vorteil eines geschäfteten Übergangs zeigt zudem Abbildung 6.6. In dieser Abbildung ist ein Schnittbild eines um 6,9 mm versetzt positionierten textilen Halbzeugs zu sehen. Bei diesem Laminat, bei dem es sich um die Variante $90^\circ/90^\circ$ innenliegend geschäftet handelt, sind trotz dieser Fehlpositionierung weder auf Schnitt-, noch auf Schliffebene Fehlermerkmale festzustellen. Die $90^\circ/90^\circ$ -Lagen der lokalen Verstärkungen passen sich dem Verlauf der Kavität gut an und sind somit zumindest bei einer ebenen Geometrie bis zu einem Versatz von mindestens 6 mm (maximaler FVG = 77 %) bei den gewählten Rahmenbedingungen und einem senkrecht auf das Textil erfolgenden Kavitätsschließvorgang imprägnierbar. Bei ungeschäftetem WDÜ dagegen würden aus derartigen Fehlpositionierungen bereits Trockenpressungen resultieren, die unmittelbar zu Ausschuss des Bauteils führen. Die entsprechenden FVG für ideal positionierte und fehlpositionierte Halbzeuge mit geschäftetem Wanddickenübergang sind in Anhang 11 als Ergebnis eines im Rahmen dieser Arbeit erstellten Faservolumengehaltstools aufgeführt.

Zur Auswertung von Auffälligkeiten aus den Schnittbildern in höherer Auflösung werden zusätzlich Schliffbilder aufgenommen. Die Proben zur Präparation der Schliffkörper werden an den in Abbildung 6.1 dargestellten Positionen entnommen. Um etwaige Auffälligkeiten aus den Schnittbildern an den Schliffbildern verifizieren zu können, werden die Positionen der Probekörper so gewählt, dass der Schnitt für die Proben der Schliffbild- und Schnittbildauswertung identisch ist.

Weil sich aus diesen Schliffbildern keine zusätzlichen Erkenntnisse für die Laminatqualität und die Einflüsse der verschiedenen Variationsparameter ergeben haben, werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit aufgeführt.

6.1.3 Fazit

Im Rahmen der in diesem Abschnitt vorgestellten Analysen konnte gezeigt werden, dass im HD-RTM-Verfahren und im Nasspressprozess lokal verstärkte Lamine über diverse Variationsparameter in guter Oberflächenqualität gefertigt werden können. Anhand der erstellten Schnitt- und Schliffbilder kann aber im Gegensatz zur optischen Makrobewertung ein deutlicher Unterschied zwischen den gefertigten Varianten insbesondere im Bereich des Wanddickenübergangs festgestellt werden. So führen sämtliche Aufbauten textiler Halbzeuge mit ungeschäftetem Wanddickenübergang zu Reinharzbereichen am Rand der lokalen Verstärkungen. Während sich bei außenliegenden lokalen Verstärkungslagen die Reinharzbereiche großflächiger ausprägen, führen bei innenliegenden lokalen Verstärkungen die ondulierten Grundlaminatlagen dazu, dass sich die Reinharzbereiche kleiner in der Fläche, jedoch sowohl an der Laminatoberfläche, als auch im Zentrum ausbilden. Während $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierungen in den lokalen Verstärkungen bei den betrachteten Fällen aufgrund deren geometrischer Gegebenheiten und geringerer Adaptierbarkeit zu großflächigeren Reinharzbereichen führen, ergeben sich bei $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen geringere Reinharzsektionen, was auf die höhere Flexibilität der Fasern in Querrichtung zur lokalen Verstärkung zurückgeführt wird. Im Fall der Halbzeuge mit $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungslagen verlagern sich die Fasern aufgrund diverser wirkender Kräfte an die Randzonen der Werkzeugtaschen. Dies führt zu verringerten Reinharzbereichen. Während bei ungeschäfteten Wanddickenübergängen selbst bei $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen harzreiche Zonen auftreten, ist es möglich, diese durch einen geschäfteten Wanddickenübergang großteils zu eliminieren. So sind bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierungen kleinflächige harzreiche Sektionen erkennbar, wohingegen sich bei innenliegenden Verstärkungslagen sowie bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung und geschäftetem Wanddickenübergang keinerlei Reinharzbereiche ausbilden.

6.2 Zugprüfungen

Zur Bewertung des Einflusses der verschiedenen Versuchsparameter auf die mechanischen Eigenschaften werden Ergebnisse von Zugversuchen nach einer Diskussion der Vorgehensweise und der Prüfparameter vorgestellt und interpretiert. Während im

Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf mechanische Prüfungen von Laminaten und Bauteilen mit WDÜ eingegangen wird, erfolgten auch Untersuchungen an Bauteilen ohne WDÜ und mit entsprechender Erhöhung des Faservolumengehalts im Bereich der lokalen Verstärkung. Auf die Ergebnisse der Versuche ohne Wanddickenübergang wird aufgrund der Tatsache, dass sie nicht zum Kern der vorliegenden Untersuchungen gehören nicht weiter eingegangen.

Bei den vorgestellten Versuchen werden ausschließlich mechanische Belastungen analysiert, welche senkrecht zur Orientierung der lokalen Verstärkung angeordnet sind. Die Untersuchungen werden auf diese Weise durchgeführt, da es Ziel der mechanischen Untersuchungen ist, die Charakteristika des Wanddickenübergangs zu spezifizieren, weniger jedoch die Lamine in Längsrichtung der lokalen Verstärkungen zu bewerten. Die Lamineigenschaften entlang der lokalen Verstärkung werden vielmehr anhand der klassischen Laminattheorie berechnet, beziehungsweise daraus abgeleitet. Ziel der mechanischen Prüfungen ist es, die Prüfkörper, geprägt durch verschiedene Variationsparameter, vergleichend gegenüberzustellen.

6.2.1 Vorgehensweise

Aufgrund der zu prüfenden Eigenschaften der Lamine in Querrichtung zur lokalen Verstärkung ergeben sich Abweichungen der Prüfungen von der Norm DIN EN ISO 527 1-4. Um die Rahmenbedingungen und das Prüfdesign zu erläutern, wird in diesem Abschnitt zunächst auf die Vorgehensweise hinsichtlich der gewählten Prüfparameter und die daraus resultierenden Abweichungen von den Normprüfungen eingegangen.

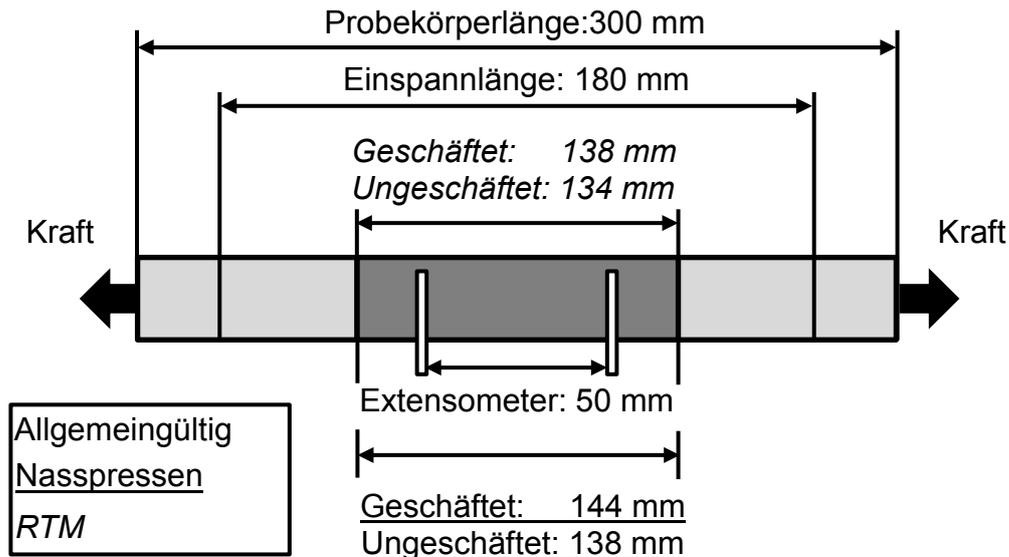


Abbildung 6.7: Parameter der Zugprüfung

Während die Querschnitte der Prüfkörper analog denjenigen aus den vorangegangenen Untersuchungen sind, können die Prüfkörpergeometrien Abbildung 6.7 entnommen werden. Es ist erforderlich von den Normabmessungen der DIN EN ISO 527 (250 mm Probekörperlänge, 136 mm Abstand der Einspannbacken) abzuweichen, da die Wanddickenübergänge für die Versuche von besonderer Bedeutung sind. Während die Normbreite von 25 mm eingehalten werden kann, wird die Probenlänge, wie in Abbildung 6.7 dargestellt, festgelegt. Dadurch können die lokalen Verstärkungen vollflächig im Zugbereich platziert und ein ausreichender Abstand zwischen den Wanddickenübergängen und den Einspannbacken realisiert werden. Im Gegensatz zu den geometrischen Abmessungen kann die Prüfung in Anlehnung an die Norm mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min. durchgeführt werden. Im Rahmen der Zugversuche werden von sämtlichen Varianten aus den vorgelagerten Arbeitspaketen zur statistischen Absicherung 6 Wiederholungen aus jeweils zwei Laminaten (siehe Abbildung 6.1) geprüft (s. [DIN EN ISO 527]). Während aufgrund der Probengeometrie und des inhomogenen Prüfkörperquerschnitts keine Ermittlung von Werkstoffkennwerten wie dem Elastizitätsmodul, oder der Zugfestigkeit möglich sind, werden folgende Ersatzkennwerte zur Charakterisierung der Komponentenversuche und zum Vergleich der verschiedenen Prüfkörpervarianten aufgezeichnet:

- Maximalkraft in kN
- Absolute Längenänderung in mm
- Relative Dehnung bis zur Maximalkraft in %
- Energieaufnahme bis Maximalkraft in J

Durchgeführt werden die Zugprüfungen an der Prüfmaschine Z100 RetroLine der Firma Zwick Roell AG, Ulm, Deutschland. Um das Versagensverhalten der verschiedenen Varianten analysieren zu können und gegebenenfalls Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Lagenaufbaus ableiten zu können, werden die Zugversuche zudem mit einer High-Speed-Kamera des Typs „Memrecam GX-3 – Modell MC-529“ der Firma NAC Deutschland GmbH, Stuttgart, Deutschland aufgezeichnet. Da die Alternativwerkstoffe der Glasgelege- und Glasfasermatten keine zu den Kohlenstofffasergelegten mechanisch vergleichbare Lösung darstellen, werden diese im Rahmen der Parametergegenüberstellung ebenso wenig aufgeführt, wie die bereits ausgeschlossenen FDA-Werkstoffe. Anstatt dessen werden in diesem Abschnitt die mechanischen Analysen der Basisuntersuchungen fokussiert vorgestellt.

6.2.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

In Abbildung 6.8 sind die maximal auftretenden Kräfte bei den diversen Varianten lokal verstärkter Prüfkörper aufgeführt. Daraus ist ersichtlich, dass geschäftete Übergänge grundsätzlich zu einer höheren Maximalkraft führen, als ungeschäftete. Einzige Ausnahme ist die Variante mit außenliegenden Verstärkungslagen der Faserorientierung $90^\circ/0^\circ$, da sowohl im geschäfteten, als auch ungeschäfteten WDÜ aufgrund von Schubspannungen frühzeitig eine Delamination zwischen den benachbarten $+$ und -45° -Lagen des Grundlaminats erfolgt und somit vor dem Totalversagen identische Prüfkörper in beiden Fällen vorliegen. Zusätzlich ist Abbildung 6.8 zu entnehmen, dass innenliegende Verstärkungslagen im Zugversuch unabhängig von der Faserorientierung und Gestaltung des Wanddickenübergangs zu vergleichsweise geringen Maximalkräften führen. Während die unverstärkte Variante, welche als Referenz dient, mit den höchsten Maximalkräften erwartet wurde, liegt der Maximalwert der lokal verstärkten Varianten bei $90^\circ/90^\circ$ Verstärkungsorientierungen insbesondere bei geschäftetem Übergang mindestens gleichwertig. Vergleichsweise reduzierte Werte der Maximalkraft sind dagegen bei den Varianten innenliegender $90^\circ/90^\circ$ und $90^\circ/0^\circ$ sowie außenliegender $90^\circ/0^\circ$ Varianten geschäftet und ungeschäftet zu beobachten. Die Erklärung

für höher auftretende Zugkraftwerte bei geschäfteten und außenliegenden Wanddickenübergängen sind bei diesen Varianten, wie bei der Ondulationsbestimmung bereits zu vermuten war, minimale Kraftumlenkungen aus der lokalen Verstärkung heraus. Daraus resultieren entsprechend minimale Spannungsspitzen im Wanddickenübergang aufgrund von wenig Kraftorientierungen ungleich der Zugrichtung. Es kommt dadurch zu einer geringeren Ausprägung des dreidimensionalen Spannungszustands.

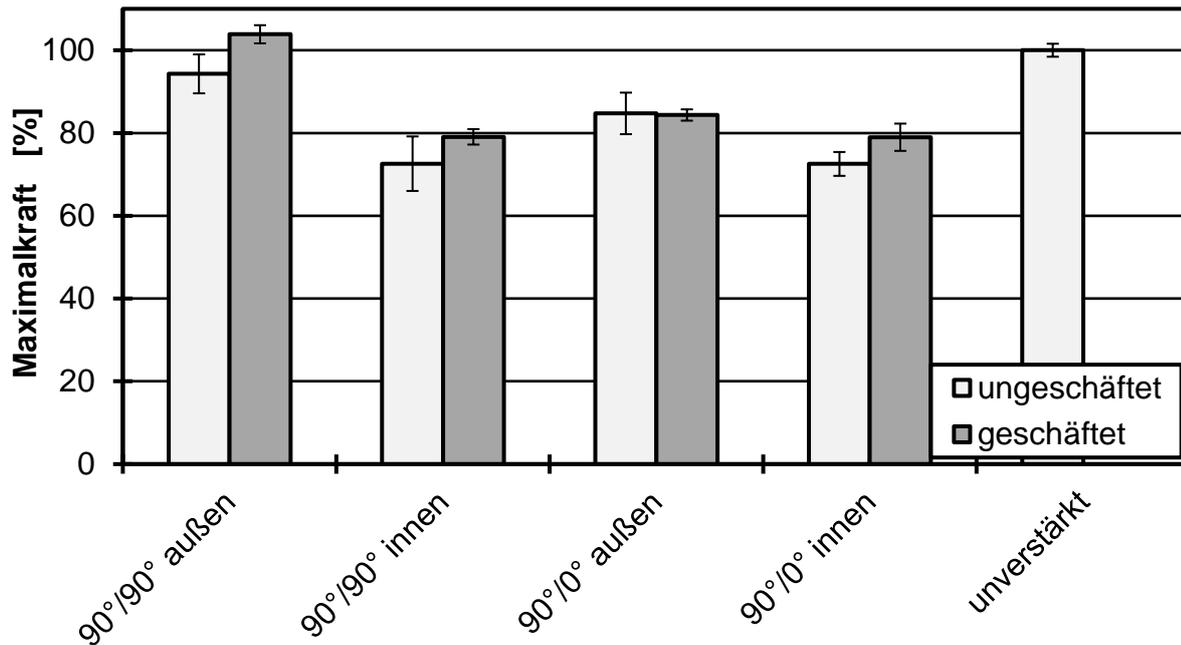


Abbildung 6.8: Maximalkraft bei beidseitig verstärkten Laminaten auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert

Nach Analyse der auftretenden Maximalkräfte ist in Abbildung 6.9 die Energieabsorption bis zum Erreichen der betrachteten Maximalkraft angegeben. Dieser Wert der Energieabsorption E berechnet sich entsprechend Gleichung 6.2 und Gleichung 6.3 nach dem Integral unter dem Kraft-Weg-Diagramm der Zugversuche (s. [TiM06]):

$$E = F \cdot \varepsilon \quad , \quad \text{Gleichung 6.2}$$

$$E = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} F_{\varepsilon} d\varepsilon \quad . \quad \text{Gleichung 6.3}$$

Dabei stellt F die zu jedem Intervall anliegende Kraft und ε die entsprechende Dehnung des Prüfkörpers dar. Analog den Ergebnissen der Maximalkräfte liegen die Probekörper mit geschäftetem Übergang in sämtlichen Varianten, außer derjenigen mit 90°/0°-Orientierung, über den ungeschäfteten. Der sich ergebende, identische Wert für die

Variante mit außenliegenden lokalen Verstärkungen der Faserorientierung $90^\circ/0^\circ$ geschäftet und ungeschäftet liegt am frühzeitigen Delaminieren der lokalen Verstärkungslagen sowohl im ungeschäfteten, als auch geschäfteten Fall.

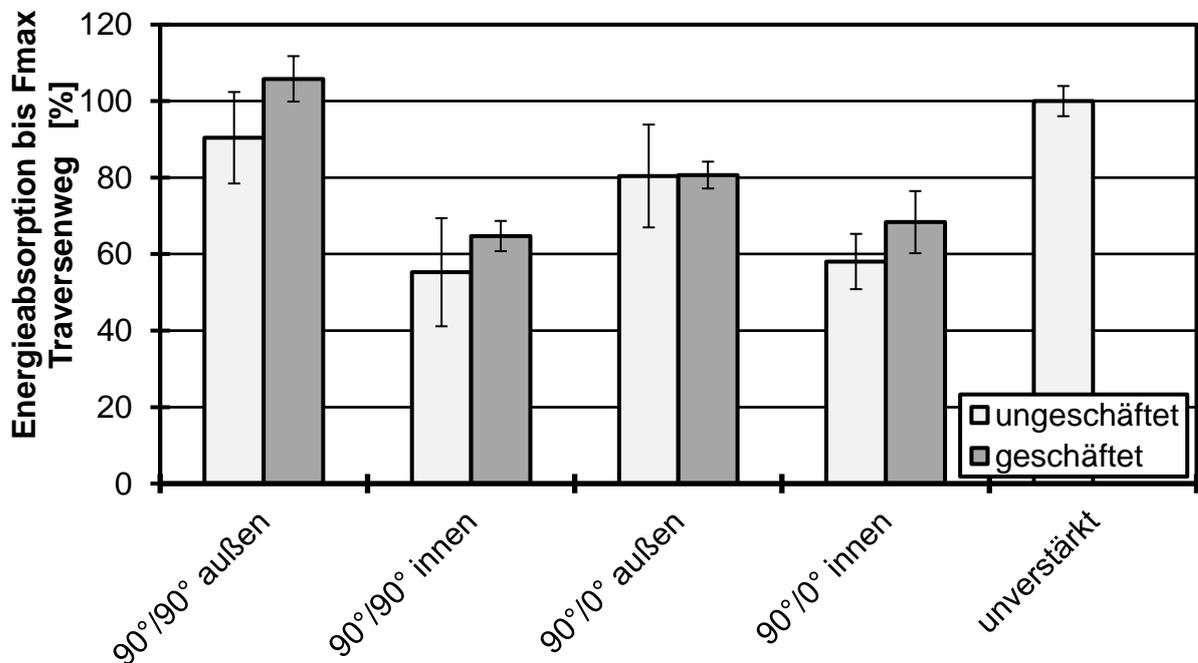


Abbildung 6.9: Energieabsorption bis zur Maximalkraft bei beidseitig verstärkten Laminaten auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert

Die Erklärung dafür, dass die geschäfteten Übergänge im Zugversuch sowohl hinsichtlich der ertragbaren Maximalkraft, als auch bezüglich der Energieabsorption bis zur Maximalkraft einen höheren Wert erreichen, als jene mit ungeschäftetem Übergang, ist in Abbildung 6.10 aufgegriffen.

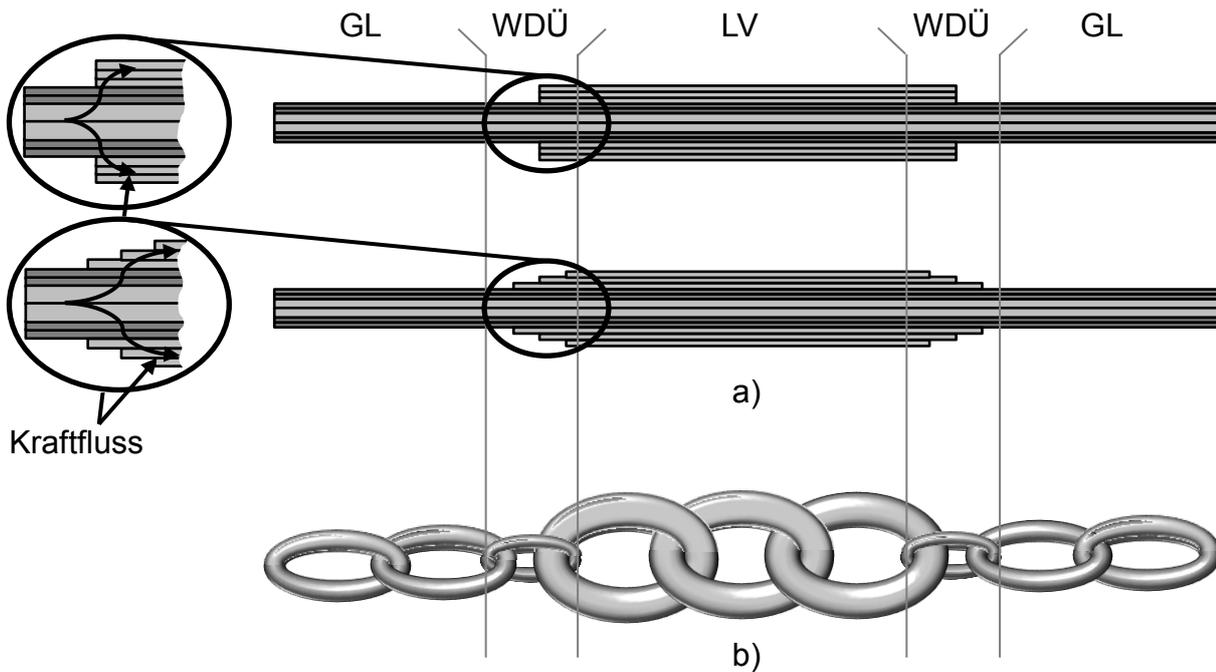


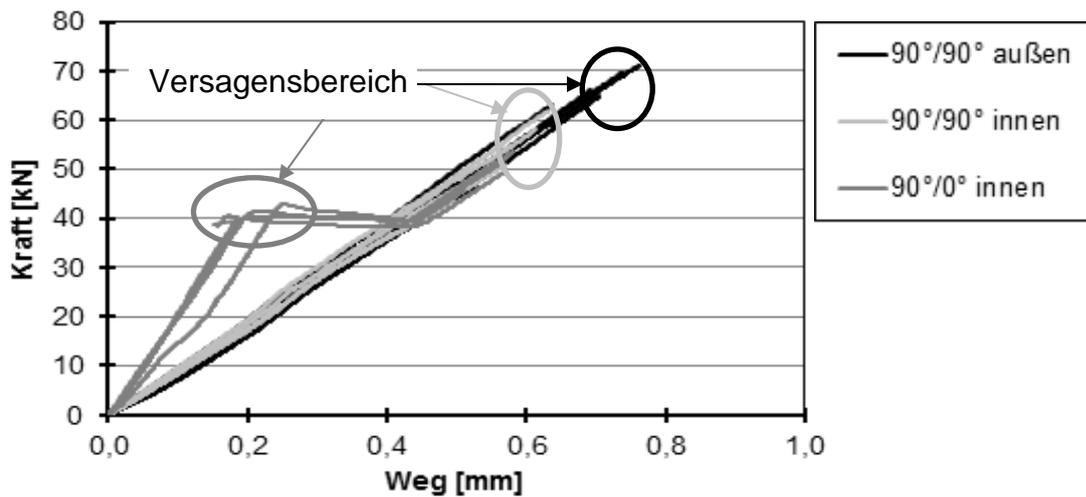
Abbildung 6.10: Modellierung der Mechanik im Zugversuch:
Kraftflussverläufe (a) und Prüfkörpermodellierung mit
unterschiedlichen Gliedstärken (b)

Während im ungeschäfteten Fall der Kraftfluss eine deutliche Umlenkung bei Eintritt in den verstärkten Bereich erfährt, ist diese Kraftauslenkung im geschäfteten Übergang deutlich gleichmäßiger und der Lastachse entsprechender ausgerichtet. Die Auslenkung des Kraftflusses führt grundsätzlich dazu, dass sich ein dreidimensionaler Spannungszustand ausbildet, der zu lokalen Spannungsspitzen und zu Initialversagen in diesem Bereich führt. Aufgrund einer identischen Horizontalkraft, jedoch im Fall eines ungeschäfteten Wanddickenübergangs höherer Vertikalkomponente der Kraft, bildet sich im ungeschäfteten Übergang eine stärker ausgeprägte Spannungsspitze aus, als im geschäfteten WDÜ. Dies wird als Grund dafür gesehen, dass Probekörper mit ungeschäfteten Übergängen geringere Maximalkräfte und eine geringere Energieabsorption bis zur Maximalkraft ertragen. Der bei der herrschenden Querbelastung maximal auftretende Wert an unverstärkten Prüfkörpern ist dadurch bedingt, dass man beim Zugversuch eine Belastung vorfindet, die einer Zugkraft an einer Kette entspricht. Dabei ist die Gliedstärke im Bereich des Grundlaminats in sämtlichen untersuchten Varianten aufgrund eines identischen Lagenaufbaus gleich und der Bereich der lokalen Verstärkungen ist in jedem Fall stärker, als das Grundlaminat. Die Ursache für den Unterschied liegt am Wanddickenübergang zwischen lokaler Verstärkung und Grundlaminat. In Abbildung 6.10 ist dieser Bereich als schwächstes Glied einer Kette dargestellt, was an der Geometrie und dem oben beschriebenen Kraftverlauf liegt. Das Ziel

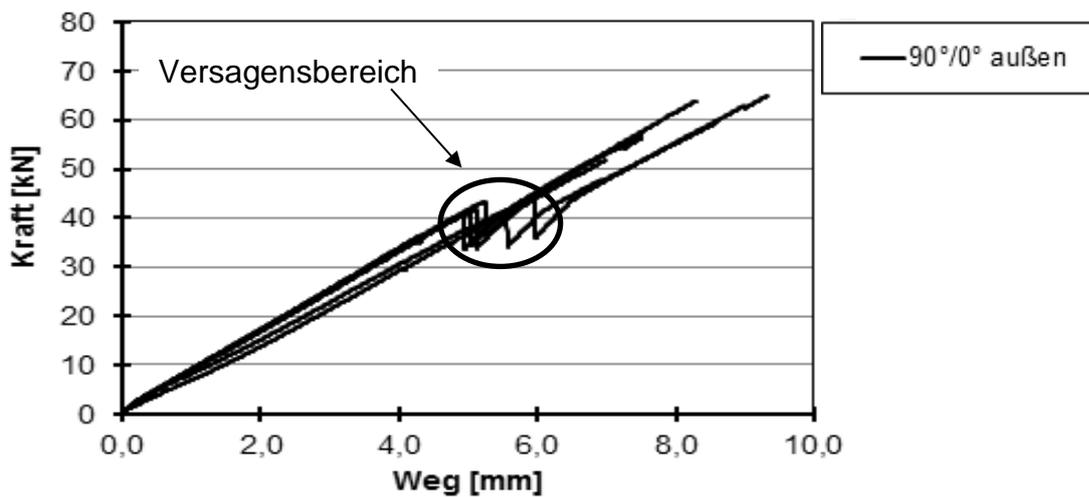
ist, das in jedem Fall schwächste Glied durch einen geschäfteten Übergang möglichst stabil zu gestalten, indem der auftretende Krafftfluss, der von der horizontalen Zugrichtung abweicht, minimiert wird.

Grundsätzlich wäre eine noch größere Schäftungsweite und eine feinere Lagenabstufung zu bevorzugen, was allerdings im Hinblick auf die Bauteilanforderungen im Automobilbau, die Wirtschaftlichkeit der Fertigungsprozesse und die Kosten der Ausgangswerkstoffe nicht zielführend ist. Um die aufgeführten Erkenntnisse noch tiefgründiger interpretieren zu können, werden im weiteren Verlauf die Kraft-Weg-Verläufe sowie die entsprechenden Versagensmechanismen beleuchtet.

Während in Abbildung 6.8 und Abbildung 6.9 der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung der Zugprüfungen aufgeführt waren, sind in Abbildung 6.11 exemplarisch die Kraft-Weg-Verläufe der ungeschäfteten Varianten dargestellt. Drei der vier Varianten können dabei über Feinwegeaufnehmer vermessen werden, wohingegen die Dehnungen der Prüfkörper mit außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungen über den Traversenweg ermittelt und entsprechend in Abbildung 6.11b separat aufgeführt sind. Grund für dieses unterschiedliche Vorgehen ist, dass die Prüfkörper mit $90^\circ/0^\circ$ außenliegenden lokalen Verstärkungen aufgrund deren schlagartigen Delaminierens und der damit verbundenen Gefahr einer Feinwegaufnehmerbeschädigung nicht über diese aufgezeichnet werden können.



a)



b)

Abbildung 6.11: Kraft-Weg-Verläufe der ungeschäfteten Varianten 90°/90° außen, 90°/90° innen, 90°/0° innen (a) und 90°/0° außen (b) im Zugversuch

Wie in Abbildung 6.11 zu erkennen, kann die Ermittlung der mechanischen Performance in diesen Komponentenprüfungen keinesfalls ausschließlich über die Maximalkraft und die Energieabsorption erfolgen. So zeigen zwar die Varianten 90°/90° innen und 90°/90° außen kein anhand des Kraft-Weg-Verlaufs ersichtliches frühzeitiges Versagen, wohingegen die beiden Prüfkörpervarianten mit 90°/0°-LV ein derartiges Versagen durchaus aufweisen. Während die Variante mit innenliegenden 90°/0°-Verstärkungslagen bei einem Kraftwert von circa 40 kN ein Versagen zeigt, das sich bei konstanter Kraft in einer abrupten Dehnung von 0,2 mm beziehungsweise 0,4 % äußert,

erfolgt bei der außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Variante ebenfalls bei circa 40 kN ein Kraftabfall von circa 25 %. Was sich daraus für die Bauteilkonstruktion ableiten lässt, ist, dass bei den ungeschäfteten $90^\circ/0^\circ$ -Varianten sowohl mit innenliegenden, als auch außenliegenden lokalen Verstärkungen keine Querkräfte zur lokalen Verstärkungslage über 40 kN ohne Laminatversagen übertragen lassen. Bei der Konstruktion mit lokalen Verstärkungen der Art $90^\circ/0^\circ$ ist diese Erkenntnis zwingend zu beachten. Zur Einsicht der entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe der Prüfkörper mit geschäfteten Wanddickenübergängen, die sich in ihrer Form sehr ähnlich bei anderen Kraftniveaus zeigen, sei auf Anhang 13 verwiesen.

Was für die Auslegung der Bauteile mit lokalen Verstärkungen ebenfalls von Bedeutung ist und im Rahmen dieser Untersuchungen beleuchtet wird, sind Versagensarten unterschiedlicher Konfigurationen. Die niedrigsten Ersatzkennwerte hinsichtlich eines Totalversagens weisen Laminat mit innenliegenden lokalen Verstärkungen auf, wohingegen $90^\circ/0^\circ$ -Prüfkörper grundsätzlich bei geringeren Kraftwerten Initialversagen aufweisen, als welche mit $90^\circ/90^\circ$ lokalen Verstärkungen. Wie in Abbildung 6.12a aufgeführt, ist die Art des Initialversagens bei Laminaten mit innenliegenden ungeschäfteten Verstärkungslagen jeweils identisch, indem die sich ondulierten Grundlaminatlagen im Wanddickenübergang delaminieren, was zu einer Streckung der Fasern des Grundlaminats führt. Dabei führen Kräfte, deren Orientierung von der Belastungsrichtung abweichen (dreidimensionaler Spannungszustand) zu Schälkräften, die dieses Versagen (im Fall $90^\circ/0^\circ$) bei Zugkräften von 38–43 kN hervorrufen und zu vergleichsweise geringen Ersatzkennwerten führen.

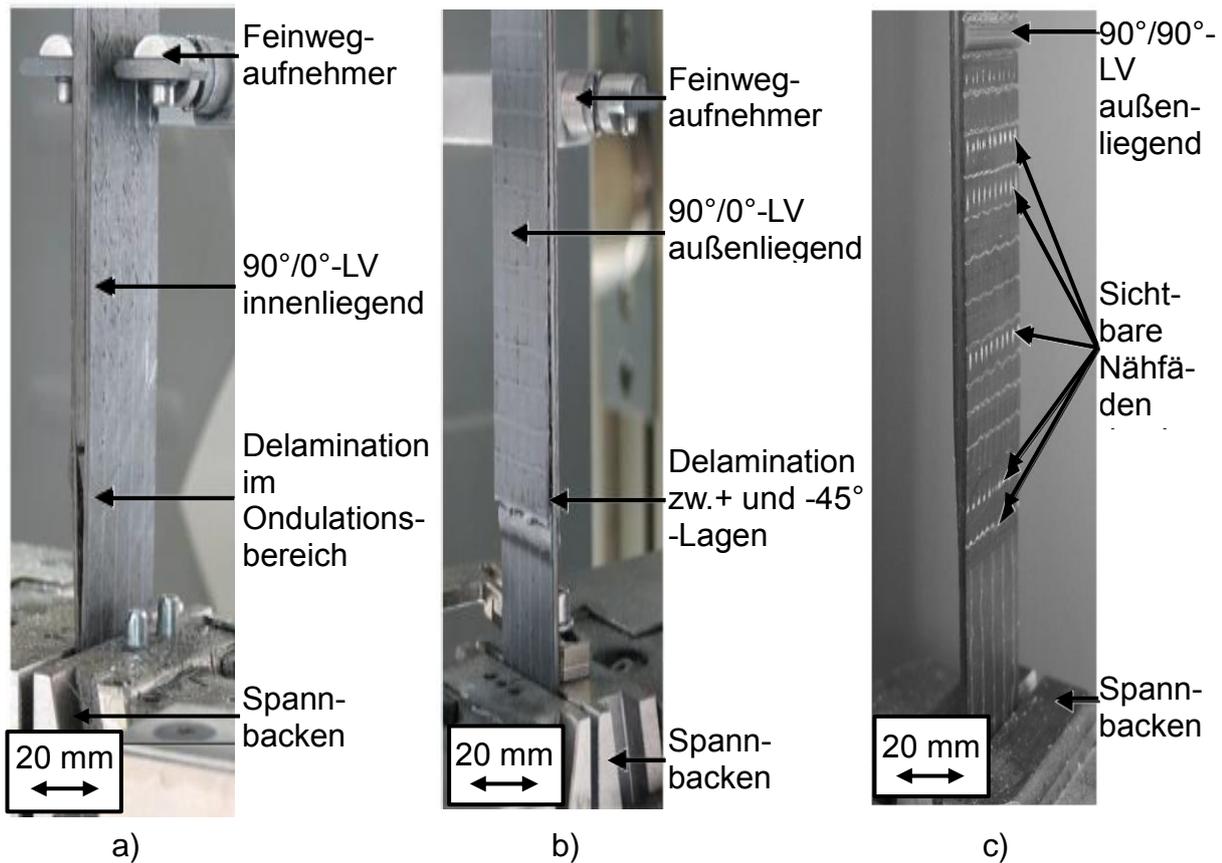


Abbildung 6.12: Erstversagen von Zugprüfkörper mit $90^\circ/0^\circ$ innenliegend (a) $90^\circ/0^\circ$ außenliegend (b) und $90^\circ/90^\circ$ außenliegend (c)

Bei außenliegenden Verstärkungslagen mit $90^\circ/0^\circ$ -Orientierung erfolgt sowohl im geschäfteten, als auch im ungeschäfteten Fall eine im Belastungsverlauf frühzeitige Delamination, wie sie in Abbildung 6.12b dargestellt ist. Bei einer Zugkraft von 35 kN bis 45 kN erfolgt eine Delamination der lokalen Verstärkungen, welche im Vorfeld der Analysen zwischen den durchgängigen äußersten Grundlaminatlagen und den nicht durchgängigen lokalen Verstärkungslagen vermutet wurde. Die Delamination tritt allerdings tatsächlich zwischen den beiden $+45^\circ$ und -45° Lagen des Grundlaminats auf. Dort führen die in Zugrichtung liegenden 0° -Lagen, welche im Grundlaminat in den Spannbacken fixiert sind, in der lokalen Verstärkung aber keine direkte Zugbelastung über die Spannbacken erfahren, zu Schubkräften. Eine gegenseitige Querkontraktionsbehinderung der $+45^\circ$ - und -45° -Lagen und der im Laminataufbau maximale Faserorientierungsunterschied dieser beiden benachbarten Lagen (Unterschied = 90°) führen zu einer Konzentration der Schubspannung in diesem Bereich. Diese Konzentration der Schubspannungen zwischen den $+$ und -45° -Lagen führt nach (s. [Sch07]) zu den erwähnten heftigen Delaminationen bei Probekörpern mit außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslagen.

Bei lokalen Verstärkungslagen mit $90^\circ/90^\circ$ -Orientierung tritt dieses Delaminieren nicht auf, sondern es kommt zu reinem Matrixbruch in den Lagen des Verstärkungspatches. Diese Brüche sind zwar aufgrund des untergeordneten Einflusses der Matrix auf die Zugeigenschaften des Laminats im Kraft-Weg-Diagramm nicht zu identifizieren, werden aber im Lauf des Zugversuchs durch auftretende weiße Nähfäden bei 22 kN bis 24 kN im Fall eines geschäfteten Übergangs und bei 27 kN bis 29 kN im Fall eines ungeschäfteten Übergangs deutlich. Das entsprechende Versagensbild ist in Abbildung 6.12c dargestellt. Als Ursache für das frühzeitigere Auftreten der Matrixrisse im Prüfkörper mit geschäftetem Wanddickenübergang wird eine geringere Belastung und somit auch Deformation im Wanddickenübergang gesehen, welcher die Last schneller auf den lokal verstärkten Bereich lenkt und somit sogar zu früherem Versagen in der geschäfteten Variante im Vergleich zur ungeschäfteten führt. Die $90^\circ/90^\circ$ -Varianten ertragen zwar höhere Maximalkräfte auf dem Weg hin zum Totalversagen und nehmen bis dahin auch mehr Energie auf, als Prüfkörper anderer Varianten, da jedoch erste plastische Deformationen und Versagensbilder bei 22 kN auftreten, kann in dieser Variante im Dauerlastfall nur bis dahin ausgelegt werden. In Bezug auf die Festigkeit kann dagegen bis auf die angeführten Maximalkräfte belastet werden, was wiederum in der Konstruktion zu bedenken ist.

6.2.3 Fazit

Hinsichtlich der Zugeigenschaften ist ebenfalls der positive Einfluss der geschäfteten Gestaltung des Wanddickenübergangs zu erkennen. So ertragen unter Zugbelastung Prüfkörper mit geschäfteten außenliegenden lokalen Verstärkungen der Faserorientierung $90^\circ/90^\circ$ die höchsten Maximalkräfte und höchste Energieabsorption bis zur Maximalkraft. Prüfkörper mit innenliegenden Verstärkungslagen führen dagegen unter Zugbelastung zu Delaminationen im Bereich der Wanddickenübergänge. Zusätzlich zu den mechanischen Ersatzkennwerten der Komponentenprüfungen konnten auch die charakteristischen Versagensbilder der verschiedenen Prüfkörpervarianten abgeleitet, plakativ visualisiert und interpretiert werden. Gegensätzlich zu manchen anderen Resultaten stellen sich die Versagensbilder der verschiedenen Varianten sehr differenziert dar. Während die Versagensbilder grundsätzlich durch Delaminationsversagen geprägt sind, konnten in den Kapiteln 6.1.2 und 6.2.2 auch charakteristische Unterschiede in den Details aufgezeigt werden. So ergeben sich im Ondulationsbereich des Grundlaminats, beziehungsweise im Bereich des Wanddickenübergangs bei lokal

verstärkten Prüfkörpern mit innenliegenden lokalen Verstärkungen unter Zugbelastung Delaminationen vom Wanddickenübergang in den Grundlaminatbereich hinein. Das Totalversagen der Grundlaminatlagen tritt jedoch nicht durch Delamination, sondern durch Faserbruch auf, was aufgrund der Zugkraftorientierung zu Schälkräften im verstärkten Bereich und zu Abtrennung der lokalen Verstärkungslagen nach dem Versagen führt. Bei außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungsfasern resultieren Schubkräfte zwischen den $+45^\circ$ und -45° -Lagen, die in frühzeitiger, heftiger Delamination resultieren, während bei $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungsfasern durch Zwischenfaserbrüche Delaminationen senkrecht zur Zugrichtung auftreten und dadurch weiße Nähfäden sichtbar werden. Gesamtheitlich lässt sich konstatieren, dass deutliche Unterschiede zwischen den Zugeigenschaften verschiedener Verstärkungsvarianten zu erkennen sind und dass die erlangten, detaillierten Kenntnisse für eine zielgerichtete Auslegung lokal verstärkter Lamine essentiell sind. Während die Querzugeigenschaften der $90^\circ/90^\circ$ -Variante hinsichtlich der erreichbaren Maximalkraft und der möglichen Energieaufnahme bis zum Erreichen der Maximalkraft optimal sind, tritt eine irreversible Schädigung des Werkstoffs bei dieser Variante im Fall der analysierten Belastung bereits bei Kräften ab 22 kN auf. Bei den anderen Varianten sind die Kräfte bis zum Eintreten irreversibler Schädigungen mit 35 kN beziehungsweise 38 kN deutlich höher. Die ermittelte Maximalkraft und Energieabsorption liegen allerdings niedriger als bei der $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungsvariante. Somit kann hinsichtlich der Querzugeigenschaften keine allgemeine Konstruktionsprämisse definiert werden. Vielmehr sind für den jeweiligen Einzelfall die aufgeführten Vor- und Nachteile abzuwägen und auf Basis der aufgeführten Erkenntnisse im Individualfall zu beachten.

6.3 Biegeprüfungen

Zur Charakterisierung der Mechanik lokal verstärkter Lamine im Hinblick auf Biegebelastungen werden auch Biegeprüfungen durchgeführt. Dazu wird zunächst die Prüfparameterherleitung und Vorgehensweise beschrieben und anschließend auf die Ergebnisdarstellung und deren Interpretation eingegangen.

6.3.1 Vorgehensweise

Analog den Zugversuchen können auch die Biegeversuche nicht nach Norm (DIN EN ISO 14125) durchgeführt werden und wie bei den Zugversuchen liegt der Fokus der Untersuchungen auch auf vergleichenden Ergebnissen und den Auswirkungen von

Spannungsüberhöhungen an den Wanddickenübergängen der Probekörper. Zur Analyse wurden diverse, in Anhang 14 dargestellte Prüfvarianten betrachtet und bewertet, wonach die 4-Punkt-Biegung als am besten geeignete Prüfung ausgewählt wurde. Um den Anforderungen einer reproduzierbaren, vergleichenden Charakterisierung der Übergangsbereiche entsprechen zu können, wird die in Abbildung 6.13 dargestellte Variante der 4-Punkt-Biegung ausgewählt.

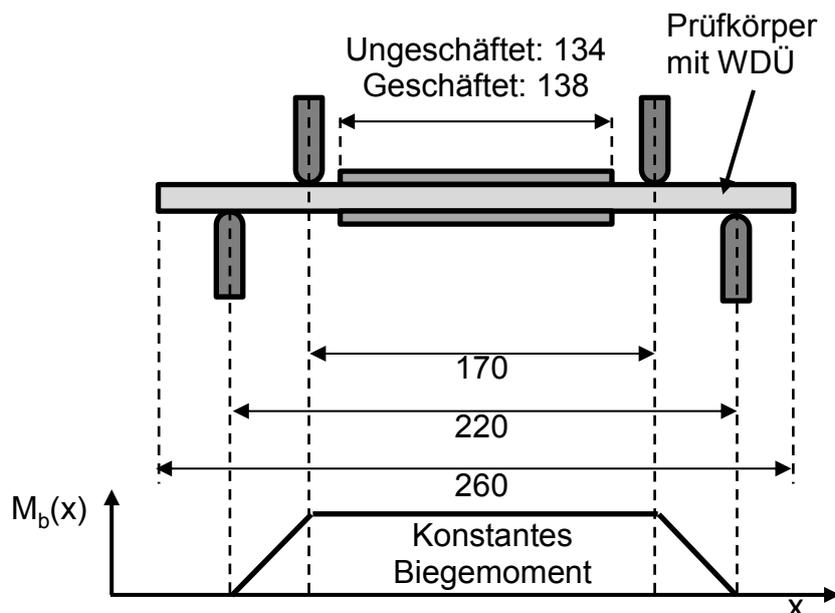


Abbildung 6.13: Geometrieparameter der Biegeprüfung

Bei diversen anderen Varianten hätte unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten entweder der Einfluss des Übergangsbereichs auf die mechanischen Biegeeigenschaften nicht prozesssicher und reproduzierbar untersucht werden können, oder es wäre keine definierte Lasteinleitung dadurch möglich gewesen (siehe Anhang 14). Über die 4-Punkt-Biegung mit Lasteinleitungen ausschließlich im Grundlaminat kann dies jedoch gewährleistet werden. Während die Prüfgeschwindigkeit und die Prüfkörperbreite in Anlehnung an die Norm festgelegt werden können, basieren die Lasteinleitungspunkte insbesondere auf den durch die Werkzeuggeometrie vorbestimmten Prüfkörperabmessungen. Vorteil der dargestellten Prüfanordnung ist der konstante Momentenverlauf im Bereich der Wanddickenübergänge, die basierend auf den Ergebnissen der Zugversuche als Schwachstelle im Biegeprüfkörper erwartet werden. Nachteil dieser Versuchsanordnung sind große Distanzen zwischen den Auflagern und damit verbundene starke Durchbiegungen der Prüfkörper bis zum Versagen. Bei Prüfkörpern ohne

lokale Verstärkungen mit homogener Wandstärke von 2,1 mm tritt bei dieser Konstellation kein Versagen der Lamine auf. Die Prüfung muss dagegen bei starker Durchbiegung vor Hindurchrutschen durch die Auflager definiert abgebrochen werden.

Aufgrund der geometrischen Abweichungen der Prüfkörper durch die variable Wandstärke und die daraus resultierenden Unterschiede zur Normprüfung ist auch die Biegeprüfung nicht der Gruppe der Werkstoffcharakterisierung, sondern der Elementprüfung zuzuordnen. Während die Prüfkörpergeometrie und entsprechend die Auflagerabstände von der Norm abweichen, wird eine normgerechte Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min. herangezogen. Als Prüfmittel wird eine Universalprüfmaschine des Typs 5980 der Firma Instron GmbH, Darmstadt, Deutschland verwendet. Über diese Universalprüfmaschine, welche auf eine Maximalkraft von 100 kN ausgelegt ist, werden für die vergleichende Bewertung der verschiedenen Prüfkörpervarianten analog den Zugversuchen folgende Parameter aufgezeichnet und analysiert:

- Kraft [N]
- Traversenweg [mm]

woraus im Rahmen der Auswertung folgende Ersatzkennwerte analog den Zugversuchen ermittelt werden:

- Maximalkraft [N]
- Energieaufnahme bis zur Maximalkraft [J]

Um eine fundierte Aussage über die verschiedenen geprüften Varianten machen zu können, obwohl eine Ermittlung der Kennwerte Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit nicht möglich ist, werden zusätzlich das Versagensverhalten der Prüfkörper sowie deren charakteristische Deformation aufgezeichnet und analysiert. Dies erfolgt über eine Technologie aus der Familie der „Digital Image Correlation“ Verfahren, das sogenannte ARAMIS®-System der Firma GOM mbH, Braunschweig, Deutschland. Während der Biegeprüfungen wird der Prüfling damit über Kameras fotografisch aufgezeichnet, nachdem die Prüfkörper mit einem sogenannten „Speckle-Muster“ versehen sind, und die Prüfanordnung nach Herstellerangaben kalibriert wurde. Über dieses optische Messsystem werden u.a. folgende Ersatzkennwerte aus den Versuchen generiert:

- Durchbiegung der Probe in z-Richtung (Biegelinie) [mm]
- Verschiebung des Probenmittelpunkts in z-Richtung [mm]
- Traversenweg der Prüfmaschine in z-Richtung [mm]
- Dehnung der Probe in Längsrichtung [mm]
- Scherwinkelverteilung an der Prüfkörperschnittfläche [°]

Aufgrund der Probekörpersymmetrie wird vor dem Hintergrund des begrenzten Messvolumens und der Intention einer maximalen Auflösung am Wanddickenübergang nur eine Hälfte der Probe über das ARAMIS-System ausgewertet.

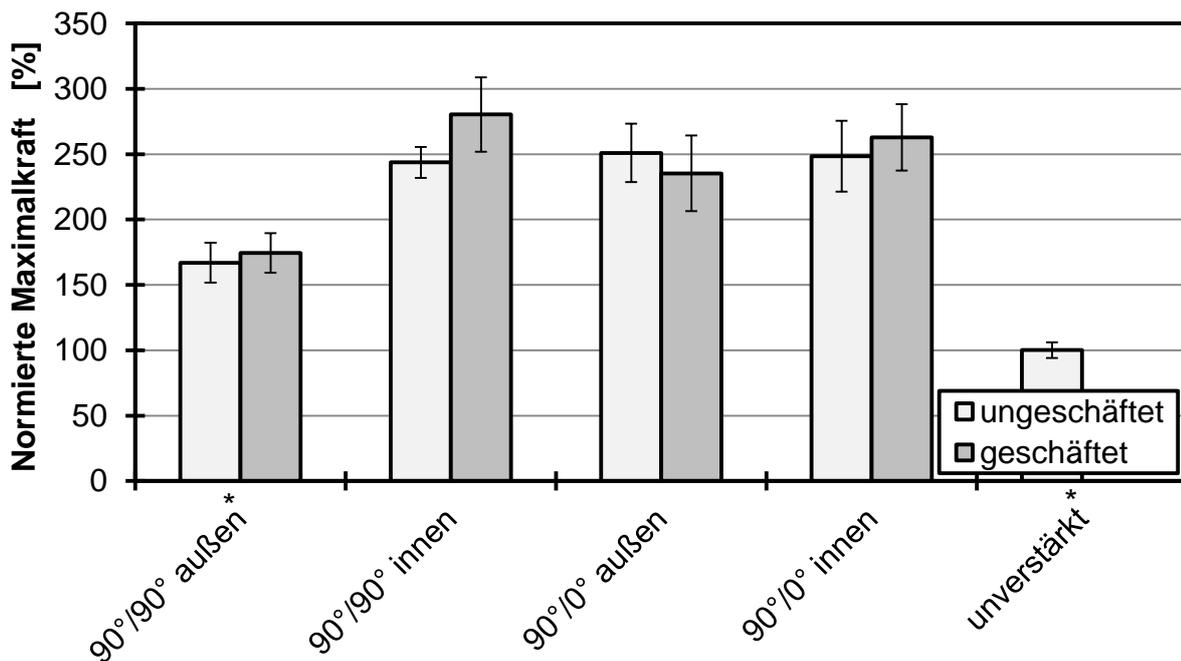
6.3.2 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Aufgrund der Ermittlung von Ersatzkennwerten und der Analyse der Biegeversuche anhand des ARAMIS-Systems, sind die Ergebnisse vielfältig und erfordern eine ausführliche Interpretation. Bevor auf die Resultate des optischen Messsystems und die Versagensarten unter Biegebelastung eingegangen wird, erfolgt die Darstellung und Interpretation der über die Prüfmaschine erlangten Ersatzkennwerte.

Analog den Zugversuchen werden auch bei den Biegeversuchen die Ersatzkennwerte über den arithmetischen Mittelwert und die Standardabweichung vorgestellt. Dabei sind zunächst in Abbildung 6.14 die während des Biegevorgangs auftretenden, normierten Maximalkräfte bei analogen Prüfkörpervarianten wie bei den Zugversuchen dargestellt. Wichtig zu erwähnen ist, dass bei den Prüfparametern, anhand derer die Versuche gefahren werden können, die unverstärkten Referenzproben und die Proben mit außenliegenden 90°/90°-Verstärkungen nicht versagt haben und die während des Versuchs auftretenden Maximalkräfte somit nur bedingt auszuwerten sind. Grundsätzlich zeigen die Varianten mit innenliegenden Verstärkungslagen höhere Maximalkräfte, als welche mit außenliegenden. Grund dafür ist die Verlagerung der durchgehenden, lasttragenden 0°-Lagen des Grundlaminats nach außen aufgrund der Platzierung der lokalen Verstärkungen im Zentrum. Dadurch wird der Steineranteil der Prüfkörper im Bereich der lokalen Verstärkungslagen erhöht, was zu einer Versteifung des lokal verstärkten Bereichs führt. Beim unverstärkten Referenzaufbau und den Varianten mit außenliegenden lokalen Verstärkungen liegen die 0°-Lagen des Grundlaminats dagegen im Zentrum, im Bereich der neutralen, nicht belasteten Faser, was zu geringerem Widerstand des Prüfkörpers gegen Biegung führt.

Während grundsätzlich eine Zunahme der maximal erträglichen Kraft durch die Einbringung einer Schäftung zu erzielen ist, liegt die Maximalkraft bei der 90°/0° Variante

mit außenliegenden ungeschäftetem Wanddickenübergang demgegenüber tendenziell sogar höher als mit geschäftetem. Als Grund für dieses Verhalten wird die breitere Abmessung der lokalen Verstärkungslagen und die mechanische Lastübernahme der in 0° -Richtung orientierten Fasern der lokalen Verstärkungslagen (siehe Abbildung 4.4) gesehen. Dadurch, dass die bei geschäftetem Wanddickenübergang breitesten lokalen Verstärkungen mit 138 mm um 4 mm breiter sind, als jene bei ungeschäftetem Wanddickenübergang, tritt ein anderes Deformations- und Spannungsbild auf. Bei 300 g/m^2 -Textilien führen die ausgeprägten Spannungsspitzen trotz Schäftung zu einem frühzeitigen Delaminieren. Somit kann aus der Betrachtung der maximal erträglichen Kräfte unter Biegebelastung eine Tendenz hin zu größeren erträglichen Maximalkräften durch einen geschäfteten Wanddickenübergang abgeleitet werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich im Fall der Variante $90^\circ/0^\circ$ die Maximalkräfte wie geschildert darstellen, kann aber keine allgemeine Aussage für die mechanischen Eigenschaften unter Biegebelastung abgeleitet werden.

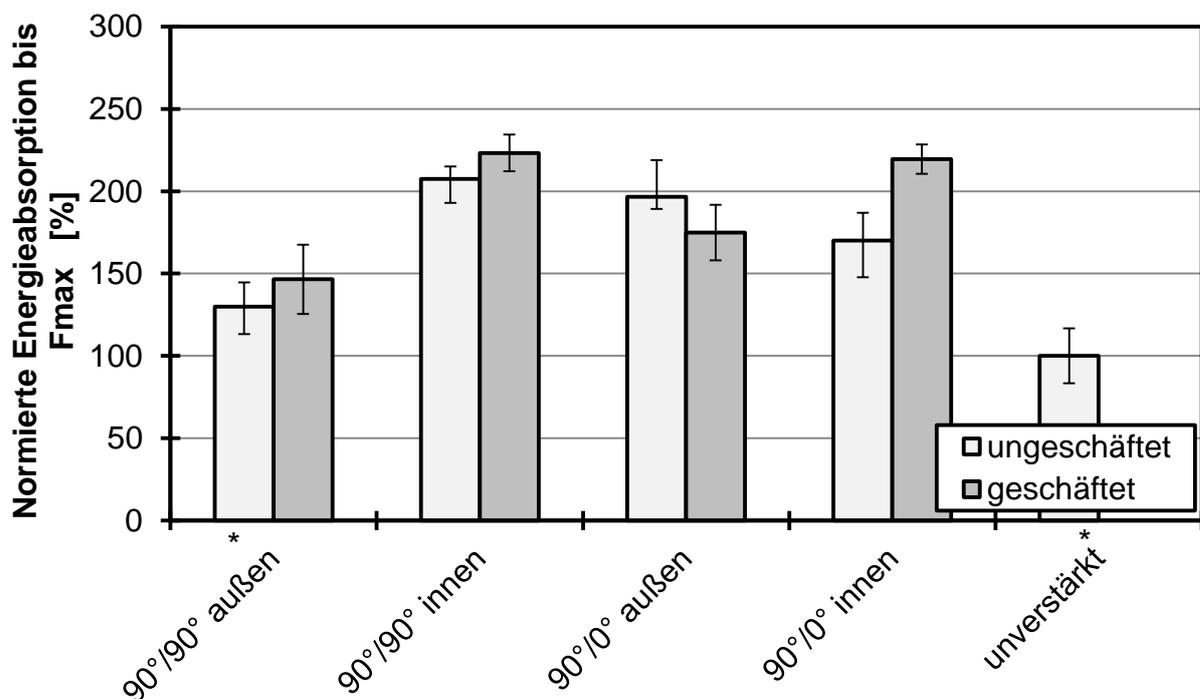


*Prüfung wurde manuell bei 24 mm Traversenweg abgebrochen

Abbildung 6.14: Biegeversuche an reinen Kohlenstofffasergelegen; Maximalkraft auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert

Vergleichbar zu den Werten der Maximalkraft stellt sich in Abbildung 6.15 auch die Energieabsorption bis zum Erreichen der Maximalkraft dar. So nehmen Prüfkörper mit geschäftetem Wanddickenübergang grundsätzlich mehr Energie bis zum Erreichen

der Maximalkraft auf, als solche mit ungeschäftetem WDÜ. Auch die absorbierte Energie weist bei der Variante mit $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslagen im Fall des geschäfteten Übergangs unerwarteter Weise einen geringeren Betrag auf, als bei ungeschäftetem Übergang. Als Grund hierfür wird erneut die im Fall der Maximalkraft aufgeführte Erklärung gesehen. Um eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu erreichen, müsste die Schäftung den Erkenntnissen zufolge noch feinstufiger erfolgen, was zu Textilien mit geringerem Flächengewicht und entsprechend höheren Preisen führen würde. Eine Schäftung scheint sich im Hinblick auf die Biegebelastung insbesondere für innenliegende LV bezahlt zu machen, da eine Fertigung von lokal verstärkten Bauteilen mit Textilien geringeren Flächengewichts für die automobiler Großserienfertigung nicht wirtschaftlich ist, die verwendeten Flächengewichte aber für außenliegende LV zu schwer erscheinen.



*Prüfung wurde manuell bei 24 mm Traversenweg abgebrochen

Abbildung 6.15: Biegeversuche an reinen Kohlenstofffasergelegen: Energieabsorption bis zur Maximalkraft auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert

Die Erklärung für die Unterschiede zwischen innen- und außenliegenden lokalen Verstärkungslagen, insbesondere bei $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen, ist in der Position der 0° -Lagen des Grundlaminats zu sehen. Während sowohl bei außenliegenden, als auch

innenliegenden lokalen Verstärkungen die Fasern in 90°-Richtung keinen unmittelbaren Beitrag zur Mechanik des Prüfkörpers leisten, führt die innenliegende lokale Verstärkung dazu, dass die 0°-Fasern des Grundlaminats, die bei außenliegenden lokalen Verstärkungen im Bereich der neutralen Fasern (aufgrund ihrer Position unbelastete und nicht deformierte Faserschicht) liegen nach außen verlagert werden und somit ihren Einfluss auf die Biegeeigenschaften durch die Erhöhung des sogenannten Steineranteils erhöhen. So berechnet sich das Biege-Widerstandsmoment nach (s. [GrF14]) über Gleichung 6.4. Dabei beschreibt W_y das Biege-Widerstandsmoment, b die Breite und h die Höhe des Probekörpers. Übertragen auf die lokal verstärkten Prüflinge bedeutet dies, dass eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften des Laminats umso mehr die mechanischen Eigenschaften erhöht, je weiter diese Eigenschaftserhöhung von der neutralen Faser des Laminats entfernt ist. Dementsprechend können die bei $h=0$ mm im Prüfkörper befindlichen Fasern nicht zum Widerstandsmoment beitragen. Wenn dagegen die 0°-Fasern des Grundlaminats um einen Wert h von der neutralen Faser entfernt sind, können diese, wie im Fall innenliegender lokaler Verstärkungslagen, durchaus die mechanischen Eigenschaften des Laminats positiv beeinflussen.

$$W_y = \frac{bh^2}{6} \qquad \text{Gleichung 6.4}$$

Zur detaillierten Auswertung der Biegeversuche werden analog den Ergebnissen aus den Zugversuchen die Kraft-Weg-Verläufe verschiedener Varianten vorgestellt (siehe Abbildung 6.16), weil daraus neue Zusammenhänge abgeleitet und die Charakterisierung der verschiedenen Varianten vertieft werden können. Bei den Prüfkörpern mit 90°/90° außenliegenden lokalen Verstärkungen, die während des Biegeversuchs bei der gewählten Konfiguration nicht versagen, treten bei einem maximal absolvierten Traversenweg von 24 mm Kräfte kleiner 400 N auf. Demgegenüber zeigen sämtliche andere Varianten deutlich höhere Kurvenverläufe mit Maximalkräften größer 470 N. Die Kurvenverläufe der Varianten mit 90°/90° innenliegend, 90°/0° innenliegend und 90°/0° außenliegend unterscheiden sich hinsichtlich der Kraftkurven kaum, wobei jedoch die Prüfkörper mit 90°/0°-innenliegenden LV eine im Vergleich zu den anderen Prüfungen hohe Streuung aufweisen. Diese erhöhte Streuung wird auf die angesprochenen vergleichsweise starken Faserumlenkungen und eine entsprechend sensitive Geometrie im Wanddickenübergang zurückgeführt, da die in 0°-Richtung orientierten

Fasern der lokalen Verstärkungen eine sehr eingeschränkte Ondulationsanpassung beziehungsweise einen sehr eingeschränkten Ondulationsausgleich möglich machen.

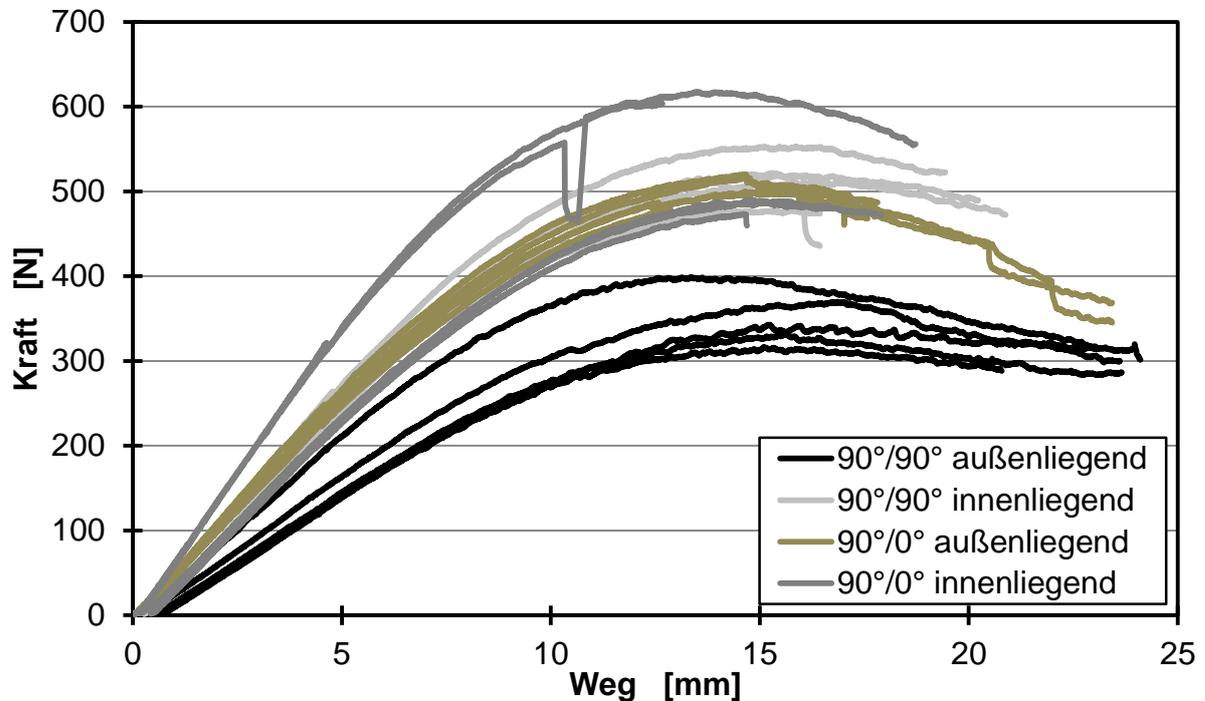


Abbildung 6.16: Biegeversuche; Kraft-Weg-Verläufe von Prüfkörpern mit ungeschäftetem WDÜ

Zur Analyse des Schäftungseinflusses auf die Kraft-Weg-Verläufe sind in Abbildung 6.17 exemplarisch die Kurvenverläufe der Variante 90°/0° außenliegend geschäftet und 90°/0° außenliegend ungeschäftet gegenübergestellt. Wie dieser exemplarischen Darstellung zu entnehmen ist, scheint die Schäftung auf das Biegeverhalten verschiedene Auswirkungen zu haben. Dabei stellen sich die Kurvenverläufe der geschäfteten und ungeschäfteten Variante sehr ähnlich dar. Die geschäfteten Probekörper weisen keinen höheren Kurvenverlauf auf, als ungeschäftete. Die Schwankungsverteilung der Kraftverläufe bei geschäfteten Wanddickenübergängen stellt sich zudem deutlich breiter dar, als bei Prüfkörpern mit ungeschäftetem Wanddickenübergang. Grund hierfür kann sein, dass die Reinharzbereiche bei ungeschäfteten Wanddickenübergängen als eine Art Sollbruchstelle beziehungsweise Rissinitiationsstelle fungieren und somit ein definierteres Versagen hervorrufen, als dies bei geschäfteten Wanddickenübergängen der Fall ist, wo die Delamination zwar hinsichtlich der Versagensart reproduzierbar, aber in Bezug auf Versagensursprung ungleich undefinierter abläuft.

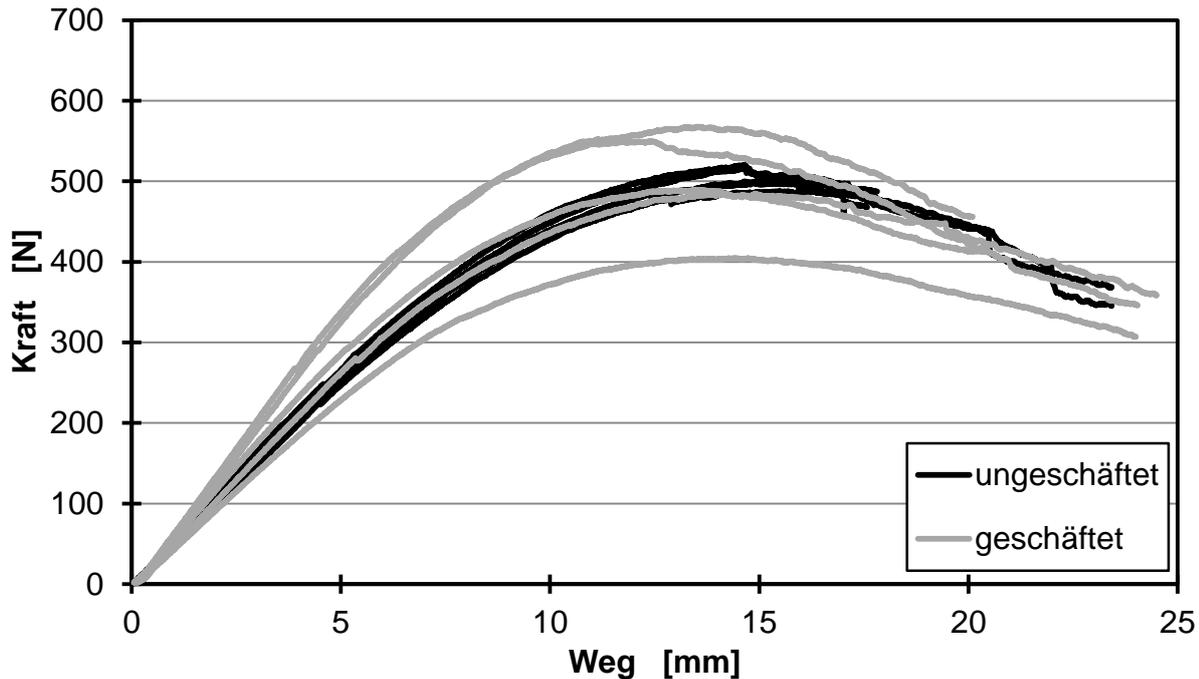


Abbildung 6.17: Biegeversuche: Kraft- Weg-Verläufe von PKs mit $90^{\circ}/0^{\circ}$ außenliegenden geschäfteten und ungeschäfteten LV

Da sich die Kraft-Weg-Verläufe der Prüfkörper mit geschäftetem Übergang analog denjenigen der aufgeführten ungeschäfteten Übergänge darstellen, werden diese Ergebnisse hier nicht aufgeführt.

Worin sich die aufgeführten Varianten im Gegensatz zum Kraft-Weg-Verlauf durchaus unterscheiden, sind die Arten des Versagens, die in Abbildung 6.18 dargestellt sind. So kollabieren Prüfkörper mit innenliegenden lokalen Verstärkungslagen im Vergleich zur Variante mit $90^{\circ}/0^{\circ}$ außenliegenden lokalen Verstärkungen deutlich früher und nach Erreichen der Maximalkraft weniger duktil, das heißt instant mit sehr geringer Reststabilität. Wie in Abbildung 6.18 zu sehen, kommt es bei der Prüfkörpervariante mit außenliegenden lokalen Verstärkungen der Faserorientierung $90^{\circ}/0^{\circ}$ am Kraftmaximum zu Delaminationen der lokalen Verstärkungen, jedoch zu keinem Totalversagen wie dies bei Prüfkörpern mit innenliegenden Verstärkungslagen der Fall ist. Dabei kommt es zunächst am Wanddickenübergang im Druckbereich zu einem sogenannten Scherknicken, ehe sich das Versagen in einer Delamination weiterentwickelt, wie dies in Kapitel 3.5.3 beschrieben ist.

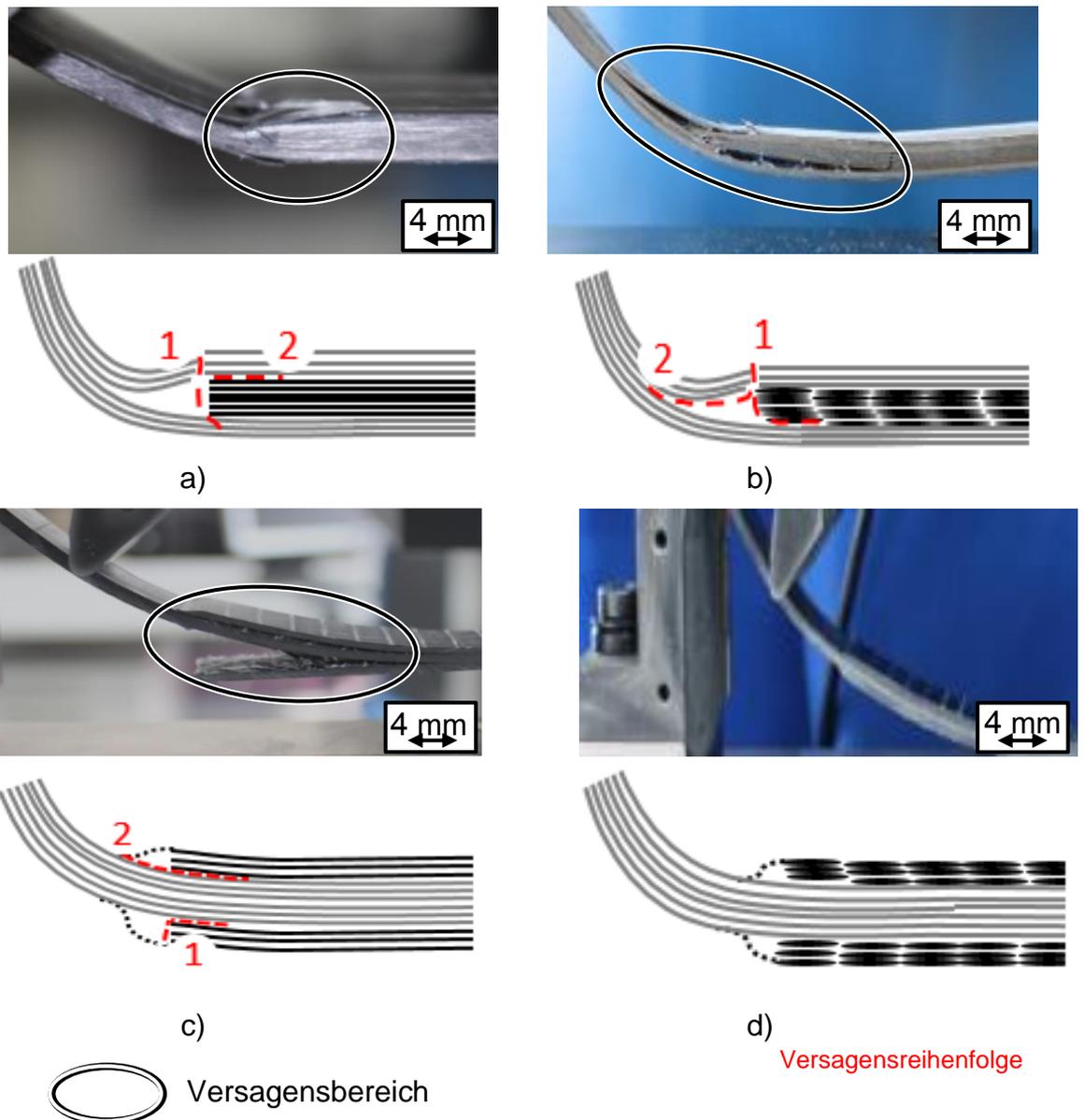


Abbildung 6.18: Erstversagen von ungeschäfteten Biegeprüfkörpern mit
 $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslage innenliegend (a)
 $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungslage innenliegend (b)
 $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslage außenliegend (c) und
 $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungslage außenliegend (d)

Um die Korrelation zwischen den Kraft-Weg-Verläufen und der Deformation der Prüfkörper während des Biegevorgangs besser interpretieren zu können, wird im weiteren Verlauf auf Resultate der Deformationsanalyse anhand des angesprochenen GOM-ARAMIS-Systems eingegangen. Im Rahmen dieser Betrachtungsweise werden Verformungen am Querschnitt der Biegeprüfkörper analysiert. Dabei werden erneut die in den vorgelagerten Versuchen beleuchteten Varianten mit $90^\circ/90^\circ$ - und $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierung, mit geschäftetem und ungeschäftetem Wanddickenübergang, mit innenliegenden und außenliegenden lokalen Verstärkungen einander gegenübergestellt.

Zur Visualisierung der daraus generierten Ergebnisse sind, wie in Abbildung 6.19, oben jeweils der Scherwinkelverlauf entlang der Probe an der Zentrumsfaser und unten die farbliche Darstellung des Scherwinkelverlaufs an der Schnittfläche aufgetragen. Der maximale Scherwinkel bei den Probekörpern mit außenliegender, ungeschäfteter $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkung beträgt mit $1,6^\circ$ deutlich weniger, als der Maximalwert der innenliegenden Verstärkungsvariante mit $3,9^\circ$.

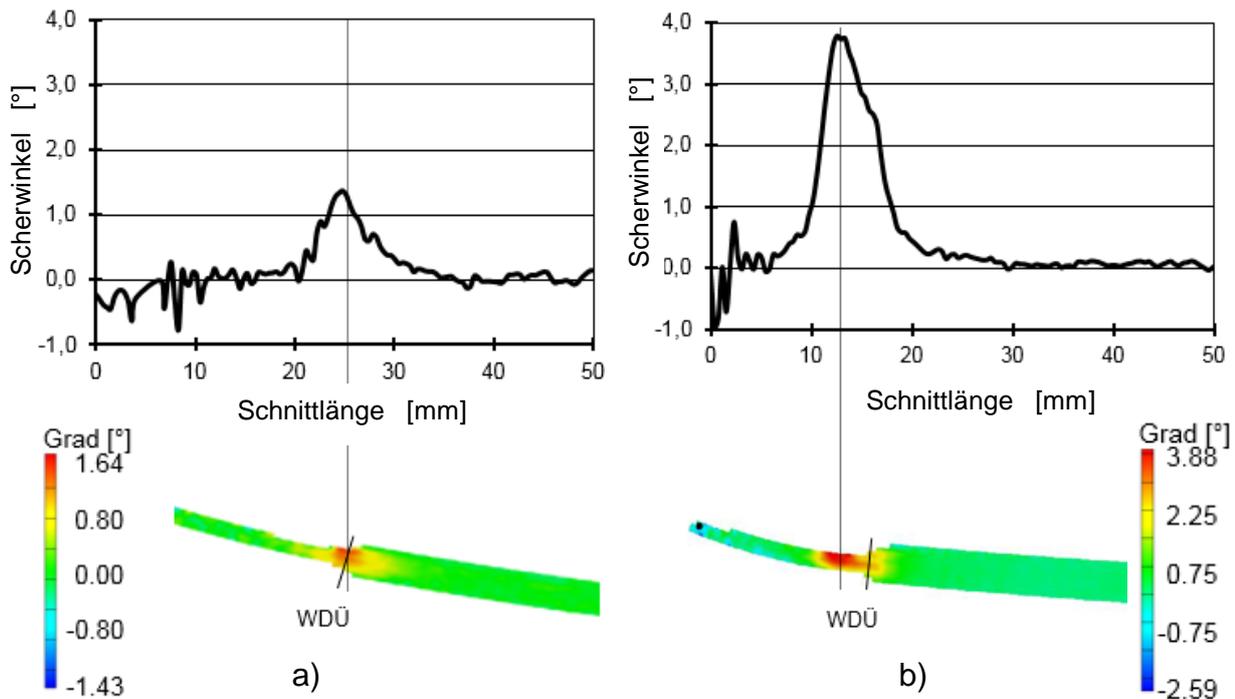


Abbildung 6.19: Ergebnisse Aramis-System:
 $90^\circ/90^\circ$ außen ungeschäftet (a) und $90^\circ/90^\circ$ innen ungeschäftet (b)

Dabei ist die Deformation, welche in sämtlichen Varianten insbesondere im Wanddickenübergang auftritt, im Fall der innenliegenden Verstärkung deutlich mehr auf den Übergangsbereich konzentriert, als im Fall außenliegender Verstärkungslagen. Beim Probekörper mit außenliegender, ungeschäfteter $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkung stellt sich die Scherwinkelvariation über die Probe gemäß dem Scherwinkelverlauf breiter dar. Die beiden hier dargestellten Varianten haben jedoch die maximale Scherung, beziehungsweise Deformation und Belastung des Biegeprüfkörpers im Bereich des Wanddickenübergangs gemeinsam. Während die im Vergleich geringere Deformation bei der außenliegenden lokalen Verstärkungslage eher im Bereich der Aufdickung liegt, ist das Deformationsmaximum im Fall der innenliegenden lokalen Verstärkungslage vom Übergangsbereich in Richtung des Grundlaminats verschoben.

Zwischen geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen besteht der Unterschied, dass bei ungeschäfteten Übergängen eine Konzentration des Bereichs maximaler Deformation auf einen sehr begrenzten Abschnitt erfolgt. Anders ist dies bei geschäfteten Übergängen mit identischer Faserorientierung von $90^\circ/90^\circ$ außen- und innenliegend zu beobachten. So verteilt sich im geschäfteten Übergang (siehe Abbildung 6.20) die rötlich dargestellte, stark ausgeprägte Deformation auf eine größere Fläche der Schnittansicht. Zusätzlich sind die maximal erreichten Scherwinkel bei geschäftetem Übergang grundsätzlich geringer, als bei ungeschäftetem. So beträgt der maximale Scherwinkel bei $90^\circ/90^\circ$ -Prüfkörpern mit geschäfteten, außenliegenden lokalen Verstärkungen ($1,4^\circ$) und somit um circa 15% weniger als bei ungeschäfteten außenliegenden lokalen Verstärkungen ($1,6^\circ$). Bei Prüfkörpern mit geschäfteten innenliegenden lokalen Verstärkungen beträgt der Scherwinkel mit $3,1^\circ$ um circa 19% weniger, als mit ungeschäfteten, innenliegenden lokalen Verstärkungen mit $3,9^\circ$.

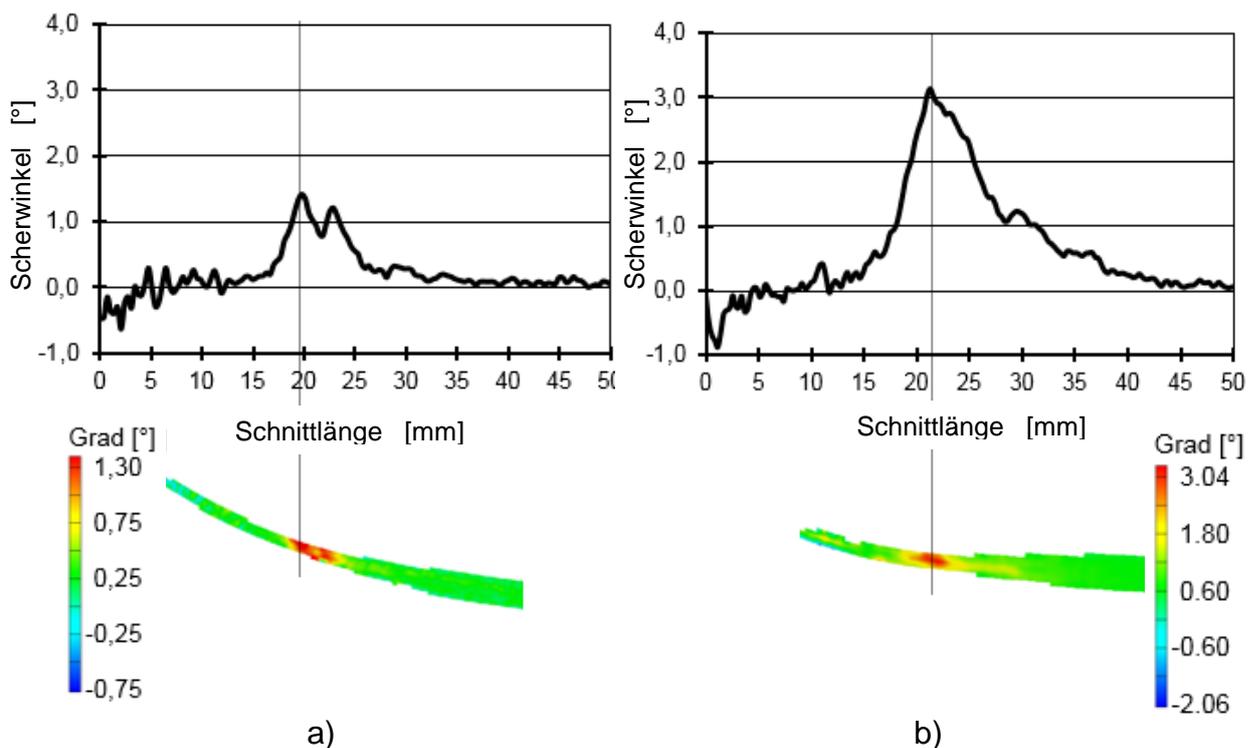


Abbildung 6.20: Ergebnisse Aramis-System:
 $90^\circ/90^\circ$ außen geschäftet (a) und $90^\circ/90^\circ$ innen geschäftet (b)

Gemäß den Ergebnissen aus den $90^\circ/90^\circ$ -Analysen stellen sich auch die äquivalenten Resultate der $90^\circ/0^\circ$ -Prüfkörper dar. So sind deutlich höhere maximale Scherwinkel bei innenliegenden lokalen Verstärkungslagen zu erkennen. Darüber hinaus ist in Abbildung 6.21 und Abbildung 6.22 zu erkennen, dass der Bereich maximaler Belastung

beziehungsweise Deformation erstens im Druckbereich des Prüfkörpers (obere Prüfkörperseite) und zweitens aus dem Übergangsbereich nicht wie erwartet ins Grundlaminat, sondern sich eher in den lokal verstärkten Bereich erstreckt. Diese auftretenden Deformationsmaxima sind direkt in Korrelation mit den oben betrachteten Versagensbildern. Während die Prüfkörper mit außenliegenden lokalen Verstärkungslagen durch Delaminationen versagen, die sich im dickwandigen Bereich ausbilden, erfolgt das Versagen bei Prüfkörpern mit innenliegenden lokalen Verstärkungen durch sogenanntes Knicken, beziehungsweise Scherknicken. Dies erfolgt in Grundlaminatlagen im dünnwandigen Bereich unmittelbar an den Wanddickenübergang angrenzend.

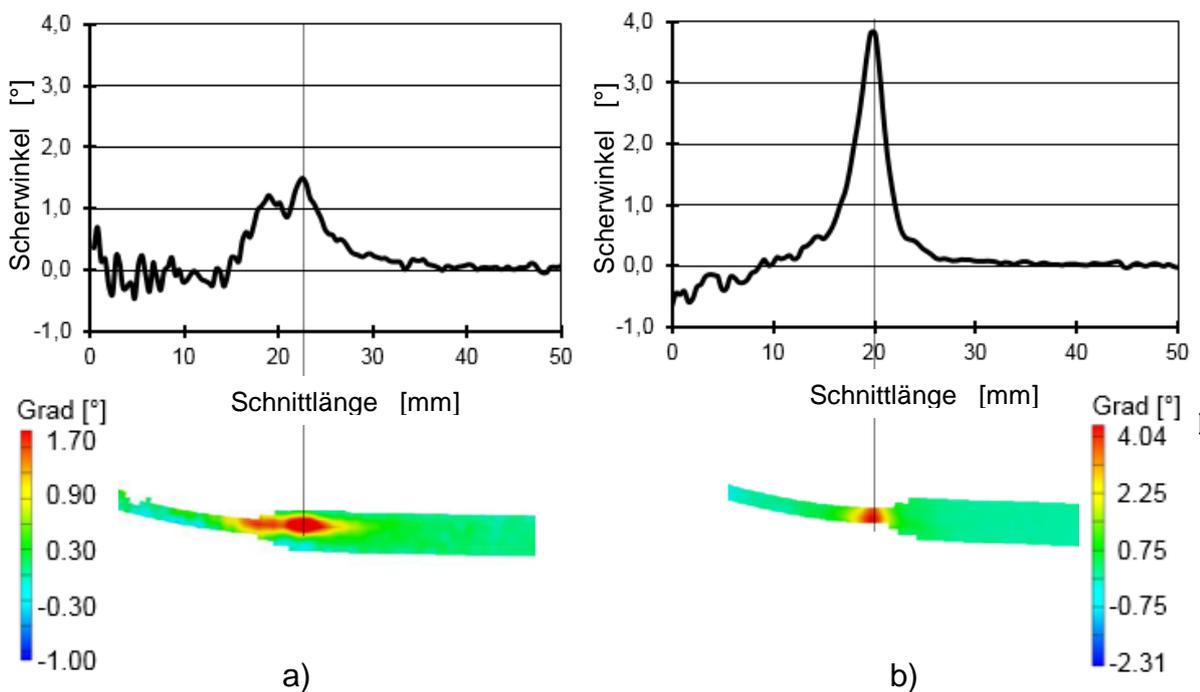


Abbildung 6.21: Ergebnisse Aramis-System:
 $90^{\circ}/0^{\circ}$ außen ungeschäftet (a) und $90^{\circ}/0^{\circ}$ innen ungeschäftet (b)

Bei lokalen Verstärkungen der Faserorientierungen $90^{\circ}/0^{\circ}$ wirken sich die Verstärkungsfasern so aus, dass insbesondere bei außenliegenden Verstärkungslagen erhöhte Deformationen im lokal verstärkten Bereich auftreten, welche schließlich zu Initialversagen durch Delamination führen. Prüfkörper mit innenliegender LV zeigen mit Scherwinkeln von über 4° eine maximale Deformation im Bereich des Grundlaminats, wo sie aufgrund der geringsten mechanischen Eigenschaften bereits erwartet wurde. Analog den Prüfkörpern mit lokalen Verstärkungen der Faserorientierung $90^{\circ}/90^{\circ}$ zeigt sich auch bei der $90^{\circ}/0^{\circ}$ -Variante mit innenliegenden lokalen Verstärkungen im geschäfteten Fall ($3,0^{\circ}$) ein um circa 25 % geringerer Scherwinkel, als bei ungeschäfteten

lokalen Verstärkungslagen mit $4,0^\circ$. Bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit $90^\circ/0^\circ$ -Orientierung zeigt sich dagegen erneut ein anderes Bild. Wie bereits bei den im Vorfeld dargestellten Ergebnissen der Zugprüfungen teilweise zu erkennen, wirkt sich in diesem Fall die Schäftung nicht dahingehend aus, dass sie zu geringeren maximalen Scherwinkeln führt. Bei geschäfteten Prüfkörpern mit $90^\circ/0^\circ$ Faserorientierungen zeigen sich maximale Scherwinkel von $2,4^\circ$ gegenüber ungeschäfteten Prüfkörpern mit $1,7^\circ$. Als Grund für diesen unerwartet hohen Scherwinkel im geschäfteten Fall der $90^\circ/0^\circ$ -Prüfkörper wird die bereits angesprochene fehlende Wirkung der Schäftung aufgrund von Textilien hohen Flächengewichts gesehen. Zudem kann ein Grund für die erhöhte Deformation bei geschäfteten Prüfkörpern eine fehlende Stützwirkung durch die Nachbarlagen im Druckbereich sein. Bei Prüfkörpern mit geschäftetem Wanddickenübergang kann es zu einer höheren Deformation als mit ungeschäftetem Übergang kommen, da die dem Grundlaminat benachbarte, unterste Lage der lokalen Verstärkung, welche sich im Druckbereich des Prüfkörpers befindet, keine Stützwirkung durch die Nachbarlagen erfährt, jedoch aufgrund ihrer Faserorientierung zur Kraftaufnahme wesentlich beiträgt.

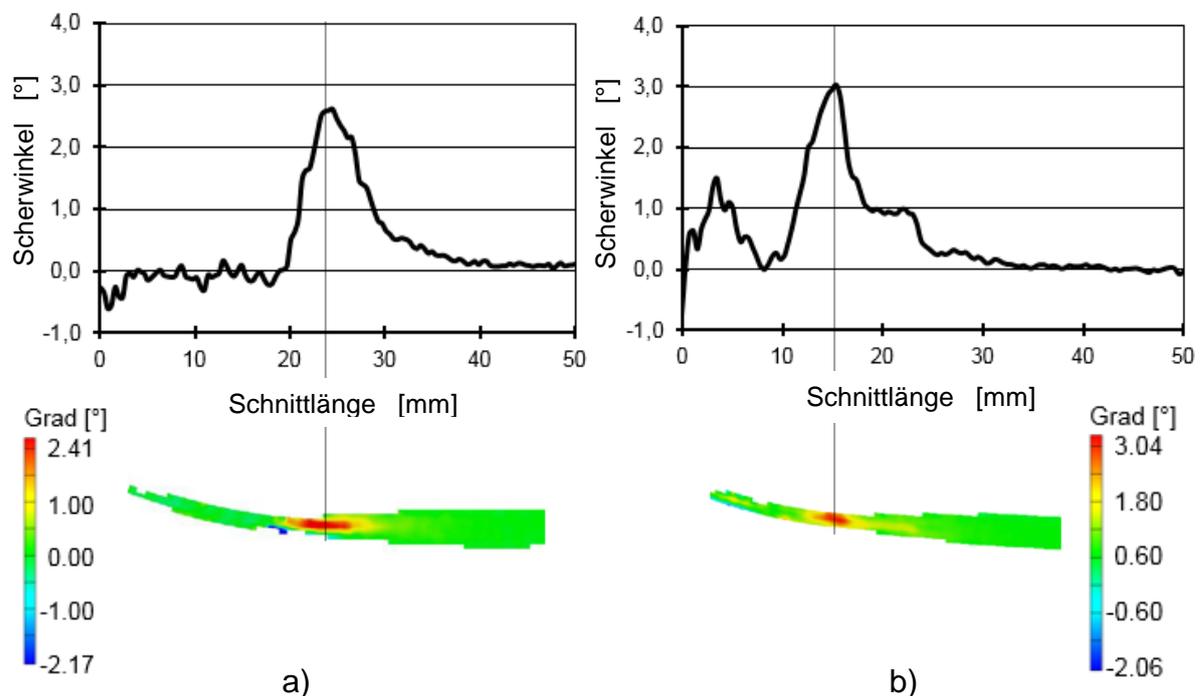


Abbildung 6.22: Ergebnisse Aramis-System:
 $90^\circ/0^\circ$ außen geschäftet (a) und $90^\circ/0^\circ$ innen geschäftet (b)

Zur direkten Gegenüberstellung der Scherwinkelverläufe der verschiedenen Faserorientierungen und Positionen der lokalen Verstärkungen in Dickenrichtung sind in Abbildung 6.23 die entsprechenden Scherwinkelverläufe aus den oben dargestellten Einzelbetrachtungen für den ungeschäfteten Wanddickenübergang gegenübergestellt. Der Ursprung der Schnittlinie liegt jeweils am Lasteinleitungspunkt der oberen Druckfinne und die Proben werden jeweils zentral zwischen die Auflager und Druckfinnen eingebracht, sodass eine Vergleichbarkeit der einzelnen Kurvenverläufe gegeben ist. Aus Abbildung 6.23 sind einerseits wieder die deutlich höheren Scherwinkel bei innenliegenden LV und andererseits die angesprochene unterschiedliche Position der Deformationsmaxima zu sehen. Während die $90^\circ/90^\circ$ innenliegende Verstärkung in einer maximalen Deformation bzw. Belastung im unverstärkten Grundlaminat resultiert, führt die Faserorientierung bei innenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungen zu einer Maximaldeformation unmittelbar im Übergangsbereich bei 18 mm.

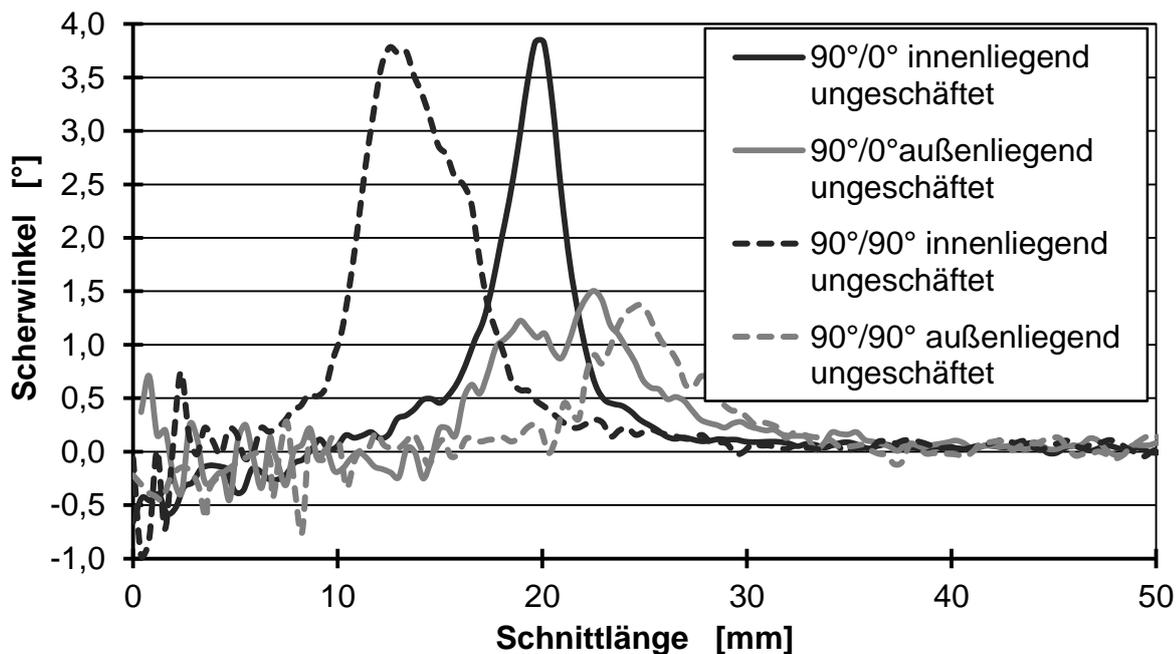


Abbildung 6.23: Scherwinkelverlauf lokal verstärkter Biegeprüfkörper mit ungeschäftetem WDÜ entlang der Probe

Analog zeigen sich die Scherwinkelverläufe der Prüfkörper mit geschäfteten Wanddickenübergängen, weshalb diese hier nicht aufgeführt sind.

6.3.3 Fazit

Hinsichtlich der Biegeeigenschaften ist ebenfalls der positive Einfluss der geschäfteten Gestaltung des Wanddickenübergangs zu erkennen. So ertragen Prüfkörper mit geschäfteten außenliegenden lokalen Verstärkungen unter Biegebelastung die höchsten Maximalkräfte und höchste Energieabsorption bis zur Maximalkraft. Außenliegende lokal verstärkte Prüfkörper führen zu vergleichsweise duktilem, beziehungsweise „gutmütigem“ Verhalten bis zum Totalversagen. Prüfkörper mit innenliegenden Verstärkungslagen führen dagegen unter Biegebelastung in hohen Maximalkräften und entsprechend hoher Energieabsorption bis zur Maximalkraft.

Dabei ist jeweils abzuwägen, ob eine maximale Lastaufnahme in der vorliegenden Belastungsrichtung zielführend ist, oder eine entsprechende Duktilität beziehungsweise Deformation bis zum Initialversagen für den Belastungsfall günstiger ist. Insbesondere bei außenliegenden $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen ist die mögliche Lastaufnahme geringer als bei anderen Varianten. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass der Prüfkörper im Rahmen der vorgestellten Versuchsanordnung nicht versagt, was auf dessen vergleichsweise geringer Biegesteifigkeit beruht.

Zusätzlich zu den mechanischen Ersatzkennwerten der Komponentenprüfungen konnten auch unter Biegebelastung die charakteristischen Versagensbilder der analysierten Prüfkörpervarianten abgeleitet und plakativ visualisiert werden. Gegensätzlich zu manchen anderen Resultaten stellen sich die Versagensbilder der verschiedenen Varianten sehr differenziert dar. Während die Versagensbilder der Laminat grundsätzlich auch unter Biegebelastung durch Delaminationsversagen geprägt sind, konnten in den Kapiteln 6.1.2 und 6.2.2 auch charakteristische Unterschiede in den Details aufgezeigt werden. Analog den im vorigen Kapitel vorgestellten Zugversuchen resultieren die verschiedenen Varianten an Prüfkörpern auch unter Biegung in individuellen Versagensbildern. So versagen Prüfkörper mit innenliegender lokaler Verstärkungslage unabhängig von deren Faserorientierung in einem sogenannten Versagen durch Scherknicken. Dabei versagen zunächst die unter Druck belasteten Fasern an der Prüfkörperoberseite, ehe es zu Delaminationen durch die lokalen Verstärkungslagen hindurch, oder an deren Rand entlang kommt. Während Prüfkörper mit außenliegenden Verstärkungslagen der Faserorientierung $90^\circ/90^\circ$ unter den gegebenen Bedingungen nicht versagen, kommt es bei außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslagen zu Delaminationen zwischen den lokalen Verstärkungslagen und dem Grundlaminat. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auch bezüglich der Biegebelastung aus den

durchgeführten Untersuchungen keine pauschal optimale Variante lokaler Verstärkungen abgeleitet werden kann. Die verschiedenen Laminatvarianten haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, die herausgestellt werden konnten und für Bauteilauslegungen im Einzelfall zu beachten sind.

7 Industrialisierungsmaßnahmen dreidimensionaler Bauteile

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den vorgelagerten Kapiteln wird der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Richtlinienkatalog für die Fertigung dreidimensionaler Bauteile im RTM- und Nasspressverfahren aufgeführt. Im Anschluss an die Vorstellung des Richtlinienkatalogs werden die darin aufgeführten essentiellen Gestaltungsregeln an einem ausgewählten Bestätigungsbau teil belegt.

7.1 Richtlinienkatalog

Die verschiedenen aufeinander aufbauende Analysen der FFV, der Füllsimulation, der Teilfüllungen, der Laminatherstellung, sowie der mechanischen Analysen zeigen in vielen Aspekten einheitliche Resultate und stützen so die abgeleiteten Erkenntnisse auf eine fundierte Basis. So ermöglichen die in den vorgestellten Untersuchungen generierten Erkenntnisse eine Erstellung der folgenden Richtlinien, beziehungsweise Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Bauteil- und Fertigungsprozessgestaltung:

- 1. Auf Basis der FFV, der Simulationen und der Teilfüllungen wird unabhängig von deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften dringend eine geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs empfohlen, um die Verstärkungsvariante $90^{\circ}/0^{\circ}$ bei einem zentral auf der Verstärkungslage befindlichen Linienangusskanal prozesssicher injizieren zu können.** Diese Maßnahme führt im Gegensatz zum Fall eines ungeschäfteten Wanddickenübergangs, in dem Lufteinschlüsse an der Laminatunterseite resultieren, zu einem sehr gleichmäßigen Fließfrontverlauf. Eine Tatsache, die jedoch damit in Kauf genommen werden muss, sind höhere Schließkräfte und vergleichsweise hohe Injektionsdrücke, die bereits bei der Anlagenauslegung berücksichtigt werden müssen. Demgegenüber können $90^{\circ}/90^{\circ}$ -Varianten auch mit ungeschäftetem Wanddickenübergang durchwegs prozesssicher und ohne Lufteinschlüsse imprägniert werden.
- 2. Im Gegensatz zu der in Punkt 1 aufgeführten Erkenntnis zeigen Versuche mit versetzt zur Verstärkungslage parallel liegendem Linienangusskanal im Glasplattenwerkzeug und auf Laminatenebene in sämtlichen Halbzeugvarianten ein gleichmäßiges Füllverhalten ohne Lufteinschlüsse. Somit stellt sich der Imprägnierprozess bei diesem Angusszenario unabhängig von der Gestaltung des Wanddickenübergangs stabil dar, was dem Konstrukteur eine**

freie Gestaltung des Wanddickenübergangs mit Augenmerk auf die mechanischen Eigenschaften und die vorherrschenden Bauraumanforderungen eröffnet.

3. Der permeabilitätsbeeinflussende Charakter von Vernähungen konnte in verschiedenen Analysen, wie der Werkstoffcharakterisierung und der Fließfrontvisualisierung dargestellt und bestätigt werden. So eilt das Fluid im Nahtbereich sowohl in Längs- als auch Dickenrichtung der Naht je nach Permeabilität des verwendeten Textils, der Faserorientierung des Textils im Bauteil und der relativen Orientierung von Angussverteilerkanal und Fixierungsnaht parallel, oder senkrecht zueinander mehr, oder weniger stark vor. **Um den fließfrontbeeinflussenden Charakter der Fixierungsnähte bei der Auslegung von Bauteilen beachten und auch für die Fließfrontsteuerung nutzen zu können, wird empfohlen Fixierungsnähte insbesondere bei Verstärkungstextilien mit geringem Permeabilitätsniveau einzusetzen, um eine gleichmäßige Fließfrontprogression zu erwirken. Aufgrund des untergeordneten Einflusses der Fixierungsnähte auf die Fließfrontprogression bei Faserwerkstoffen hoher Permeabilität ist der Bauteilkonstrukteur insbesondere im Fall von Glaslege- und Glaswirmatten im Grundlaminat und Kohlenstofffaserlegen in der LV in der Positionierung der Vernähungen frei.**
4. Während im Rahmen der Interpretation und Richtlinienerstellung vornehmlich die Lamine mit außenliegenden lokalen Verstärkungen skizziert sind, gelten die Richtlinien analog für Bauteile mit innenliegenden lokalen Verstärkungen. Dies kann dadurch begründet werden, dass sich textile Halbzeuge mit innenliegenden LV in deren Imprägnierverhalten analog außenliegenden verhalten.
5. **Die Herstellung von Bauteilen mit lokalen Verstärkungslagen aus dem Faserdirektablagewerkstoff wird grundsätzlich Abstand genommen und wird für weiterführende Industrialisierungsprozesse ohne faserstabilisierende Zwischenschritte für Großserienprozesse nicht empfohlen.** So konnten Lamine mit lokalen Verstärkungen aus dem Faserdirektablagewerkstoff auf Kohlenstofffasergelege-Grundlaminaten in verschiedenen Varianten weder im RTM-, noch im Nasspressverfahren in guter Qualität hergestellt werden.
6. Anhand der erstellten Laminatqualitätscharakterisierung konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den gefertigten Varianten insbesondere im Bereich des Wanddickenübergangs festgestellt werden. So führen sämtliche Aufbauten textiler Halbzeuge mit ungeschäftetem Wanddickenübergang zu Reinharzbereichen am Rand der lokalen Verstärkungen, welche sich einerseits fließfrontbeeinflussend verhalten.

einflussend auswirken, aber auch negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausüben. So fungieren diese Reinharzbereiche als Schwachstellen im Laminat und stellen häufig den Initialpunkt der Versagensbilder dar. Während sich bei außenliegenden lokalen Verstärkungslagen diese Reinharzbereiche großflächiger ausprägen, führen bei innenliegenden lokalen Verstärkungen die ondulierten Grundlaminatlagen dazu, dass sich die Reinharzbereiche kleiner in der Fläche, jedoch sowohl an der Laminatoberfläche, als auch im Zentrum ergeben. Während $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierungen in den lokalen Verstärkungen bei den betrachteten Fällen aufgrund deren geometrischer Gegebenheiten und geringerer Adaptierbarkeit zu großflächigeren Reinharzbereichen führen, ergeben sich bei $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen kleinere Reinharzsektionen, was auf die höhere Flexibilität der Fasern in Querrichtung zur lokalen Verstärkung zurückgeführt wird. Im Fall der Halbzeuge mit $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungslagen verlagern sich die Fasern aufgrund diverser wirkender Kräfte an die Randzonen der Werkzeugtaschen. Dies führt zu verringerten Reinharzbereichen. Während bei ungeschäfteten Wanddickenübergängen selbst bei $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierungen harzreiche Zonen auftreten, ist es möglich, diese durch einen geschäfteten Wanddickenübergang großteils zu eliminieren. Bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit $90^\circ/0^\circ$ -Faserorientierungen sind kleinflächige harzreiche Sektionen erkennbar, wohingegen sich bei innenliegenden Verstärkungslagen sowie bei außenliegenden lokalen Verstärkungen mit $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung und geschäftetem Wanddickenübergang keinerlei Reinharzbereiche ausbilden. **Somit wird rein aus laminatqualitativer Sicht empfohlen bei der Bauteilkonstruktion einen geschäfteten Wanddickenübergang zu wählen, um dadurch diese Reinharzbereiche in ihrer Fläche zu reduzieren bzw. ganz zu eliminieren. Für den Fall einer Faserorientierungsfreiheit in den lokalen Verstärkungslagen, zum Beispiel weil ausschließlich Auszugskräfte von In-, oder Onserts übertragen werden müssen, wird zudem empfohlen eine $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung zu wählen, um zusätzlich die Reinharzbereiche aufgrund der flexibleren Faserstruktur zu minimieren.**

7. **Zudem ist der Bauteilkonstrukteur auch vor dem Hintergrund der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Verstärkungsvarianten angehalten einen geschäfteten Wanddickenübergang zu wählen.** So ist hinsichtlich der Zug- und Biegeeigenschaften ebenfalls der positive Einfluss der geschäfteten Gestaltung des Wanddickenübergangs zu erkennen, was sich in einer Erhöhung und Verbesserung des Versagensniveaus äußert.
8. **Darüber hinaus sind die Konstrukteure dringend angehalten die Hauptbelastung der Bauteile insbesondere im Fall lokal verstärkter Bauteile in die Auslegung der Lagensequenz einzubringen.** Während unter Zugbelastung

Prüfkörper mit geschäfteten außenliegenden lokalen Verstärkungen die höchsten Maximalkräfte und höchste Energieabsorption bis zur Maximalkraft ertragen, führen unter Biegebelastung die außenliegenden lokalen Verstärkungen zu vergleichsweise duktilem, beziehungsweise „gutmütigem“ Verhalten bis zum Totalversagen. Prüfkörper mit innenliegenden Verstärkungslagen führen dagegen unter Zugbelastung zu Delaminationen im Bereich der Wanddickenübergänge. Unter Biegebelastung resultieren diese in hohen Maximalkräften und entsprechend hoher Energieabsorption bis zur Maximalkraft.

Während unter Zugbelastung die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper mit außenliegenden Verstärkungslagen besser sind, weil die durchgehenden, maximal belasteten und in den Spannbacken fixierten Fasern in diesem Fall linear vorliegen, stellt sich das Eigenschaftsbild unter Biegebelastung anders dar. Im Biegeversuch weisen Prüfkörper mit innenliegenden Verstärkungslagen höhere mechanische Eigenschaften auf, weil durch die innenliegenden lokalen Verstärkungen die Fasern der Grundlaminatlagen in Prüfkörperlängsrichtung aus dem Bereich der neutralen Faser herausgebracht werden, was das Flächenträgheitsmoment und damit das Biege widerstandsmoment erhöht.

- 9. Final ist der Konstrukteur darüber hinaus angehalten, die Belastungsarten und nicht tolerierbaren Versagensbilder vorab genau festzulegen, ehe über verschiedene Aspekte eine adäquate Bauteilauslegung erfolgen kann.** So konnten zusätzlich zu den mechanischen Ersatzkennwerten der Komponentenprüfungen sowohl unter Zug-, als auch unter Biegebelastung die charakteristischen Versagensbilder der verschiedenen Prüfkörpervarianten abgeleitet und plakativ visualisiert werden. Die entsprechenden Versagensbilder der verschiedenen Varianten stellen sich sehr differenziert dar. Während die Versagensbilder der Laminatlagen grundsätzlich sowohl in den Zug-, als auch den Biegeversuchen durch Delaminationsversagen geprägt sind, konnten in den Kapiteln 6.1.2 und 6.2.2 auch charakteristische Unterschiede in den Details aufgezeigt werden. So ergeben sich im Ondulationsbereich des Grundlaminats, beziehungsweise im Bereich des Wanddickenübergangs bei lokal verstärkten Prüfkörpern mit innenliegenden lokalen Verstärkungen unter Zugbelastung Delaminationen. Das Totalversagen der Grundlaminatlagen tritt dagegen durch Faserbruch der Grundlaminatfasern auf, was zu Schälkräften im verstärkten Bereich und zu Abtrennung der lokalen Verstärkungslagen nach dem Versagen führt. Bei außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungsfasern resultieren Schubkräfte zwischen den $+45^\circ$ und -45° -Lagen, die in frühzeitiger, heftiger Delamination resultieren, während bei $90^\circ/90^\circ$ -Verstärkungsfasern durch Zwischenfaserbrüche Delaminationen senkrecht zur Zugrichtung auftreten und dadurch weiße

Nähfäden sichtbar werden. Analog den Zugversuchen resultieren die verschiedenen Varianten an Prüfkörpern auch unter Biegung in individuellen Versagensbildern. So versagen Prüfkörper mit innenliegender lokaler Verstärkungslage unabhängig von deren Faserorientierung in einem sogenannten Versagen durch Scherknicken. Dabei versagen zunächst die unter Druck belasteten Fasern an der Prüfkörperoberseite, ehe es zu Delaminationen durch die lokalen Verstärkungslagen hindurch, oder an deren Rand entlang kommt. Während Prüfkörper mit außenliegenden Verstärkungslagen der Faserorientierung $90^\circ/90^\circ$ unter den gegebenen Bedingungen nicht versagen, kommt es bei außenliegenden $90^\circ/0^\circ$ -Verstärkungslagen zu Delaminationen zwischen den lokalen Verstärkungslagen und dem Grundlaminat. Dementsprechend ist es nicht möglich eine pauschale Empfehlung auf Basis der auftretenden Versagensbilder abzugeben.

7.2 Bestätigungsbauteil

In diesem Abschnitt wird die Fertigung eines dreidimensionalen Demonstrator- bzw. Bestätigungsbauteils mit lokalen Verstärkungen vorgestellt, um die angeführten Richtlinien in die dreidimensionale Geometrie übertragen beziehungsweise validieren zu können. So werden daran die abgeleiteten Charakteristika sowohl hinsichtlich des Injektionsprozesses als auch der Laminatqualität beleuchtet.

7.2.1 Vorgehensweise

Bei dem beschriebenen Bauteil handelt es sich um ein im RTM-Verfahren hergestelltes Demonstratorbauteil aus der Bodengruppe des BMW i3. An diesem Bauteil wird im Fahrzeug zur Lasteinleitung hinter die CFK-Komponente ein großflächiges Metallteil eingebracht. Um das Leichtbaupotential zu erhöhen und die Lasteinleitung ohne dieses Metallteil zu ermöglichen, wird im Gegensatz zum ursprünglich unverstärkten, flächigen CFK-Bauteil ein beidseitig lokal verstärktes Bauteil hergestellt. An diesem Bauteil kann die Lasteinleitung im lokal verstärkten Bereich über deutlich verkleinerte Lasteinleitungselemente aus Metall realisiert werden, was zu einer Gewichtsreduzierung um circa 18% im Vergleich zum Serienstand führt.

Anhand dieses Bauteils wird die RTM-Prozesskette exemplarisch durchlaufen, indem die lokale Verstärkung als trockenes Gelege nach dem Preformingprozess appliziert und mittels einer Portalnähanlage analog den vorgestellten Laminaten mit einem Doppelsteppstich der Stichlänge 4 mm mit Hilfe des Nähgarns B7E20948 der Firma TWD

Fibres fixiert wird. Anschließend erfolgt die Injektion des lokal verstärkten textilen Halbzeugs im Hochdruck-RTM-Verfahren, bevor daran Qualitätskontrollen über Schnitt- und Schliffbilder durchgeführt werden.

Die zur Befähigung der Technologie in 3D verwendete Geometrie ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Dabei ist in rot der lokal verstärkte Bereich gekennzeichnet, der aufbauend auf Ergebnissen der Struktursimulation beidseitig mit jeweils zwei Lagen Kohlenstofffasergelegen mit einem Flächengewicht von 300 g/m^2 verstärkt wird. Die Fasern in den lokalen Verstärkungslagen sind aus Gründen der Mechanik parallel zur Hauptorientierung der Verstärkungen ausgerichtet. Die vier Durchbrüche für die Einbringung der Lasteinleitungselemente, wie sie für die Version mit lokaler Verstärkung verwendet werden, sind in dieser Abbildung gekennzeichnet. Wichtig zur Analyse der Bauteilfertigung ist der in Abbildung 7.1c dargestellte Querschnitt der Bauteil- bzw. Kavitätsflächen im Bereich der lokalen Verstärkungslagen. Während die links dargestellten Wanddickenübergänge über einen S-Schlag zur Abbildung eines ungeschäfteten Wanddickenübergang realisiert sind, ist der rechts aufgeführte Wanddickenübergang auf der Angussseite zur Gegenüberstellung geradlinig gemäß der geschäfteten Wanddickenübergänge umgesetzt.

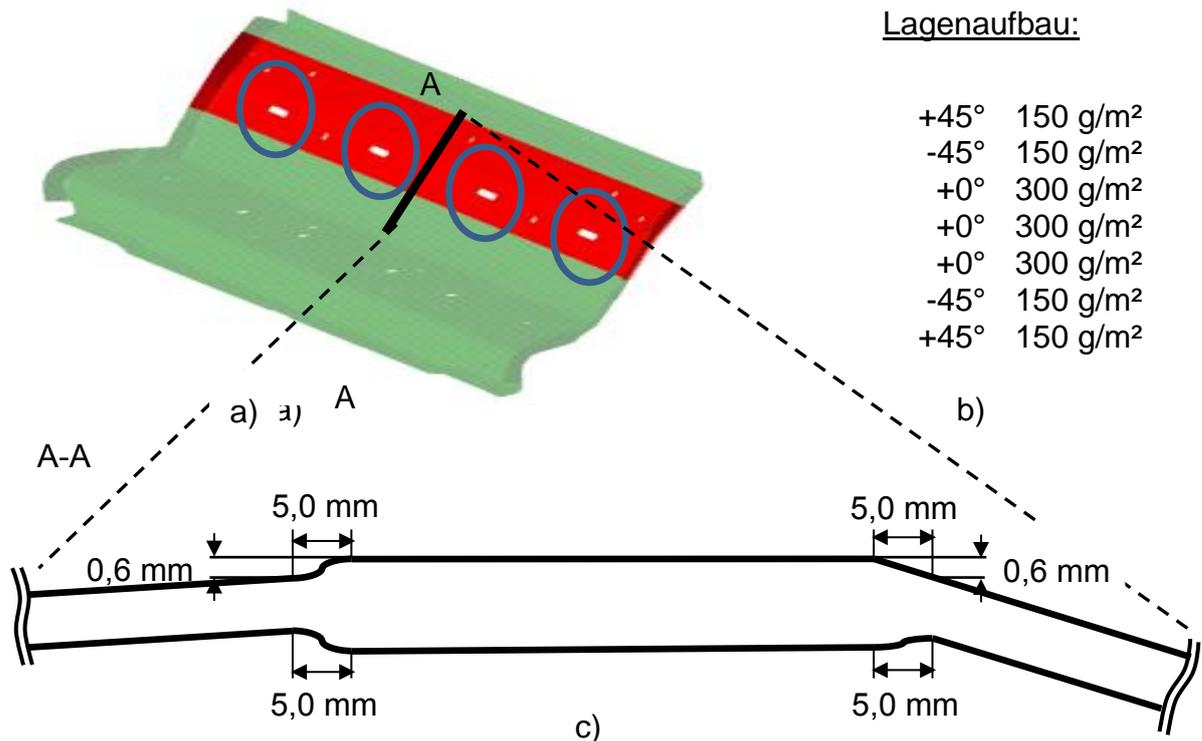


Abbildung 7.1: RTM-Demonstratorbauteil mit lokalen Verstärkungen (a), Lagenaufbau des grün dargestellten Grundlaminats (b) und Schnittdarstellung des lokal verstärkten Bereichs (c)

Als Ausgangswerkstoffe für die Untersuchungen auf Bauteilebene werden analog den Basisuntersuchungen auf Laminatenebene Kohlenstofffasergelege der Firma SGL ACF und das Harzsystem der Firma Hexion verwendet. Während die textilen Lagenaufbauten auf Stackinganlagen der Firma Fill GmbH Gurten in Wackersdorf gestapelt und anschließend auf Preforming Anlagen der Firma Fill am Standort Landshut drapiert werden, erfolgt die Fixierung der lokalen Verstärkungslagen auf einer Portalnähanlage der Firma Pfaff Industriesysteme und Maschinen GmbH, Kaiserslautern. Eine reine Binderfixierung kann für die Großserie prozessbedingt nicht zielführend sein. Aufgrund der Unterteilung des sogenannten Preformingprozesses in Heizstation, anschließendem Transfer, Formgebungsschritt und Abkühlung ist zur prozesssicheren Gestaltung der sequenziellen Abfolge eine kontinuierliche Fixierung erforderlich. Dies ist über Fixierungsnähte, nicht jedoch Binderfixierungen gewährleistet. Der Injektionsprozess wird schließlich im CFK-Technikum der BMW Group am Standort Landshut auf einer 15.000 kN-Pressen der Firma Övermann GmbH & Co.KG, Lübbecke durchgeführt. Dabei beträgt die Werkzeugtemperatur während der Injektion 120 °C und die Temperaturen der Harzkomponenten liegen für das Harz bei 80 °C und für den Härter bei 40 °C.

7.2.2 Richtlinienbestätigung

Um zunächst die vorgestellten Richtlinien im Hinblick auf den Imprägnierprozess zu beleuchten, werden Teilfüllungen am Bestätigungsbauteil vorgestellt. Anschließend werden Schnitt- und Schliffbilder aufgeführt, welche an den Bauteilen sowohl im Bereich von Vernähungen, als auch dazwischen erstellt werden.

In Abbildung 7.2 ist eine exemplarische Teilfüllung des Bestätigungsbauteils dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Visualisierung der Fließfrontposition bei 50 % des Injektionsgewichts beziehungsweise Volumens. Zusätzlich zu den lokalen Verstärkungslagen (Strich-Linien) sind in dieser Darstellung die Vernähungen (Punkt-Strich-Linien), die Fließfrontposition schwarz-weiß und der Angussverteilerkanal (Punkt-Linien) markiert. Es ist wichtig in dieser Ansicht die eingebrachten Wanddickenübergänge gemäß der Darstellung in Abbildung 7.1c zu berücksichtigen. In dieser Ansicht ist die Seite mit dem einseitig eingebrachten Angussverteilerkanal oben und die entsprechende Rückseite unten dargestellt. Daran ist der negative Einfluss des ungeschäftet gestalteten Wanddickenübergangs sehr gut zu sehen. Wie auch in Kapitel 5.3.3 aufgeführt, strömt das Injektionsmedium im Bereich des ungeschäfteten Wanddickenübergangs direkt über den Angussverteilerkanal gespeist (analog Abbildung 5.15) voraus und schließt je nach Positionierung des lokal verstärkten Preforms Luft im Bauteil ein. Anhand des auf der Abbildung unten dargestellten Wanddickenübergangs, der linear ausgeführt ist, kann dagegen erkannt werden, dass diese Gestaltung ein Vorseilen verhindert und zu einer stabilen Fließfront führt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass eine einseitig geradlinige Gestaltung des Wanddickenübergangs auf der Angussseite bereits diese Fließfrontstabilisierung hervorruft. Dieses Bild bestätigt unmittelbar die Forderung nach einer geradlinigen Gestaltung des Wanddickenübergangs zur Stabilisierung der Fließfrontprogression.

Was dieser repräsentativen Darstellung von fünf Teilfüllungen mit 50 %igem Füllgrad ebenfalls entnommen werden kann, ist ein sehr geringer Einfluss der Fixiergenähte auf den Fließfrontverlauf. So fördern die Nähte bei paralleler Ausrichtung zwischen Verstärkungsfasern und Fließfrontprogression den Fluidfluss bei den verwendeten Kohlenstofffasergelegen weder in Ebenen-, noch in Dickenrichtung sichtlich. Dies bekräftigt die Forderung nach einer Fixierung der lokalen Verstärkungslagen über Vernähungen, wie im Richtlinienkatalog gefordert.

Darüber hinaus ist in dieser Darstellung eine voreilende Fließfront an Rändern des Grundlaminats erkennbar, was an der Grundgeometrie des vorher bereits bestehenden Werkzeugs liegt und über Radienanpassungen verhindert werden kann, mit der Industrialisierung lokal verstärkter Bauteile aber unmittelbar nichts zu tun hat.

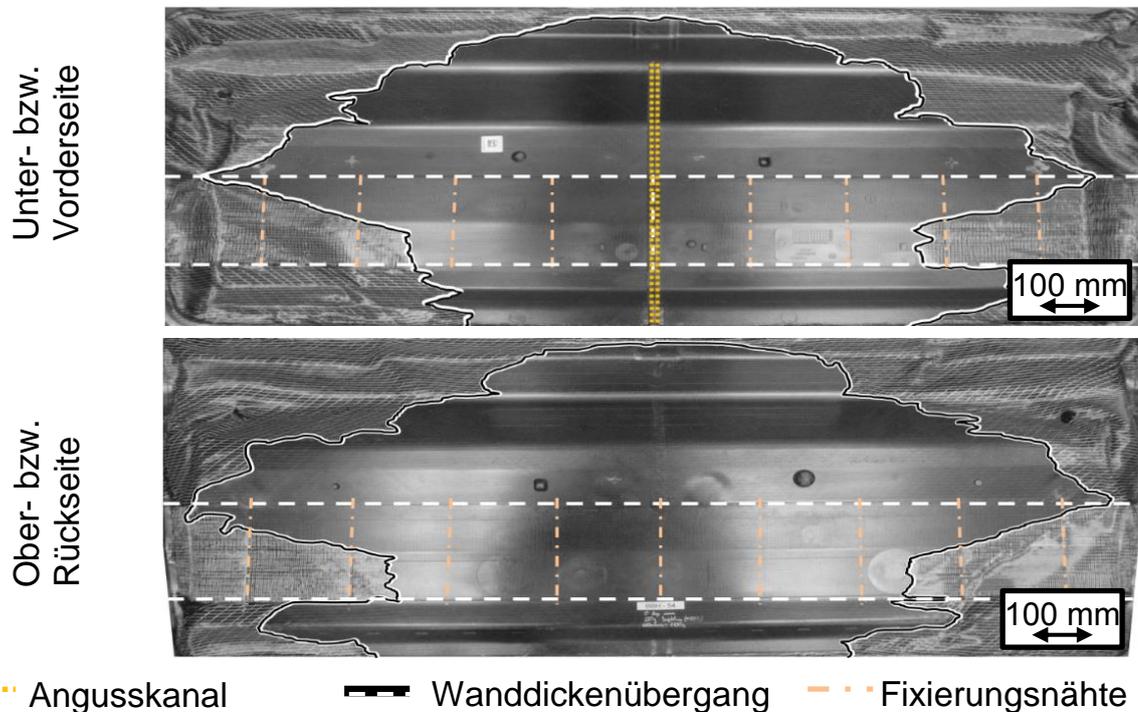
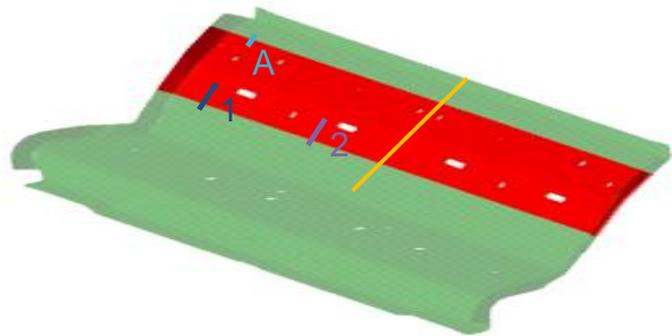


Abbildung 7.2: 50%-Teilfüllung des RTM-Demonstratorbauteils mit LV

Während die gefertigten Bauteile prozessbedingt mit außenliegenden Verstärkungslagen realisiert wurden, wird eine entsprechende Fertigung mit innenliegenden LV auf Basis der Erfindungsmeldung DE 10 2014 224 741 A1 gemäß Kapitel 7.1 ebenfalls positiv bewertet.

Einen Einblick in die Laminatqualität der hergestellten Bestätigungsbauteile ermöglicht Abbildung 7.3. Dort sind zwei repräsentative Schnittbilder sowie ein Schliffbild am Wanddickenübergang zwischen lokal verstärktem und unverstärktem Bereich aufgeführt. Aus den dargestellten Schnittbildern sowie aus dem Schliffbild ist zu sehen, dass es sowohl in den ungeschäfteten, als auch den geschäfteten Wanddickenübergängen möglich ist, eine sehr gute Laminatqualität im RTM-Verfahren herzustellen. Sowohl am angussnäheren Schnitt 2, als auch im Bereich der Entlüftungsbausteine in den Bauteillecken sind weder Lufteinschlüsse, noch Poren im Laminat zu finden. Während in den Analysen aus Kapitel 6.1 an den ungeschäftet gestalteten Wanddickenübergängen Reinharzbereiche identifiziert werden konnten, ist dies im Fall des Bestätigungsbauteils nicht der Fall. Dies wird auf die Geometrie des Bauteils und damit verbundene

diverse Effekte zurückgeführt. So können Faserumlenkungen über Radien den Fasern eine im Vergleich zum geradlinigen Faserverlauf der Laminat erhöhte Bewegungsfreiheit einräumen. Die Fasern haben damit die Möglichkeit sich an die Wanddickenübergänge besser anzulegen, die Kavität zu füllen und führen somit zu einer Reduktion von Reinharzbereichen am Wanddickenübergang. Dieser Sachverhalt zeigt sehr gut die Erfordernis grundlegende, möglichst allgemeingültige Gestaltungsrichtlinien an vergleichsweise einfachen Geometrien zu erarbeiten, um die zu analysierenden Parameter, wie zum Beispiel die Gestaltung des Wanddickenübergangs möglichst von sämtlichen zusätzlichen Einflussparametern zu separieren. Da eine Einordnung der Erkenntnisse an komplexen Geometrien nicht eindeutig hätten zugeordnet werden können, wurden die Grundlagenversuche wie vorgestellt, an den Laminaten erarbeitet.



Schnittfläche 1 (angussfern):



Schnittfläche 2 (angussnah):



Schliifffläche A:



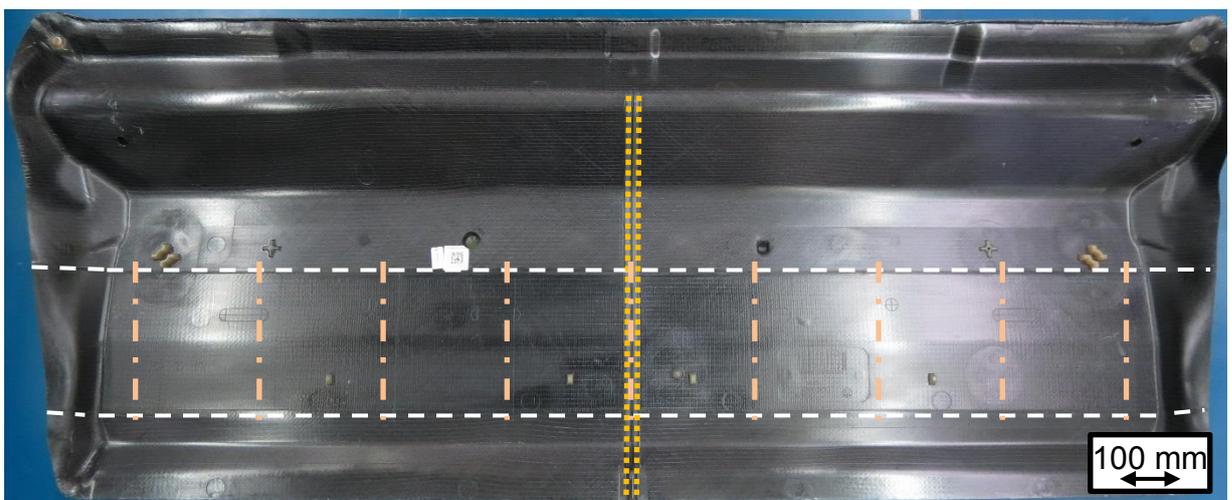
— Angussverteilerkanal ■ Lokal verstärkter Bereich

Abbildung 7.3: Laminatqualität des Bestätigungsbauteils

Zur Darstellung der guten erzielten Laminatqualität ist in Abbildung 7.4 ein exemplarisches Bestätigungsbauteil aus einer Serie von 40 Bauteilen dargestellt. Daran kann die sowohl auf der Ober-, als auch Unterseite sehr hohe Qualität im Grundlaminat und ebenso im Bereich der lokalen Verstärkungen erkannt werden.



a)



b)

..... Angusskanal

▬ Wanddickenübergang

- - - - - Fixierungsnähte

Abbildung 7.4: Bestätigungsbauteil:
Ober- bzw. Rückseite (a) und
Unter- bzw. Vorderseite (b)

Über die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse aus der Imprägnierung des dreidimensionalen Demonstratorbauteils kann der Übertrag der Erkenntnisse aus den fundierten Laminatuntersuchungen sehr gut auf die dreidimensionale Bauteilgeometrie

übertragen werden. Der ungeschäftet gestaltete Wanddickenübergang mit querliegendem Angussverteilerkanal führt analog den Laminatuntersuchungen zu Harzvoreilen sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite an den Wanddickenübergängen. Durch eine Entlüftung in den Eckbereichen des Bauteils kann aber dennoch eine gute Laminatqualität erzielt werden, die anhand von Schnitt- und Schliffbildern, die exemplarisch aufgeführt sind, belegt wird. Durch eine geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs kann einerseits die Gleichmäßigkeit der Fließfront erhöht und andererseits die verarbeitbare Positionstoleranz ausgeweitet werden (siehe vorherige Kapitel), was eine prozesssichere Imprägnierung ermöglicht.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf dem Stand der Technik aus Kleinserienfertigungsprozessen mit lokalen Verstärkungen und den Aspekten der Großserienfertigung ohne lokale Verstärkungen, war es Motivation dieser Arbeit darauf aufbauend die Fertigung lokal verstärkter Bauteile im Großserienmaßstab zu befähigen. So konnte im Rahmen der vorgestellten Analysen eine ganzheitliche Befähigung der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge im RTM- und Nasspressverfahren dargestellt werden. Es wurden die für die Imprägnierung bedeutendsten Einflussparameter von der Werkstoffcharakterisierung über den Injektionsprozess samt dessen virtueller Abbildung bis hin zum Einfluss der Variationsparameter auf die mechanischen Eigenschaften umfangreich analysiert. Die Ergebnisse konnten modellhaft aufbereitet und veranschaulicht werden. So wurden die Fließfrontverläufe über eine umfangreiche Systemtechnik und intelligente Aufbereitungsart visualisiert. Darüber hinaus wurden die qualitativen Fließfrontbilder über einen im Rahmen dieser Untersuchungen generierten und etablierten Fließfrontquotienten quantifizierbar gemacht. Auf den so generierten Erkenntnissen wurde die virtuelle Abbildung des Imprägnierprozesses lokal verstärkter Halbzeuge im RTM-Verfahren weg von der zweidimensionalen, hin zur dreidimensionalen Darstellung modifiziert, um die Komplexität der Fließfrontprogression in ausreichendem Maß erfassen zu können. Die mechanischen Eigenschaften der lokal verstärkten Prüfkörper konnten zum Beispiel an einer Kettendarstellung im Zugversuch modelliert und deren Versagensarten in den Belastungsarten Zug und Biegung plakativ dargestellt werden.

Anhand den erzielten Ergebnissen wurden Richtlinien erstellt, um den Konstrukteuren und Technologen für zukünftige Produktentwicklungsprozesse ein Konstruktionswerkzeug bereitzustellen und Entwicklungs- bzw. Industrialisierungsprozesse effizienter zu gestalten. Für die Auslegung von Bauteilen mit lokalen Verstärkungen können jedoch nicht für alle Parameter allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aufgebaut werden. Vielmehr ist es für Auslegungsprozesse essentiell den im Rahmen dieser Arbeit vermittelten Umfang der Einflussfaktoren zu verstehen und zu berücksichtigen, um lokal verstärkte Bauteile nachhaltig und gesamtheitlich auslegen zu können. Im bauteilbezogenen Industrialisierungs- bzw. Befähigungsprozess sind zusätzliche bauteil- und geometriespezifische Einflussfaktoren zu beachten, wie dies auch anhand des vorgestellten Bestätigungsbauerteil der Fall ist.

Was hinsichtlich der Ergebnisse allgemein konstatiert werden kann, ist, dass eine wirtschaftlich gefertigte und geschäftete Gestaltung des Wanddickenübergangs durchwegs sinnvoll ist. Zusätzlich wird die Fixierung lokaler Verstärkungslagen durch Vernähungen, sowohl für den RTM-Prozess, als auch für den Nasspressprozess als erforderlich und am geeignetsten eingestuft. Deren Einfluss auf die Fließfrontprogression bei den gewählten Nähparametern und Werkstoffkombinationen ist zudem auf Basis der generierten Erkenntnisse als gering zu sehen. Zu den positiven Einflüssen hinsichtlich der Fixierung der lokalen Verstärkungen und der Steuerbarkeit der Fließfrontprogression konnten anhand der verwendeten Werkstoff- und Parameterkombinationen auch im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften keine vorab erwarteten Initialversagen in den Fixierungsnähten und dadurch hervorgerufene Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden.

Von der Herstellung lokal verstärkter Bauteile aus FDA als lokale Verstärkung und Kohlenstofffasergelege als Grundlaminat in den hier beleuchteten Imprägnierprozessen wird aufgrund zu hoher, inhomogener Permeabilitätsunterschiede und nicht ausreichender Positionsstabilität in der lokalen Verstärkung auf Basis der durchgeführten Untersuchungen Abstand genommen. Die weiteren analysierten Alternativwerkstoffe (Glasgelege und Glaswirrfasermatten als Grundlaminatlagen) werden dagegen, basierend auf den erlangten Erkenntnissen hinsichtlich der Fertigung im RTM-Verfahren und der Analyse der resultierenden Qualität als sehr gut herstellbar deklariert. Zudem werden diese Werkstoffe in ausgewählten Anwendungsfällen aufgrund der gewichts- und kostenspezifischen mechanischen Eigenschaften als ökonomisch sinnvolle Alternative zu reinen Kohlenstofffaserhalbzeugen gesehen.

Aufbauend auf den vorgestellten Untersuchungen wird zur vollumfänglichen Analyse und fundierten Befähigung der gesamten Prozesskette zur Herstellung lokal verstärkter Bauteile die Beleuchtung verschiedener Arbeitspakete im Rahmen aufbauender Untersuchungen empfohlen.

Im Handlungsfeld der Imprägnierprozesse sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Positionstoleranzanalyse durchzuführen. Auf diese Weise soll die prozesssichere Fertigung lokal verstärkter Bauteile, die im Rahmen dieser Arbeit in ihren Imprägnieraspekten analysiert und anhand verschiedener Variationsparameter beleuchtet wurde, hinsichtlich der Prozessketteneinflüsse abgesichert werden. Mit entsprechendem Industrialisierungsfokus hat dies nicht an der vorgestellten Vielzahl an Varianten zu erfolgen, sondern an einer zielgerichteten, belastungsdedizierten Konstellation.

Zudem sind in weiteren Versuchen die Auswirkungen von Harzalterungen während des Injektionsprozesses zu analysieren. Insbesondere bei der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge kann eine Harzalterung, die mit einer Zunahme der Harzviskosität verbunden ist, zu einer Beeinflussung der Fließfrontprogression führen. Damit diese Einflüsse vor einer Serienfertigung umfassend beleuchtet werden, wird ein Forschungsprojekt in diesem Themenfeld vorgeschlagen.

Darüber hinaus werden weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Automatisierung insbesondere im Bereich der textilen Handhabungsschritte empfohlen, damit die gesamte Prozesskette bis zum finalen Bauteil vollautomatisiert und innerhalb der erforderlichen Toleranz- und Systemgrenzen bei optimaler Taktzeit erfolgen kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Life-Drive-Konzept des BMW i8 (s. [Pas14]).....	15
Abbildung 1.2: Wirtschaftlicher Werkstoffvergleich anhand der Kosten eines Demonstratorbauteils (s. [HMS+12]).....	16
Abbildung 1.3: Zugfestigkeit von Verbundstrukturen in Abhängigkeit des Winkels zwischen Faser- und Lastrichtung (s. [Ehr06])	19
Abbildung 2.1: Arbeitspakete zur Absicherung der technologischen Machbarkeit lokal verstärkter Bauteile im RTM- und Nasspressprozess.....	21
Abbildung 3.1: CFK-Komponenten im Airbus A380 (s. [Dud09])	26
Abbildung 3.2: Lokal verstärkter Lagenaufbau zur Herstellung eines Niederdruckverdichter Fanblattes im VARI-Verfahren (s. [Dud09])	27
Abbildung 3.3: RTM-Prozesskette vom textilen Halbzeug bis zum FKV-Bauteil in Anlehnung an (s. [HeM11])	30
Abbildung 3.4: Prozessablauf im Resin Transfer Moulding-Verfahren (s. [HeM11])	31
Abbildung 3.5: Prozessablauf im Nasspressverfahren in Anlehnung an (s. [Ber16])	33
Abbildung 3.6: Definition der Permeabilitätsachsen eines Textils in Anlehnung an (s. [LGA+08]).....	40
Abbildung 3.7: Mechanische Prüfung von FKV-Komponenten mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden (s. [Rou06]).....	44
Abbildung 3.8: Gestaltungsregeln für FKV mit lokalen Verstärkungen hinsichtlich Wanddickenübergängen (a) , Faserorientierungen (b) und Decklagenapplikation (c) in Anlehnung an (s. [Sch07]).....	46
Abbildung 3.9: Effekte bei Faser-Kunststoff-Verbunden mit lokalen Verstärkungen; Interlaminare Spannungen (a) und mechanische Charakteristika anhand von Zwischenfaserbrüchen (b) in Anlehnung an (s. [Sch07]).....	49
Abbildung 3.10: Ausgangsbereiche für Zwischenfaserbrüche: freies Ende (a), Kerbe und Bohrung (b) Klebeverbindung (c) und Lagenende und Wanddickenübergang (d) nach (s. [Sch07])	50
Abbildung 4.1: Nomenklatur zur Definition der Orientierung der lokalen Verstärkungslage und der enthaltenen Kohlenstofffasern	53
Abbildung 4.2: Halbzeugseitige Variationsparameter	55

Abbildung 4.3: Kavitätsdarstellung; Spezifika zur Herstellung lokal verstärkter Bauteile	58
Abbildung 4.4: Gestaltung der Übergangsbereiche mit entsprechenden Bemaßungen in den RTM- (a) und NP-Werkzeugen (b)	59
Abbildung 4.5: WDÜ im Werkzeug und Textil an einem geschäfteten Übergang im RTM-Verfahren mit resultierendem theoretischen FVG	60
Abbildung 4.6: Werkzeugseitige Variationsparameter	62
Abbildung 4.7: Versuchswerkzeuge für das Nasspressverfahren: Plattengeometrie (a) Demonstratorgeometrie (b)	63
Abbildung 4.8: Versuchswerkzeuge für das Resin Transfer Moulding-Verfahren: Plattengeometrie (a), Demonstratorgeometrie (b) und Glasplattenwerkzeug zur Fließfrontvisualisierung (c)	64
Abbildung 4.9: Prozessablauf zur Industrialisierung des Imprägniervorgangs lokal verstärkter Halbzeuge im RTM- und Nasspress-Verfahren.	66
Abbildung 5.1: Darstellung der Auswirkung von Fehlpositionierungen im Preform-, RTM- und Nasspress-Verfahren	68
Abbildung 5.2: Kompaktierungsprüfstand mit beidseitig ebenen und zueinander parallelisierten Platten zur Lasteinleitung in die Prüfkörper	69
Abbildung 5.3: Kompaktierungswiderstand analysierter Komponenten.....	71
Abbildung 5.4: Prüfkörpergeometrien zur Bestimmung der Permeabilität in K_{12} - (a) und in K_3 - (b) Richtung	73
Abbildung 5.5: Funktionsskizze (a) und Realdarstellung (b) des verwendeten Wasserpermeationsprüfstands	74
Abbildung 5.6: Fluidfluss zur Messung der Permeabilität.....	74
Abbildung 5.7: Permeabilität K von Kohlenstofffasergelegen bei Zielfaservolumengehalt in binderaktiviertem Zustand (RTM-Verfahren)	76
Abbildung 5.8: Ersatz-Permeabilität mit FDA-Werkstoffen verstärkter textiler Halbzeuge auf dem Standard-Gelege-Grundlaminat: Relation Gelege zu FDA (a) und FDA im Variantenvergleich (b).....	78
Abbildung 5.9: Permeabilitätswerte der Werkstoffe zur Substitution des CF-Gelege-Grundlaminats mit Glasgelegen oder Glasfasermatten ..	79
Abbildung 5.10: Darstellung des Glasplattenwerkzeugs (a) in einer schematischen Schnittansicht und der Visualisierungsfläche des Werkzeugs (b)	83

Abbildung 5.11: Systemtechnik zur Visualisierung der Fließfrontprogression im RTM-Verfahren	86
Abbildung 5.12: Vorgehensweise zur Aufbereitung der FFV-Ergebnisse exemplarisch an der Oberseite eines unverstärkten textilen Kohlenstofffaserhalbzeugs.....	88
Abbildung 5.13: Ergebnisse der FFV an Halbzeugen mit außenliegenden Verstärkungslagen und mittigem Linienangusskanal	90
Abbildung 5.14: Fließfrontvisualisierungsergebnisse sich kreuzender 90°/90°- und 0°/0°-Gelege mit geschäftetem und ungeschäftetem Übergang	94
Abbildung 5.15: Ergebnisse der FFV an einfachen 90°/90°-lokal verstärkten textilen Halbzeugen mit querliegendem Angusskanal.....	95
Abbildung 5.16: Ergebnisse aus der FFV mit vernähten textilen Halbzeugen	96
Abbildung 5.17: Ergebnisse der FFV an textilen Halbzeugen aus FDA-Werkstoffen.....	97
Abbildung 5.18: Exemplarische Darstellung des Füllbilds eines niedrigen (a) und hohen (b) Fließfrontquotienten bei gegebener Angussgeometrie	99
Abbildung 5.19: Fließfrontquotienten bei Halbzeugen mit lokalen 90°/90°-Verstärkungslagen mit geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen	100
Abbildung 5.20: Fließfrontquotienten bei Halbzeugen mit lokalen 90°/0°-Verstärkungslagen mit geschäfteten und ungeschäfteten Wanddickenübergängen	102
Abbildung 5.21: Netz zur 3D-Simulation des lokal verstärkten textilen Halbzeugs	106
Abbildung 5.22: Vorgehensweise zur Aufbereitung der Simulationsergebnisse..	107
Abbildung 5.23: Ergebnisse der virtuellen Abbildung des Fließfrontverlaufs anhand der Plattengeometrie mit lokalen Verstärkungen.....	108
Abbildung 5.24: Schnittansicht der Füllsimulationsergebnisse mit 90°/0°-LV ungeschäftet und geschäftet durch den Plattenmittelpunkt.....	110
Abbildung 5.25: Prozessdaten aus den Untersuchungen zur Fließfrontvisualisierung	112

Abbildung 5.26: Massenstrom bei geschäftetem und ungeschäftetem Wanddickenübergang und zentral auf der lokalen Verstärkung befindlichem Verteilerkanal (Variante $90^\circ/0^\circ$)	114
Abbildung 5.27: Massenströme bei $90^\circ/0^\circ$ - und $90^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung in der LV bei zentral liegendem Verteilerkanal	115
Abbildung 5.28: Gegenüberstellung der Schließkraftverläufe eines ungeschäfteten und geschäfteten WDÜ anhand $90^\circ/90^\circ$ verstärkter textiler Halbzeuge	116
Abbildung 5.29: Teilfüllungen aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren: Basisuntersuchungen	119
Abbildung 5.30: Teilfüllungen aus dem Hochdruck-RTM-Verfahren; Untersuchungen Alternativwerkstoffe	122
Abbildung 6.1: Probenentnahme zur Schnitt- und Schlibbildanalyse sowie für mechanische Prüfungen	125
Abbildung 6.2: Einteilung der Schnittbildbereiche entlang eines Prüfkörpers der mechanischen Prüfung.....	126
Abbildung 6.3: Charakterisierung von am WDÜ auftretenden Ondulationen.....	126
Abbildung 6.4: Schnittbilder lokal verstärkter Lamine mit ungeschäftetem Wanddickenübergang: $90^\circ/0^\circ$ -außenliegend (a), $90^\circ/90^\circ$ - außenliegend, (b) $90^\circ/0^\circ$ -innenliegend (c) und $90^\circ/90^\circ$ -innenliegend (d).....	128
Abbildung 6.5: Schnittbilder lokal verstärkter Lamine mit geschäftetem Wanddickenübergang: $90^\circ/0^\circ$ -außenliegend (a), $90^\circ/90^\circ$ -außenliegend (b), $90^\circ/0^\circ$ -innenliegend (c) und $90^\circ/90^\circ$ -innenliegend (d).....	129
Abbildung 6.6: Schnittbild eines Laminats mit einer um 6,9 mm versetzten LV	131
Abbildung 6.7: Parameter der Zugprüfung	134
Abbildung 6.8: Maximalkraft bei beidseitig verstärkten Laminaten auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert.....	136
Abbildung 6.9: Energieabsorption bis zur Maximalkraft bei beidseitig verstärkten Laminaten auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert	137
Abbildung 6.10: Modellierung der Mechanik im Zugversuch: Kraftflussverläufe (a) und Prüfkörpermodellierung mit unterschiedlichen Gliedstärken (b)	138

Abbildung 6.11: Kraft-Weg-Verläufe der ungeschäfteten Varianten 90°/90° außen, 90°/90° innen, 90°/0° innen (a) und 90°/0° außen (b) im Zugversuch	140
Abbildung 6.12: Erstversagen von Zugprüfkörper mit 90°/0° innenliegend (a) 90°/0° außenliegend (b) und 90°/90° außenliegend (c).....	142
Abbildung 6.13: Geometrieparameter der Biegeprüfung	145
Abbildung 6.14: Biegeversuche an reinen Kohlenstofffasergelegen; Maximalkraft auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert....	148
Abbildung 6.15: Biegeversuche an reinen Kohlenstofffasergelegen: Energieabsorption bis zur Maximalkraft auf den Wert unverstärkter Prüfkörper normiert	149
Abbildung 6.16: Biegeversuche; Kraft-Weg-Verläufe von Prüfkörpern mit ungeschäftetem WDÜ	151
Abbildung 6.17: Biegeversuche: Kraft- Weg-Verläufe von PKs mit 90°/0° außenliegenden geschäfteten und ungeschäfteten LV	152
Abbildung 6.18: Erstversagen von ungeschäfteten Biegeprüfkörpern mit 90°/0°-Verstärkungslage innenliegend (a), 90°/90°-Verstärkungslage innenliegend (b) 90°/0°-Verstärkungslage außenliegend (c) und 90°/90°-Verstärkungslage außenliegend (d)	153
Abbildung 6.19: Ergebnisse Aramis-System: 90°/90° außen ungeschäftet (a) und 90°/90° innen ungeschäftet (b).....	154
Abbildung 6.20: Ergebnisse Aramis-System: 90°/90° außen geschäftet (a) und 90°/90° innen geschäftet (b).....	155
Abbildung 6.21: Ergebnisse Aramis-System: 90°/0° außen ungeschäftet (a) und 90°/0° innen ungeschäftet (b).....	156
Abbildung 6.22: Ergebnisse Aramis-System: 90°/0° außen geschäftet (a) und 90°/0° innen geschäftet (b).....	157
Abbildung 6.23: Scherwinkelverlauf lokal verstärkter Biegeprüfkörper mit ungeschäftetem WDÜ entlang der Probe.....	158
Abbildung 7.1: RTM-Demonstratorbauteil mit lokalen Verstärkungen (a), Lagenaufbau des grün dargestellten Grundlaminats (b) und Schnittdarstellung des lokal verstärkten Bereichs (c).....	167
Abbildung 7.2: 50%-Teilfüllung des RTM-Demonstratorbauteils mit LV.....	169
Abbildung 7.3: Laminatqualität des Bestätigungsbauteils	170

Abbildung 7.4: Bestätigungsbauteil: Ober- bzw. Rückseite (a) und Unter- bzw. Vorderseite (b)	171
---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Gegenüberstellung der Prozessvorteile und –nachteile im RTM- und Nasspress-Verfahren (s. [Sta15, Bad02, Che11]).....	35
Tabelle 4.1:	Lagenaufbauten analysierter Grundlaminatwerkstoffe.....	56
Tabelle 4.2:	Lagenaufbauten analysierter lokaler Verstärkungen.....	57
Tabelle 4.3:	Analysierte Varianten lokal mit FDA verstärkter Gelege.....	57
Tabelle 5.1:	Charakteristika der simulativ abgebildeten textilen Halbzeuge mit beidseitig außenliegenden lokalen Einfachgurten.....	105
Tabelle 6.1:	Ergebnisse der Ondulationswinkelbestimmung über Schnittbilder.....	130

Literaturverzeichnis

- ABB+11 Arbter, R.;
Beraud, J.M.;
Binetruy, C.;
et al. Experimental determination of the permeability
of textiles: A benchmark exercise.
In: Composites Part A, 42 (2011), S. 1157–1168,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.04.021.
- Ach12 Achtnicht, M. German car buyers' willingness to pay to reduce
CO2 emissions.
In: Zeitschrift Climatic Change, 113 (2012) 3–4,
S. 679-697,
DOI: 10.1007/s10584-011-0362-8.
- ACM+15 Abdulhamid, H.;
Bouvet, C.;
Michel, L.;
Aboissière, J.;
Minot, C. Influence of internally dropped-off plies on the
impact damage of asymmetrically tapered
laminated CFRP.
Composites Part A: Applied Science and
In: Manufacturing. 68 (2015) 0, S. 110–120,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.024.
- AVK13 AVK -
Industrievereinigung
Kunststoffe e.V. Handbuch Faserverbundkunststoffe /
Composites: Grundlagen - Verarbeitung -
Anwendung.
Springer. 4.Edition, Wiesbaden, 2013,
DOI: 10.1007/978-3-658-02755-1
ISBN: 978-3-658-02754-4.
- Bad02 Bader M. G. Selection of composite materials and
manufacturing routes for cost-effective
performance. In: Composites Part A: Applied
science and manufacturing, 33 (2002) 7,
S. 913–934,
DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00044-1.
- BBS03 Bickerton, S.;
Buntain, M.J.;
Somashekar, A.A. The viscoelastic compression behavior of liquid
composite molding preforms.
In: Composites Part A: Applied Science and
Manufacturing, 34 (2003), S. 431–444,
DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00088-5.
- Beg16 Begley E. BMW Group im fünften Jahr in Folge mit
Rekordabsatz.
Pressemitteilung, BMG Group, 11.01.2016,
15:02 Uhr.

- Bei10 Beier, U. High-performance fibre-reinforced composites prepared by a novel preform manufacturing routine.
Dissertation, Universität Bayreuth, Bayreuth, 2010,
ISBN: 978-3-941492-20-2.
- Ber92 Bergmann, H. W. Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile.
Springer Verlag, Berlin, 1992,
DOI: 10.1007/978-3-642-48385-1
ISBN: 978-3-642-48386-8.
- Ber15 Bergmann, J. Analyse und anlagentechnische Verbesserung des Nasspressverfahrens. Technische Universität Dresden, TUDpress. 2016,
ISBN: 978-3-95908-039-2.
- BHS08 Biermann, D.;
Hufenbach, W.;
Seliger, G. Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe, (sefawe); Untersuchung zum Forschungs- und Handlungsbedarf. Progressmedia Verlag & Werbeagentur, Dresden, 2008,
ISBN: 978-3-0002-6217-3.
- BiB06 Bickerton, S.;
Buntain, M. J. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part B: Numerical analysis.
In: Composites Part A, 38 (2007) 7,
S. 1742–1754,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.11.001.
- BSA+09 Beier, U.;
Sandler, J. K. W.;
Altstädt, V.;
Spanner, H.;
Weimer, C. Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched and bindered preforms.
In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 11, S. 1756–1563,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.08.012.

- BSG+00 Bickerton, S.;
Sozer, E. M.;
Graham, P. J.;
et al. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process - Part I: Experiments.
In: Composites Part A, 31 (2000) 5, S. 423–438,
DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00087-1.
- BuB03 Buntain, M. J.;
Bickerton, S. Compression flow permeability measurement: a continuous technique.
In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 34 (2003) 5, S. 445–457,
DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00090-3.
- BuM13 Busse, G.;
Middendorf, P. Faserverbundeleichtbau für Flugzeugstrukturen - Leichtbaupotential von Faserverbundwerkstoffen.
2. Bodensee Aerospace Meeting, Swiss Aerospace Cluster, Friedrichshafen, 13.03.2013.
- CDG07 Cherif, C.;
Diestel, O.;
Gries, T. Textile Verstärkungen, Halbzeuge und deren textiltechnische Fertigung.
In: Hufenbach, W. (Hrsg.);
Textile Verbundbauweisen und
Fertigungstechnologien. 2007, S. 25–72,
ISBN: 978-3000221095.
- CDP+08 Camanho, P.;
Dávila, C.;
Pinho, S.;
Remmers, J. Mechanical Response of Composites.
10. Edition, Springer Verlag, Berlin Heidelberg,
2008,
DOI: 10.1007/978-1-4020-8584-0
ISBN: 978-1-4020-8583-3.
- Che11 Cherif, C. Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften.
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011,
DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1
ISBN: 978-3-642-17991-4.
- Dar56 Darcy, H. Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon.
Dalmont, Paris Frankreich, 1856.
- DIN EN ISO 14125 EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG CEN Faserverstärkte Kunststoffe –
Bestimmung der Biegeeigenschaften. (ISO 14125:1998 + Cor.1:2001 + Amd.1:2011);
Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011.

- DIN EN ISO 527 EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG CEN Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften.
- DKE13 Di Fratta, C.; Klunker, E.; Ermanni, P. A methodology for flow-front estimation in LCM processes based on pressure sensors. In: Composites Part A, 47 (2013), S. 1–11, DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.11.008.
- DPV97 Deutsch, V.; Platte, M.; Vogt, M. Ultraschallprüfung. Grundlagen und industrielle Auswertungen. Springer Verlag, Berlin, 1997, DOI: 10.1007/978-3-642-59138-9 ISBN: 978-3-642-63864-0.
- Dre10 Drechsler, K. CFK Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Mäkten lernen kann. Symposium Carbon Composites e.V., Automotive Forum, Neckarsulm, 2010.
- Dud09 Dudenhausen, W. Aspekte der automatisierten Fertigung von Faserverbundstrukturen. Bauweisen Kolloquium 2009, Stuttgart, 2009.
- EEO12 Ernst, C.-S.; Eckstein, L.; Olschewski, I. Abschlussbericht: CO2-Reduzierungspotentiale bei PKW bis 2020. Institut für Krafffahrzeuge (IKA), RWTH Aachen, Aachen, 2012.
- Ehi12 Ehinger, C. Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.
- Ehr06 Ehrenstein G. W. Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006. ISBN: 3446227164.
- EHS10 Eckstein, L.; Hartmann, B.; Schmitt, F. Kosteneinsparpotenzial durch Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: Lightweight Design, 3 (2010) 5, S 6–43. DOI: 10.1007/BF03223623.

- ELE02 Endruweit, A.;
Luthy, T.;
Ermanni, P. Investigation of the influence of textile
compression on the out-of-plane permeability of
a bidirectional glass fiber fabric.
In: Polymer Composites, 23 (2002) 4,
S. 538–554,
DOI: 10.1002/pc.10455.
- End03 Endruweit, A. 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 Zürich, Zürich, 2003.
- EnE04 Endruweit, A.;
Ermanni, P. The in-plane permeability of sheared textiles.
Experimental observations and a predictive
conversion model.
In: Composites Part A: Applied Science and
Manufacturing, 35 (2004) 4, S. 439–451,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2003.11.002.
- FGK15 Funke, H.;
Gelbrich, S.;
Kroll, L. Development of Effective Textile-Reinforced
Concrete Noise Barrier.
In: Journal of Materials Science Research,
4 (2015) 3, S. 33–39,
DOI:10.5539/jmsr.v4n3p33,
ISSN: 1927-0585.
- Fis11 Fischer, K. Durch neue Prozessketten zur FVK-Großserie.
17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland
e.V., RWTH Aachen, Aachen, 2011.
- Gar09 Gartner, T. Flugzeugbau einst, heute und morgen.
acatech Journalistenworkshop Werkstoffe,
München, 29.04.2009.
- Geb92 Gebart, B. R. Permeability of Unidirectional Reinforcements
for RTM.
In: Journal of Composite Materials, 26 (1992) 8,
S. 1100–1133,
DOI: 10.1177/002199839202600802.

- Göt00 Götz, K. Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde - eine lokale Approximation.
Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2000.
- GrF14 Grote, K.-H.;H.;
Feldhusen, J. Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. 24. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2014, ISBN: 978-3-642-38890-3,
DOI: 10.1007/978-3-642-38891-0.
- GSL+11 Greb, C.;
Schnabel, A.;
Linke, M.;
Gries, T. Neuartige Technologien und Prozessketten für die Großserienfertigung textiler Preforms. 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V., Aachen, 16.06.2011.
- Gut97 Gutowski, T.G A Brief introduction to Composite Materials and Manufacturing Presses.
Advanced composites manufacturing, John Wiley & Sons Verlag, New York, 1997, ISBN: 978-0-471-15301-6.
- HaM11 Hausding, J.;
Märting, J. Gewirkte Halbzeuge und Wirktechniken. In: Cherif, C. (Hrsg.); Textile Werkstoffe für den Leichtbau, 2011, S. 265–305,
DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Han10 Hanke, R. Computertomographie in der Materialprüfung: Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen.
DGZfP-Jahrestagung 2010, Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik, Fürth, 2010.
- Hau10 Hausding, J. Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik-Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 17.03.2010.
- HDN11 Henningsen, M.;
Desbois, P.;
Neuhaus, B. Innovative Matrixsysteme für schnelle RTM-Prozesse.
Symposium Carbon Composites e.V. Automotive Forum 2011, Ingolstadt, 2011.

- HeH14 Helmy, S.;
Hoa S.V. Tensile fatigue behavior of tapered glass fiber reinforced epoxy composites containing nanoclay.
In: Composites Science and Technology. 102 (2014), S. 10–19,
DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.05.038.
- HeI03 Hellier, C. J. Handbook of nondestructive evaluation.
2. Edition.
McGraw Hill Education, New York, 2003,
ISBN: 978-0071777148.
- HeM11 Henning, F.;
Moeller, E. Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe,
Fertigung.
Carl Hanser Verlag, München, 2011,
DOI: 10.3139/9783446428911
ISBN: 978-3-446-42267-4.
- HFL+13 Hopmann, C.;
Fecher, L.;
Linnemann, L.;
Bastian, R.;
Gries, T.;
Schnabel, A.;
Greb, C. Comparison of the properties of Onserts and
Inserts for a high volume production of structural
composite parts.
In: Journal of Plastics Technology, 04 (2013),
S. 178–206.
- HGT98 Hammami, A.;
Gauvin, R.;
Trochu, F. Modelling the edge effect in liquid composites
moulding.
In: Composites Part A, 29 (1998), S. 609–609,
DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00120-6.
- HMS+12 Heuss, R.;
Müller, N.;
Van Sintern, W.;
Starke, A.;
Tschiesner, A. Lightweight, heavy impact – How carbon fiber
and other lightweight materials will develop
across industries and specifically in automotive.
Advanced Industries. Mc Kinsey&Company,
2012.
- HPK00 Herrmann, A. S.;
Pabsch, A.;
Kleineberg, M. Kostengünstige Faserverbundstrukturen - eine
Frage neuer Produktionsansätze.
3. Internationale AVK-Tagung.
Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe-
Technische Vereinigung (AVK-TV),
Baden-Baden, 12–13.09.2000.

- Kap14 Kaptain, J. Untersuchung der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge aus Kohlenstofffasern und Validierung der Simulation durch Anwendung eines Glasplattenwerkzeugs. Diplomarbeit, Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk Aachen, Aachen, 2014.
- Kar04 Karger-Kocsis, J. Werkstoffe.
In: Neitzel, M. (Hrsg.); Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2004, S. 31–63, ISBN: 3934930425.
- KBM11 Kopp, G.; Burkardt, N.; Majic, N. Leichtbaustrategien und Bauweisen.
In: Handbuch Leichtbau. Henning, Moeller (Hrsg.); 2011, S. 57–76. DOI: 10.3139/9783446428911 ISBN: 978-3-446-42267-4.
- KeB09 Kelly, P. A.; Bickerton, S. A Comprehensive Filling and Tooling Force Analysis for Rigid Mould LCM Processes.
In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 11, S. 1685–1697. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.07.013.
- KeZ00 Kelly, A.; Zweben, C. Comprehensive Composite Materials. Polymer Matrix Composites, Oxford. Elsevier Verlag, Amsterdam, 2000. ISBN: 978-0-08-042993-9.
- KLR08 Kruckenberg, T.; Lin, Y.; Rowan, P. Static and vibration compaction and microstructure analysis on plain-woven textile fabrics.
In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39 (2008) 3, S. 488–502, DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.12.003.
- KNG+16 Kroll, L.; Nendel, W.; Gerstenberger, C.; Kaufmann, J. Ressourceneffiziente Technologie für belastungsdedizierte Faserverbundstrukturen. Innovationsforum effiLOAD, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 20.–21.01.2016.

- KNS+15 Kroll, L.;
Nendel, W.;
Seidlitz, H.;
Gerstenberger, C.;
Osiecki, T. Bauweisenkonzepte und Auslegung von
Krafteinleitungsbereichen bei Hybridstrukturen
aus Faser-Kunststoff/Metall-Verbunden im
Fahrzeugbau.
EFB-Forschungsbericht Nr. 417. Hannover:
Europäische Forschungsgesellschaft für
Blechverarbeitung (EFB) e.V., Hannover, 2015,
ISBN: 978-3-86776-463-6.
- Köh05 Köhler, E. Entwicklung und Realisierung von
Herstellungstechnologien für
belastungsgerechte Strukturteile und deren
Anwendung in Bauteilen der Verkehrstechnik.
Forschungsbericht - Projekt InnoRegio INNtex,
Chemnitz, 2005.
- Lao05 Laourine, E. Einseitige Nähetechnik für die Herstellung von
dreidimensionalen Faserverbundbauteilen.
Dissertation, Rheinisch-Westfälische
Hochschule, Aachen, 2005.
- LBB+02 Lomov, S. V.;
Belov, E. B.;
Bischoff, T.;
Ghosh, S. B.;
Chi, T. T.;
Verpoest, I. Carbon composites based on
multiaxial multiply stitched preforms.
Part 1. Geometry of the preform.
In: Composites Part A: Applied science and
manufacturing, 33 (2002) 33, S. 1171–1183.
DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.04.013.
- Leo11 Leohold, J. Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen
FVK-Einsatz im Automobil.
Volkswagen Aktiengesellschaft, Symposium
Carbon Composites e.V., Automotive Forum,
Ingolstadt, 30.06.2011.
- LEM+12 Lässig, R.;
Eisenhut, M.;
Mathias, A.;
Schulte, R.T.;
Peters, F.;
Kühmann, T.;
et al. Serienproduktion von hochfesten
Faserverbundbauteilen.
Roland Berger Strategy Consultants, Stuttgart,
2012.

- LGA+08 Loendersloot, R.;
Grouve, W.J.B.;
Akkerman, R.;
Van den Berg, S. Permeability Prediction Using a Multigrid Method.
9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Quebec Canada, 8.–10. Juli 2008.
- Lib11 Liba
Maschinenfabrik
GmbH Multiaxial-Technologie zur Herstellung textiler Halbzeuge aus Kohlefasern.
Roadshow Composites, Naila, 2011.
- Lom11 Lomov, S. V. Non-crimp fabric composites - Manufacturing, properties and applications.
Woodhead Publishing Verlag, Cambridge, UK, Philadelphia, PA, 2011,
ISBN: 9781845697624.
- LuE02 Luthy, T.;
Ermanni, P. Linear direct current sensing system for flow monitoring in Liquid Composite Moulding.
Composites Part A, 33 (2002) 3, S. 385–397.
DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00115-4.
- MaH16 Magagnato, D.;
Henning, F. RTM Formfüllsimulation für unidirektional verstärkte Faserverbundbauteile unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung und des lokalen Faservolumengehalts.
In: Wissenschaftlicher Arbeitskreis der Kunststoffprofessoren (Hrsg.); Zeitschrift Kunststoffe 12 (2016) 3, Carl Hanser Verlag, S. 135–156.
- Mau16 Maurer T. BMW i3 und i8: Textile Herausforderungen bei der Entwicklung der Life Cell.
Innovationsforum effiLOAD,
Technische Universität Chemnitz,
Chemnitz, 20.–21.01.2016.
- MiF08 Michaeli, W.;
Fischer, K. Untersuchungen zur Fertigung von flächigen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen mit Hilfe des Spaltimprägnierverfahrens.
In: Journal of Plastics Technology, 4 (2008) 4, S. 1–29.

- MLK+12 Maldonado, J.;
Louis, B.;
Klunker, F.;
Ermanni, P. Reactive Flow of Thermosetting Resins:
Implications to LCM Processing.
11th International Conference on Flow
Processes in Composite Materials, Auckland
New Zealand, 09.–12.Juli 2012.
- NVB+13 Nguyen, Q. T.;
Vidal-Sallé, E.;
Boisse, P.;
et al. Mesoscopic scale analyses of textile composite
reinforcement compaction.
In: Composites Part B: Engineering, 44 (2013)
1, S. 231–241,
DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.05.028.
- NWH05 Niemann, G.;
Winter, H.;
Höhn, B.-R Maschinenelemente – Konstruktion und
Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen.
Springer Verlag, Heidelberg, 2005,
ISBN: 3-540-25125-1.2005.
- Ost13 Oster, R. Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer
Anwendung an Faserverbundbauteilen.
DACH-Jahrestagung in Graz, Vortrag,
Eurocopter Deutschland GmbH, Woodhead
Publishing series in textiles, Graz, 06.03.2013.
- Oua12 Ouagne, P.;
Tariq, O.;
Chung, H.P.;
Breard, J.;
Saouab, A. Continuous measurement of fiber reinforcement
permeability in the thickness direction:
Experimental technique and validation.
In: Composites Part B: Engineering, 45 (2013)
1, S. 609–618,
DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.06.007.
- Pas14 Passreiter, T. Project i. Die Antwort der BMW Group auf die
zukünftigen Herausforderungen nachhaltiger
und individueller Mobilität.
Symposium Carbon Composites e.V.,
Automotive Forum, Augsburg, 2014.
- PBB03 Pagé, D.J.Y.S.;
Bates, P.J.;
Bui, V.T.;
Bonin, H.W.;
Taylor, D.J. Transverse Compressibility of a Commingled
Roving.
In: Journal of Composite Materials, 37 (2003),
S. 1093–1107,
DOI: 10.1177/0021998303037012002.

- Pet12 Peterer, M. Schadensidentifikation und -bewertung von CFK-Bauteilen mittels phasenmodulierter Thermographie. Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.
- Puc96 Puck, A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis. Carl Hanser Verlag, 1996, ISBN: 978-3446181946.
- Rei09 Reinhold, M. InnoFaser – Innovative Faserverbundbauteile für neue Märkte. Fachbericht, Institut für Marketing, Universität St. Gallen, St. Gallen, 2009.
- RoG98 Robitaille, F.; Gauvin, R. Compaction of Textile Reinforcements for Composite Manufacturing. In: Polymer Composites, 20 (1999) 1, S. 48–61, DOI: 10.1002/pc.10334.
- Rou06 Rouchon, J. Certification of aircraft composite structures. DGAC and EASA, 2006.
- Rup15 Rupertsberger, W. Automation in der Composite Produktion – von der Manufaktur in die Großserie. VDI Wissensforum „Composites effizient verarbeiten“, Nürnberg, 2015.
- SBA00 Sozer, E.M.; Bickerton, S.; Advani, S. G. On-line strategic control of liquid composite mould filling process. In: Composites Part A, 31 (2000), S. 1383–1394, DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00060-9.
- SBB06 Somashekar, A. A.; Bickerton, S.; Bhattacharyya, D. Exploring the non-elastic compression deformation of dry glass fibre reinforcements. In: Composites Science and Technology, 67 (2007) 2, S. 183–200, DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.07.032.

- SBB10 Somashekar, A. A.; Bickerton, S.; Bhattacharyya, D. Compression deformation of a biaxial stitched glass fibre reinforcement: Visualization and image analysis using X-ray micro-CT. In: Composites Part A: Applied science and manufacturing, 42 (2011) 2, S. 140–150, DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.10.017.
- Sch07 Schürmann, H. Konstruieren mit Faserverbundkunststoffen. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-72190-1 ISBN: 978-3-540-72189-5.
- Sch13 Schläpfer, B. Optimal Design of Laminated Structures with Local Reinforcements. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2013.
- SHE+12 Saad, A.; Echchelh, A.; Hattabi, M.; El Ganaoui, M. Numerical Simulation of Thickness Variation Effect on Resin Transfer Molding Process. In: Polymer Composites, 33 (2012) 1, S. 10–21, DOI: 10.1002/pc.21226.
- ShS10 Sharma, S.; Signier, D.A. Permeability Measurement Methods in Porous Media of Fiber Reinforced Composites American Society of Mechanical Engineers. In: Applied Mechanical Review, 63 (2010) 2, 020802-020802-19, DOI: 10.1115/1.4001047.
- SLB97 Saunders, R. A.; Lekakou, C.; Bader, M. G. Compression and mikrostructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 29 (1998) 4, S. 443–454, DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00092-4.
- Sob07 Sobek, W. Entwerfen im Leichtbau. In: Rektorat der Universität Stuttgart (Hrsg.); Themenheft Forschung No. 3, Stuttgart, 2007, ISSN: 1861-0269.

- Sor13 Sorg, C. Data Mining als Methode zur Industrialisierung und Qualifizierung neuer Fertigungsprozesse für CFK-Bauteile in automobilier Großserienproduktion. Dissertation, Technische Universität München, Garching b. München, 2013.
- Sta99 Staab, G. H. Laminar composites. Elsevier Verlag, Amsterdam, 1999, ISBN: 978-0-7506-7124-8.
- Sta06 Stadtfeld, H. Entwicklung einer Messzelle zur Bestimmung von Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerten bei flächigen Faserhalbzeugen. IVW-Schriftenreihe, Institut für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2006.
- Sta15 Stanglmaier, S. Mass Production of CFRP in Automotive Applications – Potentials and Challenges in Implementing Local Reinforcements. Automotive Composites Conference & Exhibition 2015, Detroit, 09.–11.September 2015.
- StM15 Stanglmaier, S.; Marquart, M. Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Herstellung lastpfadgerechter CFK-Bauteile für die automobiler Großserie. Landshuter Leichtbau Colloquium 2015, Hochschule Landshut, Landshut, 2015.
- Sut09 Suter-Kunststoffe AG Faserverbundwerkstoffe. Composite materials Handbuch, Waldenbuch, 06/2009.
- SVB+16 Stanglmaier, S.; Vukoje, D.; Bickerton, S.; Hodde, J.; Repper, A.; Thomas, B.; Henning, F. Analyse der Fließfrontprogression während des Injektionsprozesses lokal verstärkter Kohlenstofffaserhalbzeuge im RTM-Verfahren. In: Zeitschrift Kunststoffe, 12 (2016) 2, S. 31–62.

- Swe11 Swery, E. Permeability of Complex Carbon Fibre Preforms for Automotive Composites. Projektbericht 2011-ME60, Department of Mechanical Engineering, University of Auckland, Auckland, 2011.
- SWM04 Stadtfeld, H. C.; Weyrauch, F.; Mitschang, P. Standardizeable Permeability Work Cell for Fibrous Reinforcements. 7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Delaware, USA, 7.–9. Juli 2004.
- TWH12 Thoma, B.; Weidemann, A.; Henning, F. Chemical-Stitching, ein vielversprechender Ansatz für die automatisierte Preform-Fertigung. In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 05 (2012), S. 490–514.
- ThW94 Thomas, D. M.; Webber, J. H. P. A design-study into the delamination behaviour of tapered composites. In: Composite Structures, 27 (1994) 4, S. 379–388, DOI: 10.1016/0263-8223(94)90264-X.
- TiM06 Tipler P. A.; Mosca G. Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Elsevier Verlag, Heidelberg, 2006, ISBN: 978-3827419453.
- TTS97 Tan, P.; Tong, L.; Steven, G. Models for Predicting Thermomechanical Properties of Three-Dimensional Orthogonal Woven Composites. In: Journal of Reinforced Plastics and Composites, 18 (1999) 2, S. 151–185, DOI: 10.1177/073168449901800204.
- UBF11 Umer, R.; Bickerton, S.; Fernyhough, A. The effect of yarn length and diameter on permeability and compaction response of flax fibre mats. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42 (2011) 7, S. 723–732, DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.02.010.

- UmL99 Um, M.-K.;
Lee, S.-K. A Study on the Determination of In-Plane Permeability of Fiber Preforms.
In: Polymer Composites, 20 (1999) 6,
S. 771–779,
DOI: 10.1002/pc.10400.
- USB+13 Uhlig, K.;
Spickenheuer, A.;
Bittrich, L.;
Heinrich, G. Development of a highly stressed bladed rotor made of a CFRP using the tailored fibre placement technology.
In: Mechanics of Composite Materials, 49 (2013) 2, S. 289–302,
DOI: 10.1007/s11029-013-9336-4.
- Ver08 Verdenhalven, J. Industrialization of the Carbon Composite Industry.
In: SAMPE EUROPE Business Office and Science Committee of SAMPE EUROPE (Hrsg.); CFRP: The cost down solution for top performance, 2008,
ISBN: 978-3-9522677-8-3.
- VRA+14 Vernet, N.;
Ruiz, E.;
Advani, S.;
et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II.
In: Composites Part A, 61 (2014), S. 172–184,
DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010.
- WDP84 Whitney, J. M.;
Daniel, I. M.;
Pipes, R. B. Experimental mechanics of fibre reinforced composites materials.
Sub reviewed Edition, Connecticut, 1984,
ISBN: 978-0912053011.
- WiS13 Wiedemann, M.;
Sinapius, M. Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures.
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013,
DOI: 10.1007/978-3-642-29190-6,
ISBN: 978-3-642-29189-0.
- WKK14 Witten, E.;
Kraus, T.;
Kühnel, M. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen.
In: AVK-Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe (Hrsg.); Composites-Marktbericht 2014, 2014.

- Wol12 Wollschläger, D. Grundlagen der Datenanalyse mit R: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Verlag, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-25800-8, DOI: 10.1007/978-3-642-25800-8.
- WVB+11 Walbran, W. A.; Verleye, B.; Bickerton, S.; Kelly, P. A. Prediction and experimental verification of normal stress distributions on mould tools during Liquid Composite Moulding. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 43 (2012) 1, S. 138–149, DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.09.028.
- Wie86 Wiedemann, J. Elemente. In: Springer-Verlag (Hrsg.); Leichtbau, Band 1, Berlin, 1986, ISBN: 3-5-40164049.
- ZSS+15 Zopp, C.; Stenbeck, W.; Schultze, D.; Kroll, L.; Nendel, S.; Nestler, D. Carbon fibre-reinforced thermoplastic semifinished products for high performance applications. Conference Proceedings, 2nd International MERGE Technologies Conference 2015, S. 15–21, Chemnitz, 1.–2.10.2015, ISBN: 978-3-95735-025-1.

Veröffentlichungen

- Marquart, M.;
Stanglmaier, S.;
Greb, C.;
Gries, T.;
Chaudhari, R.;
Henning, F.;
Bickerton, S.
- Develop of an innovative preforming process for the high-volume automotive sector.
Konferenzbeitrag, 12th International Conference on Flow Processing in Composite Materials, Twente, Niederlande, 12.–16.07.2014.
- Stanglmaier, S.;
Henning, F.
- Grundlagen zur Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge im RTM- und Nasspressverfahren.
Poster- und Tagungsbandbeitrag, BMW Group Dialogtag 2014, München, 05.06.2014.
- Stanglmaier, S.;
Marquart, M.;
Repper, A.;
Lang, H.-P.;
Hodde, J.;
Chaudhari, R.;
Henning, F.;
Greb, C.;
Gries, T.
- Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Herstellung lastpfadgerechter CFK-Bauteile für die automobiler Großserie.
Tagungsband- und Konferenzbeitrag, Landshuter Leichtbau Colloquium 2015, Landshut, 26.02.2015.
- Stanglmaier, S.;
Marquart, M.;
Repper, A.;
Thoma, B.;
Henning, F.;
Greb, C.;
Gries, T.
- Faserdirektablage zur Herstellung Lokal verstärkter Kunststoffbauteile im RTM- und Nasspressverfahren.
Handout und Konferenzbeitrag, Verein Deutscher Ingenieure – Fachtagung „Composites effizient verarbeiten“, Nürnberg, 14.04.2015.
- Stanglmaier, S.;
Vukoje, D.;
Hodde, J.;
Repper, A.;
Bickerton, S.;
Thoma, B.;
Henning, F.
- Visualisierung des Fließfrontverlaufs lokal verstärkter Kohlenstofffaserhalbzeuge im Resin Transfer Moulding-Verfahren.
Zeitschriftenartikel, In: Journal of Plastics Technology, 12 (2016) 2, S. 31–62,
DOI: 10.3139/O999.01022016,
ISSN: 1864–2217.

- Stanglmaier, S.;
Henning, F. Grundlagen zur Herstellung lokal verstärkter Bauteile mit Hilfe des RTM- und Nasspressverfahrens.
Poster- und Tagungsbandbeitrag, BMW Group Dialogtag 2015, München, 10.07.2015.
- Stanglmaier, S.;
Pfitzer, H.;
Repper, A.;
Thoma, B.;
Henning F. CFRP Mass production at BMW – Challenges and Potentials Today and Tomorrow,
Implementing Local Reinforcements.
Handout und Konferenzbeitrag, Automotive Composites Conference & Exhibition, Detroit, USA, 09.–11.09.2015.
- Hodde, J.;
Hofmann, M.;
Schweizer, N.;
Stanglmaier, S. Nasspressverfahren und Presswerkzeug hierfür.
Erfindungsmeldung, DE 102015201559.9.
- Hodde, J.;
Stanglmaier, S. Cutter and portal with the same.
Erfindungsmeldung, DE102015201036.8.
- Hodde, J.;
Stanglmaier, S. Verfahren für die Vorbereitung eines Formteils für ein Imprägnierverfahren.
Erfindungsmeldung, DE102015200995.5.
- Hodde, J.;
Stanglmaier, S. Greifvorrichtung und Verfahren zum Handhaben einer Fasermatte.
Erfindungsmeldung, DE102015200503.8.
- Bickerton, S.;
Hodde, J.;
Stanglmaier, S. Verfahren zur Herstellung eines textilen Halbzeugs, textiles Halbzeug sowie Vorrichtung zur Herstellung eines textilen Halbzeugs.
Erfindungsmeldung, DE102014225334.9.
- Hodde, J.;
Stanglmaier, S. Verfahren zum Stabilisieren von unidirektionalen Gelegen vor deren Randbeschnitt bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen.
Erfindungsmeldung, DE102014222144.7.
- Hodde, J.;
Stanglmaier, S.;
Zwinderman, R. System und Verfahren zum lagengenauen Platzieren eines zu bearbeitenden Objekts an einer Fertigungsvorrichtung.
Erfindungsmeldung, DE102014221877.2

-
- Stanglmaier, S. Verfahren zur Herstellung von Vorformlingen sowie eines Faserverbundbauteils und Faserverbundbauteil. Erfindungsmeldung, DE102014224741.1.
- Unterhauser, T.;
Stanglmaier, S. Werkzeug zur Herstellung von Faserverbundbauteilen. Erfindungsmeldung, DE102013226827.0.

Betreute studentische Arbeiten

- Yvonne Eixenberger: Prozesskettenbewertung für die Fertigung lokal verstärkter CFK-Bauteile im RTM-Verfahren.
Bachelor's Thesis, Hochschule Landshut, 2014.
- Johannes Kaptain: Untersuchung der Imprägnierung lokal verstärkter Halbzeuge aus Kohlenstofffasern und Validierung der Simulation durch die Anwendung eines Glasplattenwerkzeugs.
Diplomarbeit, Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule Aachen, 2014.
- Dominic Krebs: RTM-Versuche an Tailored Blanks und strukturierte Prüfung der hergestellten, lokal verstärkten CFK-Bauteile.
Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- Dragan Vukoje: Visualisierung des Füllverhaltens lokal verstärkter Karbonfaserhalbzeuge.
Diplomarbeit, Hochschule München, 2014.
- Michael Krapf: RTM-Plattenversuche an Tailored Blanks und strukturierte Prüfung der hergestellten, lokal verstärkten CFK-Bauteile.
Master's Thesis, Technische Universität München, 2014.
- Jessica Hagemann: Untersuchung des Imprägnierverhaltens lokal verstärkter Halbzeuge aus Faserdirektablagematerial im RTM-Verfahren.
Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- Onno Grönheim: Konzept- und Wirtschaftlichkeitsbewertung lokal verstärkter Bauteile aus dem RTM- und Nasspressprozess.
Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- Korbinian Liebl: Untersuchung des Drapierprozesses lokal Verstärkter textiler Halbzeuge.
Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015.

Anhang

A1: Grundlagen zerstörungsfreier FKV-Prüfmethoden

Zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP) machen, wie der Name bereits aussagt, eine Laminatqualitätsanalyse möglich, ohne das Laminat zu zerstören. Zu den herangezogenen zerstörungsfreien Verfahren, welche zur Charakterisierung der Laminatqualität dienen, zählen die optisch-makroskopische Untersuchung (s. [Pet12, Hel03]), die Ultraschallprüfung (s. [Ost13]) und die Computertomographie (s. [Ost13, Han10]). Diese sind auch für eine produktionsbegleitende Qualitätsanalyse von FKV-Werkstoffen essentiell. Anhand dieser Verfahren können auftretende Fehlstellen detektiert und für die Interpretation essentielle Informationen bereitgestellt werden. Die Vorteile der ZfP sind (s. [DPV97]):

- Kostengünstiger als zerstörende Prüfung (keine Bauteilzerstörung erforderlich)
- Rücktransfer der Komponenten in die Produktion möglich
- Inspektion an tragenden Bauteilen möglich
- Serienbegleitende 100% Analyse möglich

Die Nachteile der ZfP sind demgegenüber (s. [DPV97]):

- Komplexe Ergebnisinterpretation und erforderliche Reproduzierbarkeit (geschultes Personal erforderlich)
- Einfluss von Messmittel, Anwender und Umgebungsbedingungen
- Manuelle Prüfung führt zu hohen Personalkosten (z.B. Ultraschallverfahren)
- Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten (Computertomographie)
- Quantifizierung der Bauteilqualität, eventueller Merkmalsgrößen und der Restbelastbarkeit nur bedingt möglich

A2: Grundlagen zerstörender FKV-Prüfmethoden

Nach Vorstellung der ausgewählten Technologien, welche für die zerstörungsfreie Prüfung von Laminaten verwendet werden, ist es ein wichtiger Schritt den Übertrag der Erkenntnisse aus der ZfP auf die mechanischen Eigenschaften von FKV-Laminaten zu schaffen. Aus diesem Grund werden sämtliche Laminatvarianten zusätzlich in zerstörenden Prüfungen hinsichtlich deren mechanischen Eigenschaften analysiert.

Zur Vergleichbarkeit ermittelter mechanischer Kennwerte, sind im Rahmen der Zugversuche definierte Prüfkörpergeometrien vorgeschrieben, die für FKV-Lamine in den Normen DIN EN ISO 527-1 bis 4 beschrieben sind. Bei den durchgeführten Zugversuchen ergibt sich aus der Belastung der Probe in Längsrichtung grundsätzlich ein

einachsiger Spannungszustand im Werkstück. Dies ist der für FKV ideale Lastfall, welcher Schlussfolgerungen über die mechanischen Kennwerte in σ_1 -Richtung zulässt. Eine Abweichung von den vorgegebenen Geometrien ist möglich und vor allem bei Elementversuchen wie denen lokal verstärkter Laminat notwendig. Dann ist jedoch zu beachten, dass die resultierenden Versuchsergebnisse nicht uneingeschränkt vergleichbar sind, sondern explizit auf die jeweiligen Prüfbedingungen und Bauteilkonfigurationen zutreffen und keine Materialkennwerte, sondern Ersatzkennwerte für die Prüfkörper widerspiegeln (s. [DIN EN ISO 527]). Der Prüfkörper wird beim Zugversuch an Elementen und Strukturelementen mit konstanter Geschwindigkeit in Prüfkörperlängsrichtung belastet, wobei werkstoff- und geometrieabhängige Kenngrößen, wie die resultierende Dehnung, die maximal auftretende Kraft, die Energie bis zum Erreichen der Maximalkraft sowie der Kraft-Weg-Verlauf ermittelt wird.

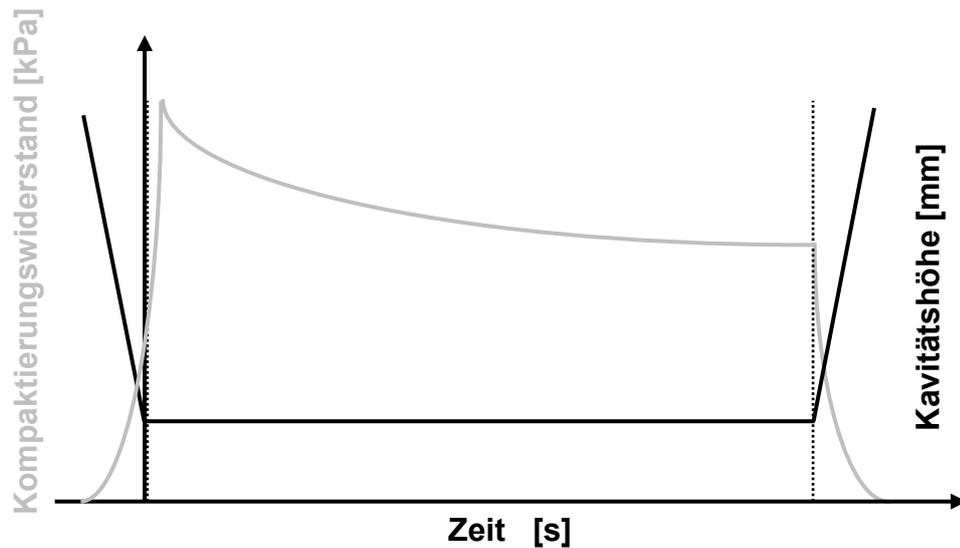
Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden auch Biegeversuche durchgeführt. Dieser dient dazu das Verhalten des Prüfkörpers unter Biegebelastung bei einer definierten Krafteinwirkung unter festgelegten Bedingungen zu untersuchen (s. [AVK13]). Versuche zur Ermittlung der Biegeeigenschaften sind analog den Zugversuche genormt. Dementsprechend sind grundsätzlich der Dreipunkt- und der Vierpunktbiegeversuch zu unterscheiden (s. [DIN EN ISO 14125]).

Während bei Materialcharakterisierungen, bei denen die Prüfkörper mit konstanter Geschwindigkeit als Biegebalken belastet werden, die Ermittlung der Biegespannung, der Biegesteifigkeit, der Biegefestigkeit, der Biegedehnung, der Durchbiegung und des Biegemoduls möglich ist, können anhand der Element- und Strukturelementuntersuchungen die Maximalkraft, die Durchbiegung bei und die Energieabsorption bis zum Erreichen der Maximalkraft sowie der Kraft-Weg-Verlauf ermittelt werden [DIN EN ISO 14125]. Wie bei [WDP84] aufgeführt, sind bei hohen Durchbiegungen und bei Auftreten von Schubspannungen diese über einen Korrekturfaktor zu berücksichtigen. Die Berechnung des Biegemoduls erfolgt dabei nach folgender Gleichung [WDP84]:

$$E_x = \frac{FL^3}{64bh^3w} \cdot (11 + 8S) \quad . \quad \text{Gleichung A2.1}$$

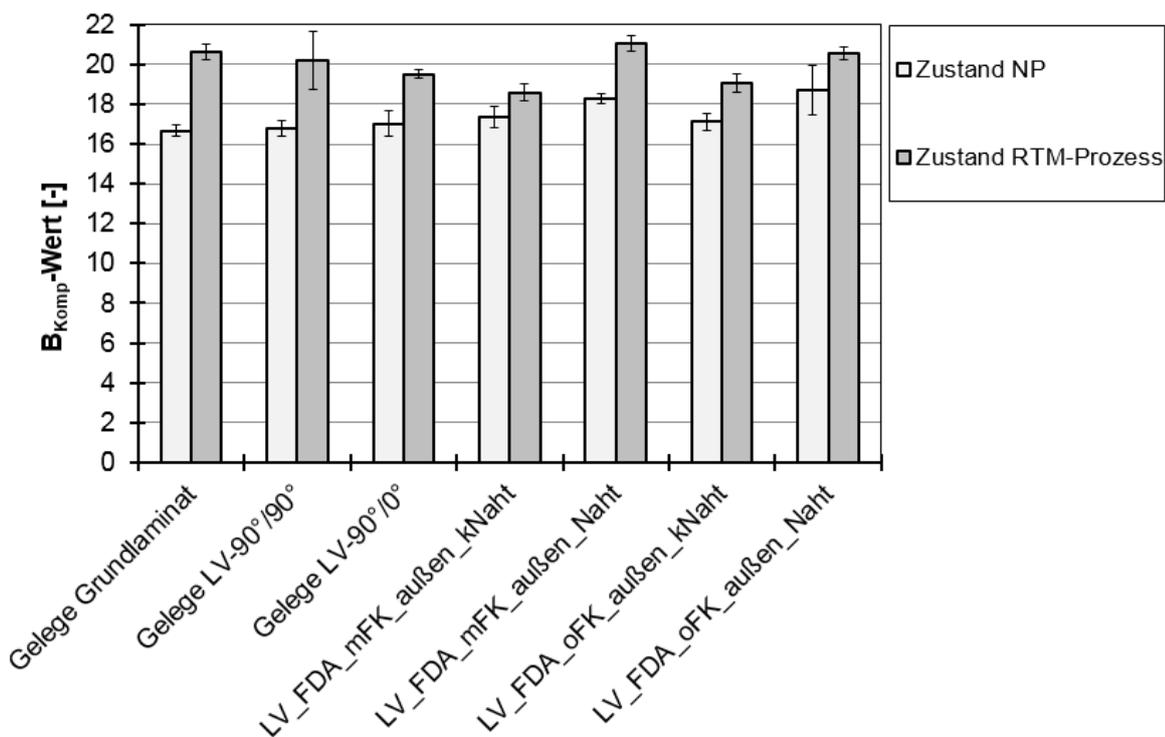
Dabei beschreiben F die aufgebrachte Kraft, L den Auflagerabstand, b die Probenbreite, h die Probenhöhe, w die Probendurchbiegung am Mittelpunkt des Prüfkörpers bei Kraft F , E_1 den E-Modul in Belastungsrichtung und G_{13} den Schubmodul (s. [WDP84]).

A3: Kompaktierungswiderstand; Kavitätsverlauf



Anhang: Schematischer Kavitäts- und Kompaktierungswiderstandsverlauf bei Kompaktierungsprüfungen

A4: Kompaktierungswiderstand; B_{Komp} -Werte



Anhang: B_{Komp} der analysierten Kohlenstoffasergelege und FDA-Werkstoff

A5: Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts

Der arithmetische Mittelwert wird in diesem Zusammenhang über Gleichung 5.1 berechnet [Wol12]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad . \quad \text{Gleichung A3.1}$$

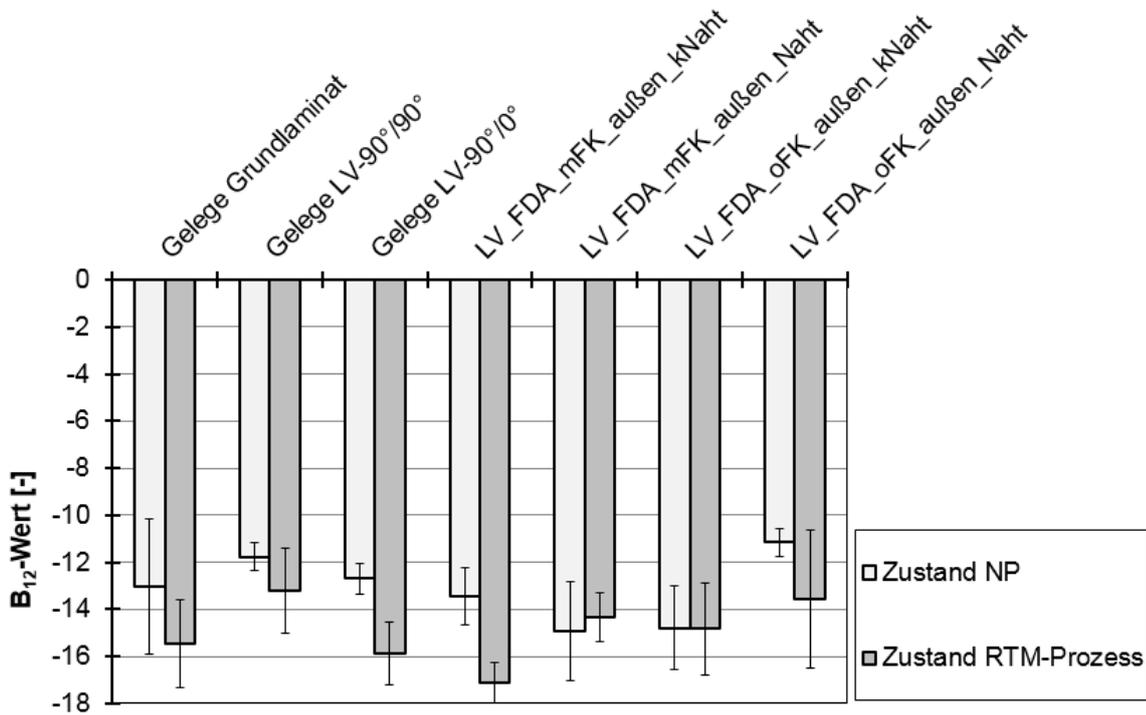
In dieser Gleichung ist \bar{x} der arithmetische Mittelwert, n der Stichprobenumfang, i die Laufvariable und x_i der jeweils ermittelte Ersatzkennwert der jeweiligen Prüfkörper. Die als Fehlerbalken aufgetragene Standardabweichung ergibt sich nach [Wol12]:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad . \quad \text{Gleichung A3.2}$$

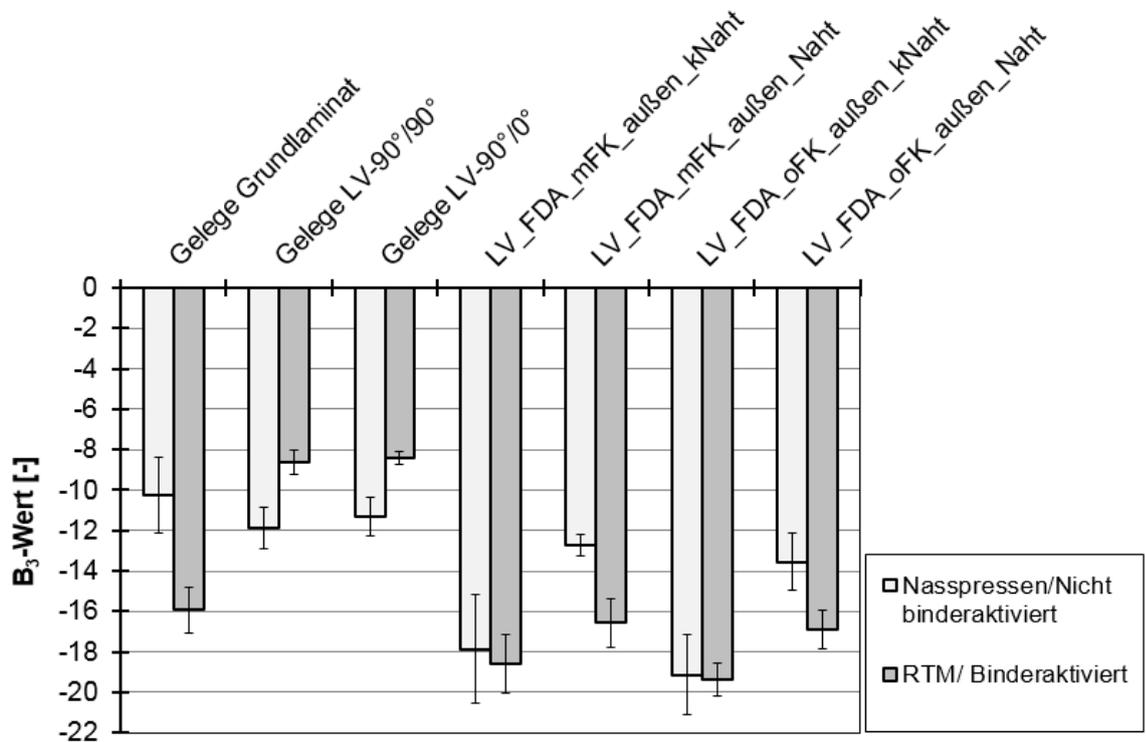
Dabei verkörpert s die Standardabweichung (SA). Die korrigierte Standardabweichung (s^2) ergibt sich aus Gleichung 5.3:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad . \quad \text{Gleichung A3.3}$$

A6: Permeabilität; B₁₂-Werte und B₃-Werte



a)



b)

Anhang: B₁₂- (a) und B₃- (b) Werte der Permeabilitätsanalyse

A7: Werkstoffcharakteristika der Analysen zur FFV, Füllsimulation und Laminatcharakterisierung

Standardfaservolumenanteile (RTM-Verfahren)					
	LV-90°/90°	LV-90°/0°	GL-Lage 1	GL-Lage 2	GL-Lage 3
Textilstärke [mm]	0,4	0,4	0,2	0,2	0,6
Lagengewicht [g/m ²]	334	332	179	179	638
Faservolumenanteil [%]	51	49	47	47	57
K ₁ [m ²]	1,2E-11	3,4E-11	1,1E-11	1,1E-11	1,6E-11
K ₂ [m ²]	1,8E-12	3,8E-12	4,0E-12	4,0E-12	2,6E-12
K ₃ [m ²]	2,8E-12	6,0E-12	1,9E-12	1,9E-12	1,6E-12

a)

Gemittelte Werte - Ungeschäfteter WDÜ			
	GL-Lage 1	GL-Lage 2	GL-Lage 3
Textilstärke [mm]	0,3	0,3	0,8
Lagengewicht [g/m ²]	179	179	638
Faservolumenanteil [%]	37	37	46
K ₁ [m ²]	3,1E-11	3,1E-11	9,8E-11
K ₂ [m ²]	1,5E-11	1,5E-11	2,0E-11
K ₃ [m ²]	4,1E-12	4,1E-12	3,9E-12

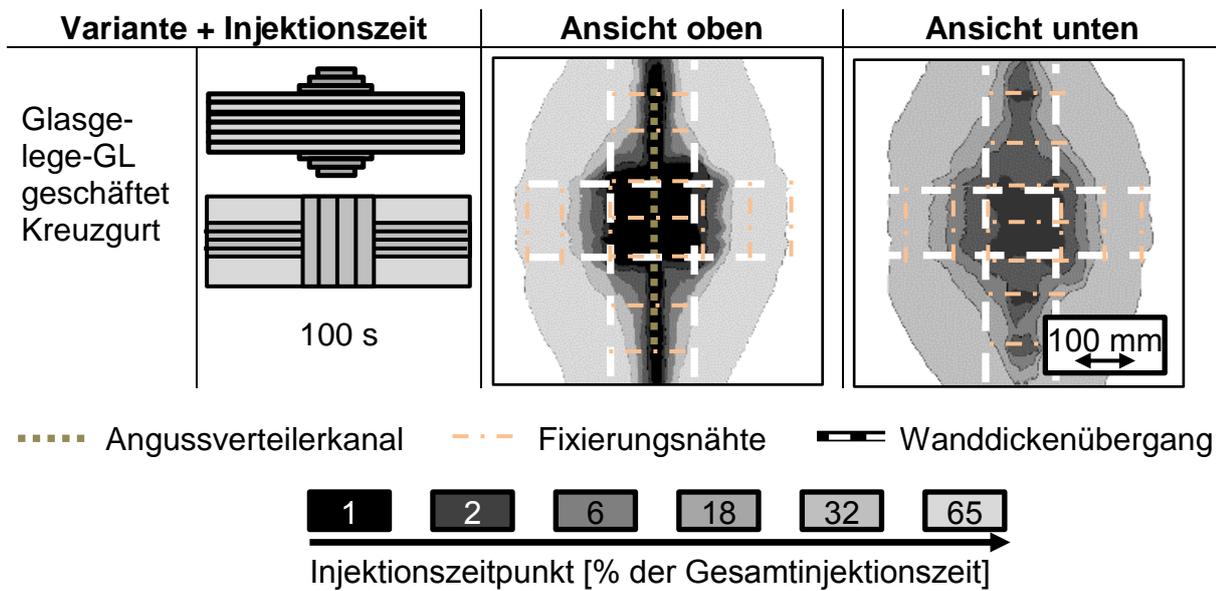
b)

Werte - Geschäfteter WDÜ					
	LV-90°/90°	LV-90°/0°	GL-Lage 1	GL-Lage 2	GL-Lage 3
Textilstärke [mm]	0,3	0,4	0,2	0,2	0,6
Lagengewicht [g/m ²]	334	332	179	179	638
Faservolumenanteil [%]	55	54	49	49	61
K ₁ [m ²]	8,5E-12	2,0E-11	3,7E-12	3,7E-12	8,7E-12
K ₂ [m ²]	1,1E-12	2,0E-12	9,2E-13	9,2E-13	1,4E-12
K ₃ [m ²]	1,5E-12	3,8E-12	1,7E-12	2,3E-12	3,2E-13

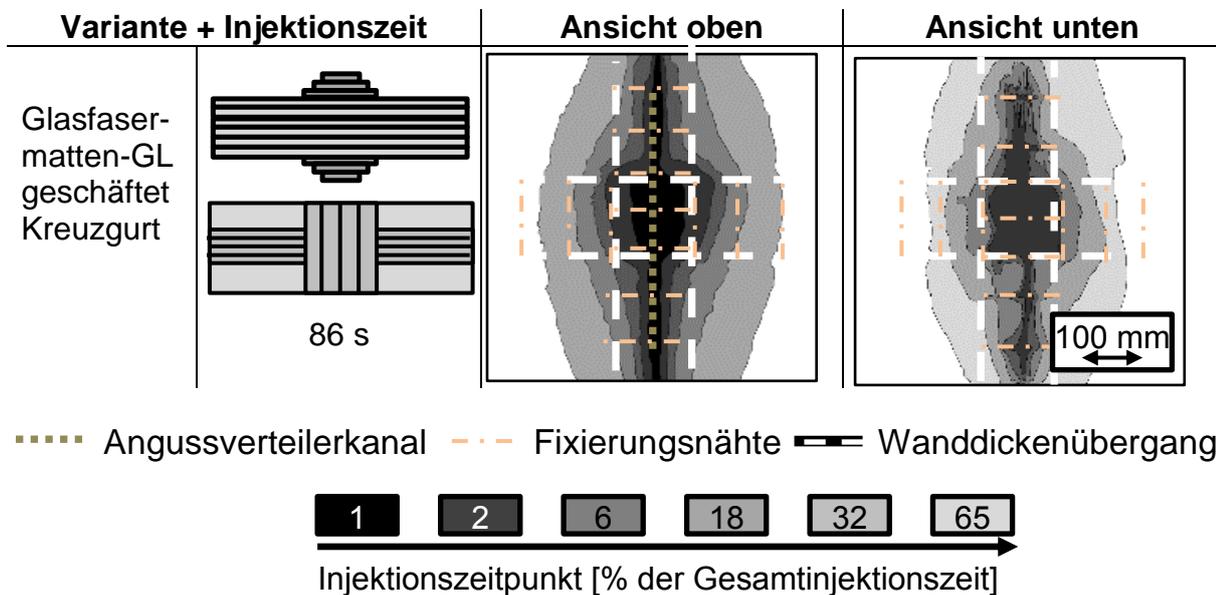
c)

Anhang: Parameter der FFV, der RTM-Füllsimulation und der RTM-Laminatcharakterisierung (Permeabilitäten, Wandstärken) bei Standard-FVG (a), mit ungeschäftetem WDÜ (b) und mit geschäftetem WDÜ (c).

A8: Fließfrontvisualisierungsergebnisse; Alternativwerkstoffe

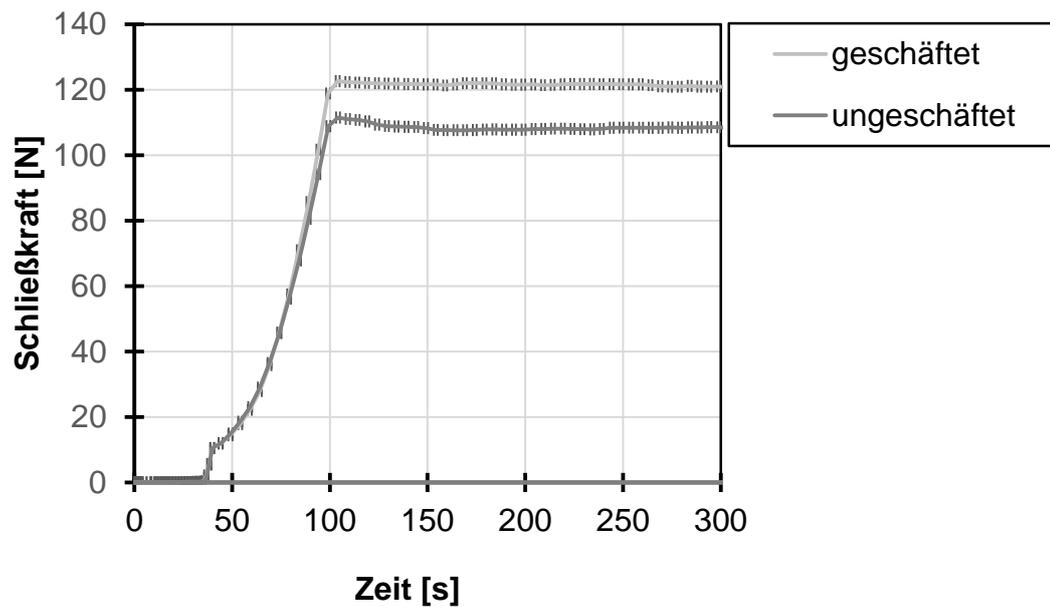


Anhang: Fließfrontverläufe von Glasfasergelegen mit lokalen Kohlenstofffasergelegeverstärkungen der Orientierungen 90°/90° und 0°/0°



Anhang: Fließfrontverläufe von Glasfasermatten mit lokalen Kohlenstofffasergelegeverstärkungen der Orientierungen 90°/90° und 0°/0°

A9: Prozessdatenauswertung; Schließkraftverläufe



Anhang: Gegenüberstellung der Schließkraftverläufe eines ungeschäfteten und geschäfteten Wanddickenübergangs der Variante 90°/0°

A10: Laminat- und Bauteilanalyse; Ergebnisse der makroskopischen Oberflächenbewertung

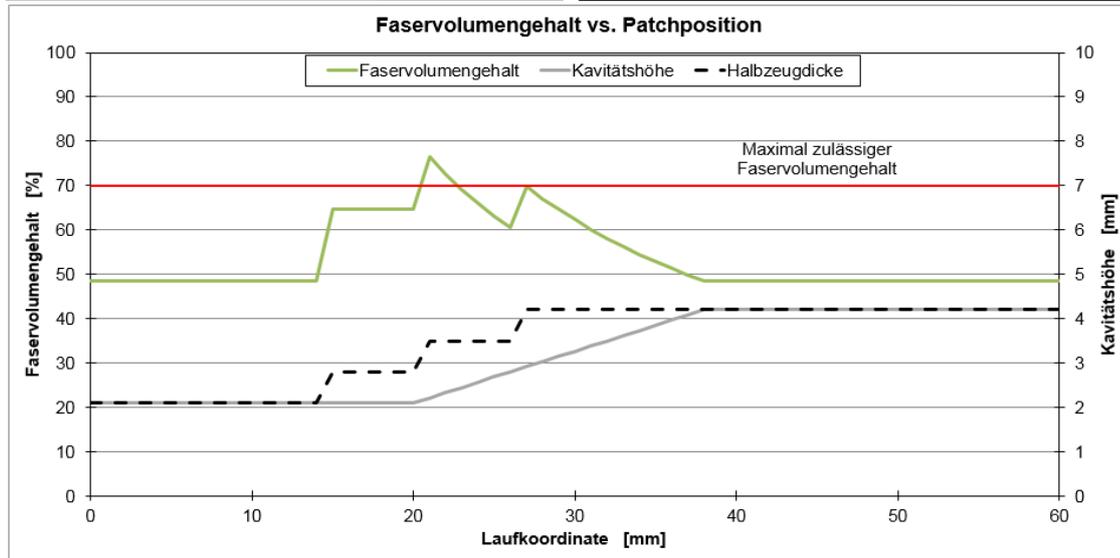
Anhang: Optische Makrobewertung: Beidseitig verstärkte Laminat

Beidseitig verstärkte Laminat							
	Innenliegend	Außenliegend	Geschäftet	Ungeschäftet	90°/90°	90°/0°	∅
Binder	36	34	35	35	33	37	35
Naht Q 65 mm	36	37	34	38	36	39	37
Naht Q 130 mm	36	36	-	36	36	-	36
Naht L 65 mm	39	34	-	37	37	-	37
Naht alle	37	36	35	37	36	38	36
∅	37	35	35	36	36	38	-

A11: Faservolumengehaltsverläufe an geschäfteten Wanddicken- übergängen mit lokalen Verstärkungslagen in Soll- und Fehl- position

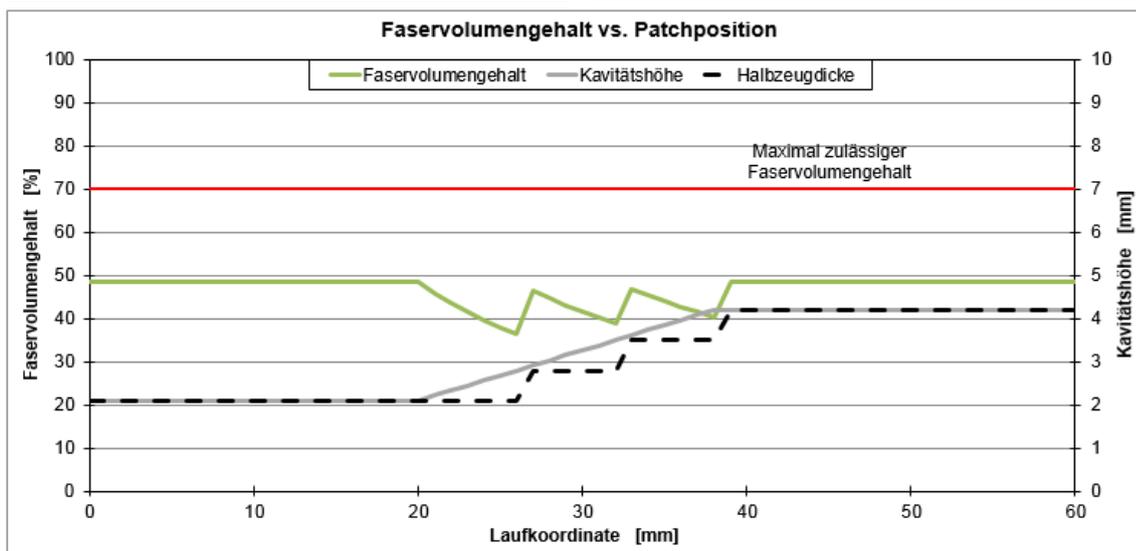
Lokale Verstärkung um 6,0 mm nach links zu höheren FVG verschoben:

Eingabe			Berechnung		
Patchverschiebung	[mm]	6,0	WS Gesamtlaminat	[mm]	4,2
WS Grundlaminat	[mm]	2,1	Länge Patchbereich	[mm]	18,0
Imprägniergrenze FVG	[%]	70	FG/REF	[kg/(m ² mm)]	857,1
Überlapp Patch	[mm]	6,0	FVG Max	[%]	48,4
Dichte Tailored Blank	[kg/m ³]	1770	FVG Min	[%]	36,3

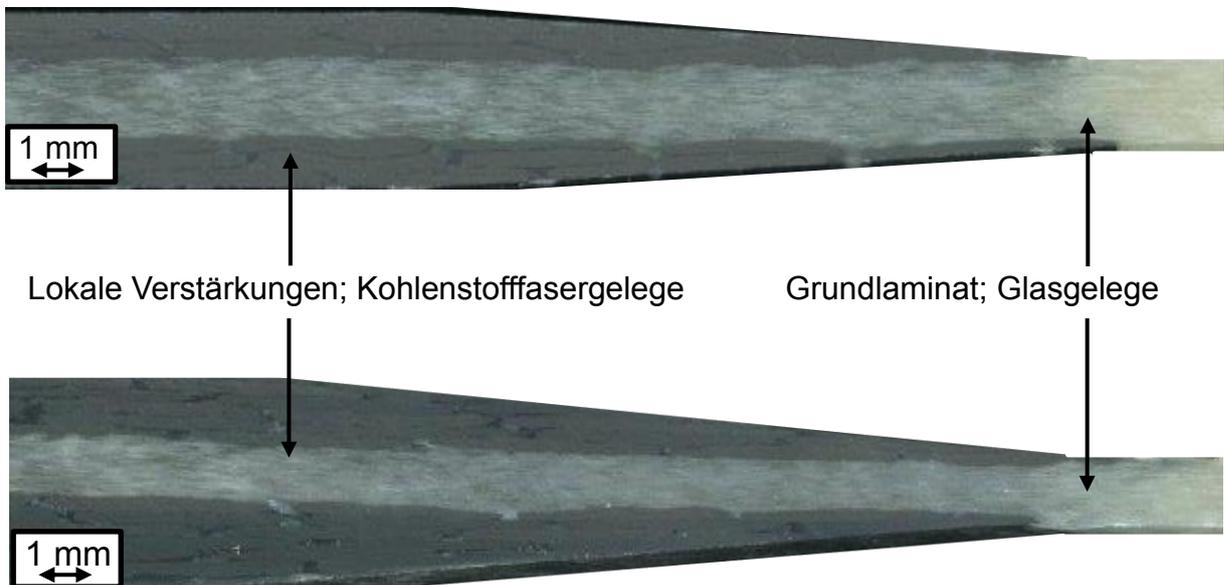


Lokale Verstärkung um 6,0 mm nach rechts zu niedrigeren FVG verschoben:

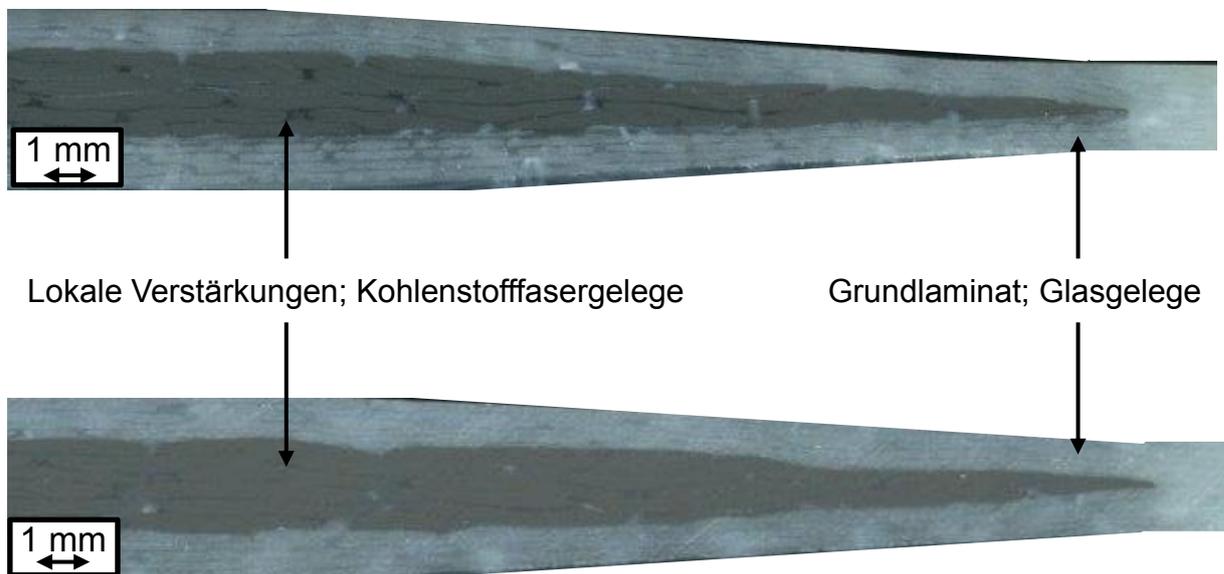
Eingabe			Berechnung		
Patchverschiebung	[mm]	-6,0	WS Gesamtlaminat	[mm]	4,2
WS Grundlaminat	[mm]	2,1	Länge Patchbereich	[mm]	18,0
Imprägniergrenze FVG	[%]	70	FG/REF	[kg/(m ² mm)]	857,1
Überlapp Patch	[mm]	6,0	FVG Max	[%]	76,5
Dichte Tailored Blank	[kg/m ³]	1770	FVG Min	[%]	48,4



Anhang: Faservolumengehaltsverläufe am WDÜ bei + und -4 mm fehlpositionierten lokal verstärkten Halbzeugen

A12: Schnittbildanalyse; Darstellung des Wanddickenübergangs

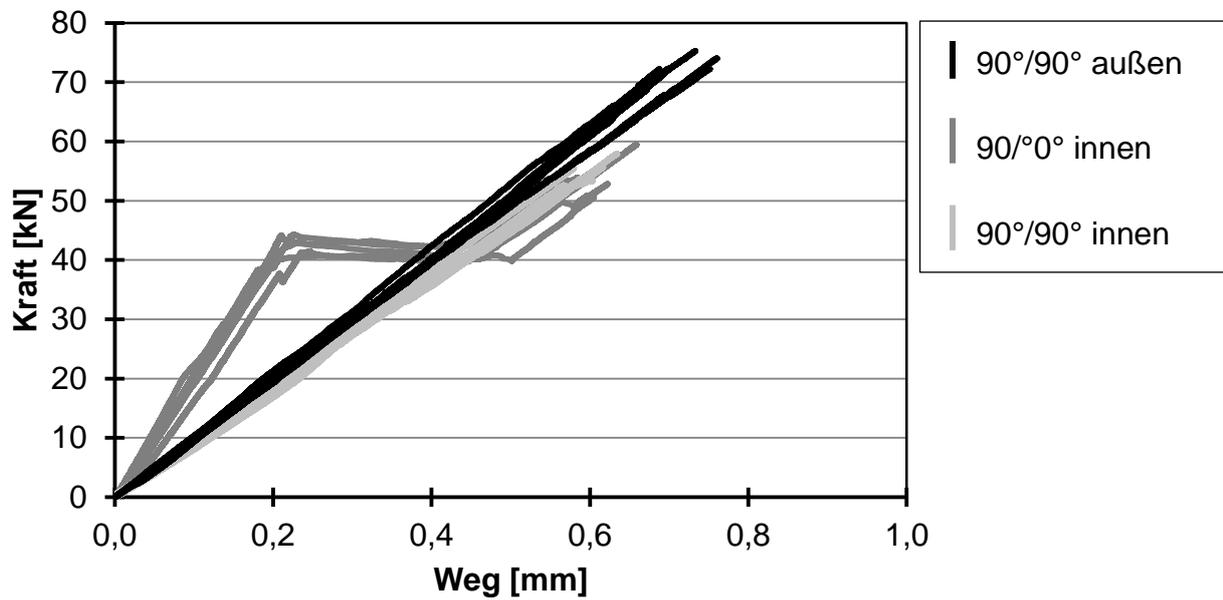
a)



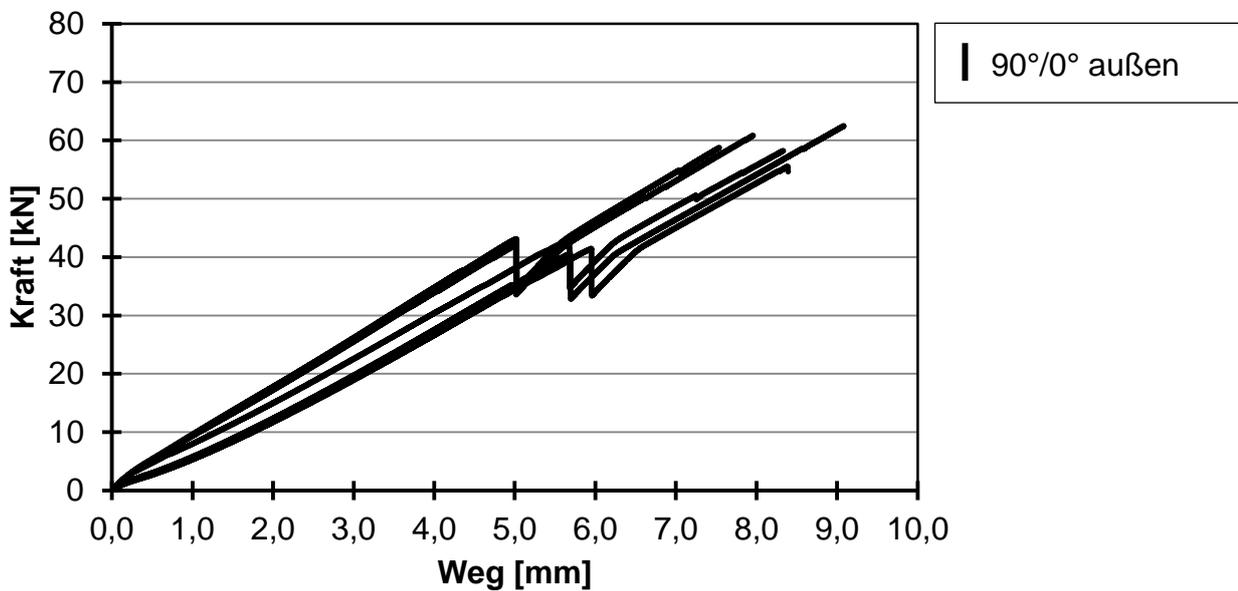
b)

Anhang: Schliffbilder lokal verstärkter Alternativgrundlamine (Glasgelege und Glaswirrmatten) mit außenliegenden (a) und innenliegenden lokalen Verstärkungslagen (b).

A13: Mechanische Zugprüfungen; Kraft-Weg-Verläufe



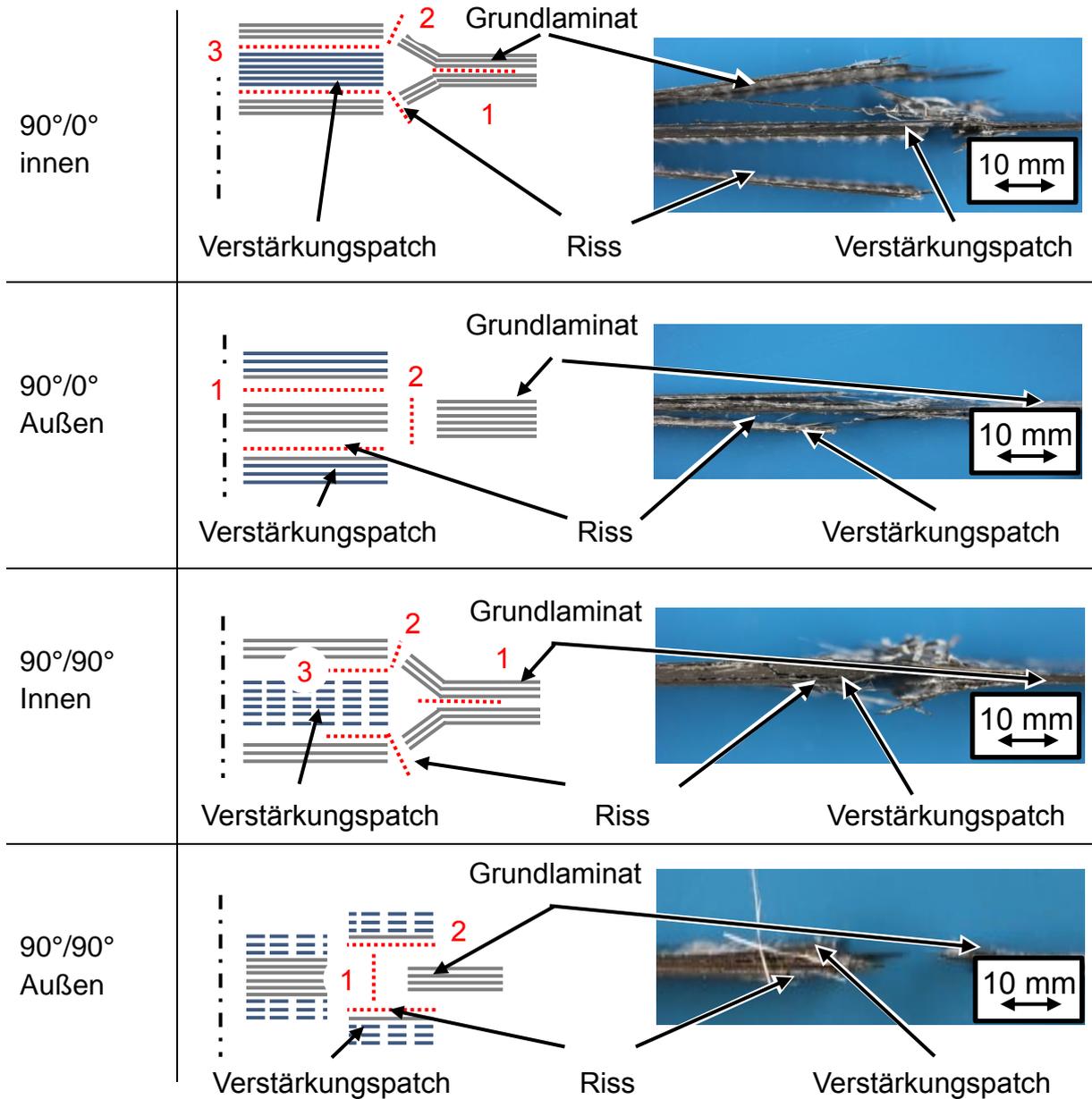
a)



b)

Anhang: Kraft-Weg-Verläufe lokal verstärkter Laminats mit geschäftetem WDÜ
 der Varianten 90°/90° außen, 90°/0° innen und 90°/90° innen (a)
 der Variante 90°/0° außen (b)

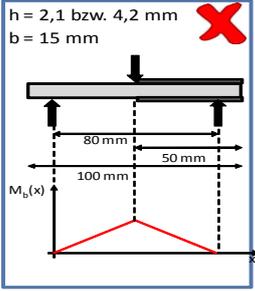
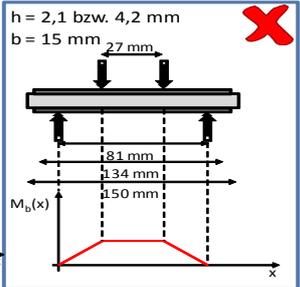
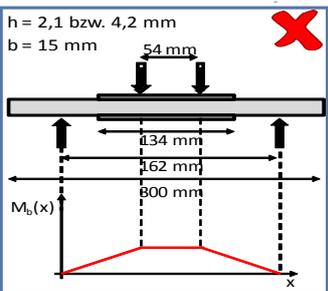
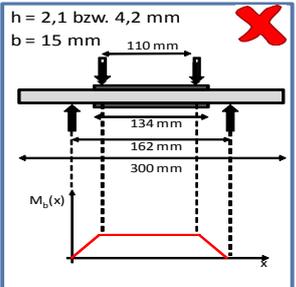
A14: Mechanische Zugprüfungen; Versagensbilder

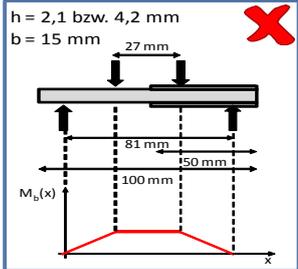
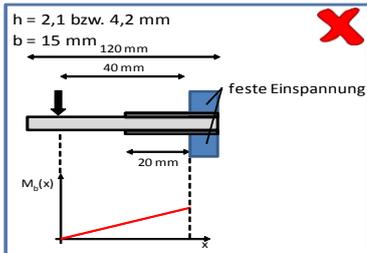
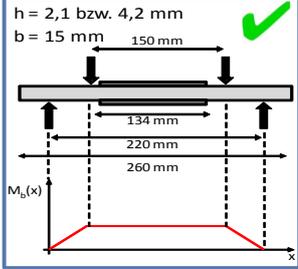


Anhang: Versagensbilder der Zugversuche

A15: Empirische Charakterisierung der Biegeeigenschaften; beleuchtete Versuchsszenarien

Anhang: Prüfvarianten zur vergleichenden Analyse lokal verstärkter Lamine unter Biegebelastung

Bezeichnung	Darstellung	Ausschlussgrund
Dreipunktbiegung nach DIN EN ISO 14125		Positionsabhängigkeit keine def. Lasteinleitung
4-Pkt.-Biegung, Abmessungen nach DIN EN ISO 14125 symmetr.		Keine Prüfung des WDÜ
4-Pkt.-Biegung, Abstandsverhältnis nach DIN EN ISO 14125		Keine Positionsunabhäng.
4-Pkt.-Biegung, frei, Lasteinleitung oben auf LV, symmetrisch		Keine Positionsunabhäng.

<p>4-Pkt.-Biegung, Abmessungen nach DIN EN ISO 14125, unsymm.</p>		<p>Undefinierte Lasteinleit.</p>
<p>Fest eingespannter Biegebalken</p>		<p>Positionsabhängigkeit Versagen an der Einspannung</p>
<p>4-Pkt.-Biegung, frei, Lasteinleitung im GL, symmetrisch</p>		<p>-</p>