

IVW - Schriftenreihe Band 142

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Florian Kühn

**Sequenzielle Imprägnierung
thermoplastischer Pulver-Towpregs**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

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

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

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice
Barbarossastr. 1
67655 Kaiserslautern
D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2020

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN 978-3-944440-39-2

Sequenzielle Imprägnierung thermoplastischer Pulver-Towpregs

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Florian Kühn

aus Mannheim-Neckarau

Tag der mündlichen Prüfung:	20. April 2020
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
2. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

D386

Für meinen Vater

„Im Gebirge der Wahrheit kletterst du nie umsonst: Entweder du kommst schon heute weiter hinauf oder übst deine Kräfte, um morgen höher steigen zu können.“

Friedrich Wilhelm Nietzsche (1844–1900), deutscher Philosoph

Vorwort

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2014 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH in Kaiserslautern.

An dieser Stelle möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang für die exzellente Betreuung und Erstbegutachtung meiner Arbeit danken. Seine wertvolle Förderung ermöglichte es mir meine wissenschaftlichen Fähigkeiten in einem ausgezeichneten Umfeld zu entwickeln. Auch möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Univ-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski für die Zweitbegutachtung meiner Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem ehemaligen WiMi-Kollegen und Vorgesetzten David May für seine Unterstützung und konstruktive Diskussionen, an denen ich persönlich und als Wissenschaftler wachsen konnte. Die Zitate zeitgenössischer Popkultur werde ich sehr vermissen.

Mit meinen ehemaligen D.A.Z.-Kollegen Oliver Rimmel, Björn Willenbacher, Tim Schmidt, Christian Goergen und Jan Eric Semar verbinden mich Jahre der ideenreichen, gemeinsamen Unterstützung sowie viele humorvolle Gespräche bei der einen oder anderen Tasse vorzüglichen Kaffees.

Auch den D.A.Z.-Mitarbeitern Holger Franz, Volker Disandt und Stefan Giehl danke ich für ein stets offenes Ohr und viele gute Ideen, wenn mal dringend welche benötigt wurden.

Allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IVW bin ich für die schöne gemeinsame Zeit, die gute Zusammenarbeit und die vielen wissenschaftlichen und nicht wissenschaftlichen Diskussionen sehr dankbar, im Besonderen Timo Grieser, Matthias Domm, Florian Gortner, Jovana Džalto, Martina Hümbert, Jens Mack, Stephan Becker, Benedikt Bergmann, Andreas Krämer, Alexander Nuhn, Maximilian Salmins, Julian Weber und Stefan Weidmann.

Ebenso möchte ich mich bei den Technikern und Laboringenieuren der Abteilung herzlich bedanken.

Abteilungsübergreifend danke ich Jan Rehra und Sebastian Schmeer für die gute Zeit bei gemeinsamen Projekten und Dienstreisen, sowie für die vielen Gespräche, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die tatkräftige Unterstützung bei zahlreichen Untersuchungen und Studien möchte ich allen beteiligten Studierenden meinen herzlichen Dank ausdrücken. Dazu zählen Joachim Meeß, Christian Böhm, Nils Oswald, Colin Märker, Manuel Paas, Stefan Wolke, André Barth, Mounika Masireddy, Daniel Steuer, Daniel Saar, Stefan Buchalik-Bopp, Laura-Sofie Adam, Adrian Ackermann, Steven Peters und Dikran Cakmak.

Kai Schumacher danke ich für die Begleitung in den Anfängen meines Hobbys Modellfliegen und die damit verbundene Weichenstellung auf dem Weg zu den Ingenieurwissenschaften.

Für seine langjährige Freundschaft und die gemeinsame Zeit des Studiums bis zur Promotion danke ich Ron Sebastian.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mich auf meinem gesamten Lebensweg bedingungslos unterstützt, gefördert und meine Ausbildung ermöglicht haben.

Von Herzen danke ich schließlich meiner Frau Anke für die große Geduld und Unterstützung, die dem Gelingen dieser Arbeit maßgeblich zugrunde lag.

Kaiserslautern, Juni 2020

Florian Kühn

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	V
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	VII
Kurzfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Konzept einer neuen Prozesskette zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste	3
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Automatisierte Faserablage.....	7
2.1.1 Thermoplastisches Tapelegen (TTL).....	10
2.1.2 Direktes Preforming mittels Dry Fiber Placement (DFP)	14
2.2 Herstellung und Verarbeitung flächiger, kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste (Organobleche)	15
2.2.1 Pressprozesse zur Imprägnierung und Konsolidierung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste.....	16
2.2.2 Thermoformen von Organoblechen.....	18
2.3 Prepregs zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste	20
2.3.1 Schmelzprägnieren.....	21
2.3.2 Lösungsmittelprägnieren	22
2.3.3 Pulverprägnieren	22
2.3.4 Direkte Verarbeitung thermoplastischer Pulver-Towpregs	27
2.4 Imprägnierung, Konsolidierung und Solidifikation.....	28
2.4.1 Makro- und Mikroprägnierung.....	29
2.4.2 Einflussgrößen der Imprägnierung	30

2.4.3	Konsolidierungsverhalten thermoplastischer Tapes	34
2.4.4	Imprägniermechanismen bändchenförmiger Pulverprepregs	34
2.5	Statistische Versuchsplanung	36
2.6	Schlussfolgerungen	42
3	Versuchsmaterialien	45
3.1	Verstärkungsfasern	45
3.2	Matrixpolymer	46
4	Konzeption und Untersuchung einer Methode zur Herstellung thermoplastischer Pulver-Towpregs im Labormaßstab	48
4.1	Anforderungen an den Bepulverungsprozess	48
4.2	Vorversuche zur TPT-Herstellung	49
4.2.1	Versuchsaufbau: Vorversuche zur TPT-Herstellung	49
4.2.2	Ergebnisse der Vorversuche	51
4.3	Versuchsaufbau: Angepasste Pulverappliziereinheit (TPT).....	52
4.4	Methoden und Versuchsplanung zur Bewertung des TPT-Herstellungsprozesses.....	56
4.4.1	Untersuchung der Thermoplastpulvererwärmung	57
4.4.2	Analyse der applizierten Pulvermenge	58
4.4.3	Überprüfung der Homogenität der Bepulverung des TPT	59
4.5	Ergebnisse zur Bewertung des Bepulverungsprozesses.....	60
4.5.1	Thermoplastpulvererwärmung im TPT-Herstellungsprozess.....	60
4.5.2	Applizierte Pulvermenge und Prozessstabilität.....	62
4.5.3	Homogenität des TPT	64
5	Untersuchung des Imprägnierfortschritts bei der TPT-Ablage (Preforming) im Tapelegeprozess.....	68
5.1	Versuchsaufbau: Labortapelegeanlage	68
5.2	Versuchsplanung und Methode zur Untersuchung des Tapelegeprozesses	71

5.2.1	Statistische Versuchsplanung des Tapelegeprozesses	71
5.2.2	Schliffbildanalyse und -auswertung der Tapelegeproben.....	75
5.3	Ergebnisse und Auswertung des Tapelegeprozesses.....	77
5.3.1	Ergebnisse der Schliffbildanalyse der Tapelegeproben	77
5.3.2	Statistische Auswertung des Tapelegeprozesses	80
5.4	Einfluss der Werkzeugplattentemperatur auf den Imprägnierfortschritt beim Tapelegen.....	83
5.4.1	Versuchsdurchführung und Methode zur Messung der Einzellagentemperaturen	83
5.4.2	Abschätzung des Prozesszeitfensters zur Aufschmelzung der Thermoplastpartikel.....	84
5.4.3	Auswertung und Ergebnisse zum Imprägnierfortschritt bei hohen Werkzeugplattentemperaturen	86
6	Untersuchung des Imprägnierfortschritts im Pressprozess.....	92
6.1	Versuchsaufbau: Pressprozess	92
6.1.1	Laborpresse	92
6.1.2	Presswerkzeug.....	93
6.1.3	Direktimprägnierung im variothermen Pressprozess.....	94
6.1.4	Überprüfung der Werkzeugtemperatur.....	95
6.2	Versuchsplanung und Methode zur Untersuchung des Pressprozesses.....	97
6.2.1	Statistische Versuchsplanung des Pressprozesses	97
6.2.2	Schliffbildanalyse und -auswertung der Pressproben.....	100
6.3	Ergebnisse und Auswertung des Pressprozesses	101
6.3.1	Ergebnisse der Schliffbildanalyse der Pressproben	102
6.3.2	Statistische Auswertung des Pressprozesses	105
7	Einfluss der Vorimprägnierung im Preformingprozess (Tapelegen) auf die Imprägnierung im Pressprozess	107

7.1	Versuchsplanung zur Untersuchung der Querbbeeinflussung des Preformingprozesses auf den Pressprozess	107
7.1.1	Parameter Tapelegeprozess	107
7.1.2	Parameter Pressprozess	108
7.2	Ergebnisse und Bewertung der Querbbeeinflussung des Preformingprozesses auf den Pressprozess	109
8	Zusammenfassung	113
9	Literatur	117
10	Anhang.....	129
	Betreute studentische Arbeiten	135
	Publikationen	137
	Lebenslauf.....	139

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
°C	Temperaturangabe in Grad Celsius
µm	Mikrometer
AFP	Automated Fiber Placement
ATL	Automated Tape Laying
bar	Einheit für den Druck
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMC	Bulk Molding Compound
CF	Kohlenstofffaser (von engl. carbon fiber)
CNC	Computerized Numerical Control
DFP	Dry Fiber Placement
DoE	Statistische Versuchsplanung (von engl. Design of Experiments)
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FML	Faser-Metall-Laminat
FTV	Faser-Thermoplast-Volumenverhältnis
FVG	Faservolumengehalt
Gew.-%	Gewichts-Prozent
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
IR	Infrarot
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe
kt	Kilotonne
LCM	Flüssigimprägnierverfahren (von engl. Liquid Composite Molding)
l/min	Normliter pro Minute
PA6	Polyamid 6
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon

PEI	Polyetherimide
PP	Polypropylen
Pp	Prozentpunkt
PVG	Porenvolumengehalt
REM	Rasterelektronenmikroskop
SMC	Sheet Molding Compound
TE	Thermoelement
TP	Thermoplast
TPT	Thermoplastisches Pulver-Towpreg
TTL	Thermoplastisches Tapelegen
UD	Unidirektional

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\partial P / \partial x$	Pa/m	Druckgradient
ΔP	Pa	Druckabfall
A_m	m ²	Mantelfläche
c_p	J/kg K	Spezifische Wärmekapazität
dt	s	Zeitraum zum Erwärmen eines Thermoplastpartikels
dU	J	Änderung der inneren Energie
f	-	Freiheitsgrad
F_K	N	Kraft der Konsolidierungsrolle
F_s	N	Schließkraft der Presse
H_v	l/min	Heißgasvolumenstrom
K	m ²	Permeabilität
m	-	Anzahl Faktorstufenkombinationen
m_F	g	Fasermasse
m_{ges}	g	Gesamtmasse
m_T	g	Thermoplastmasse
n	-	Anzahl Wiederholungen
N	-	Versuchsumfang
p_k	bar	Systemdruck des Pneumatikzylinders der Konsolidierungsrolle
p_w	bar	Werkzeuginnendruck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
r	m	Radius
r_f	m	Faserradius
s^2		Mittelwert der Einzelvarianzen
s_d	-	Schätzwert der Standardabweichung
s^2	-	Einzelvarianz
t	s	Zeit
T_d	°C	Degradationstemperatur der Matrix
tex	g/km	Längengewicht
t_i	s	Imprägnierzeit

T_k	°C	Temperatur Konsolidierungsrolle
T_m	°C	Schmelztemperatur
T_p	°C	Temperatur der Heiz- und Kühlplatte
T_u	°C	Umgebungstemperatur
T_w	°C	Temperatur der Werkzeugplatte
T_{wz}	°C	Werkzeugtemperatur
t_z	s	Zeitintervall (Parameter der Laborpresse)
V_F	m ³	Faservolumen
V_{ges}	m ³	Gesamtvolumen
v_w	m/min	Vorschubgeschwindigkeit der Werkzeugplatte
x	m	Fließlänge
y_i	-	Einzelergebnisse der statistischen Versuchsplanung

Griechische Zeichen	Einheit	Beschreibung
\bar{v}	m/s	Mittlere Fließgeschwindigkeit
η	Ns/m ²	Viskosität
λ	W/m K	Wärmeleitfähigkeit
π	-	Pi
ρ_F	g/cm ³	Dichte Fasern
ρ_T	g/cm ³	Dichte Thermoplast

Kurzfassung

Die automatisierte Faserablage bietet ein hohes Potenzial zur individuellen Herstellung belastungsgerechter, kontinuierlich faserverstärkter Verbundwerkstoffe, wodurch diese Fertigungstechnologie zur Herstellung thermoplastischer Hochleistungsverbundbauteile immer mehr in den Fokus aktueller Entwicklungen rückt. Hierbei beschränkt sich diese Technologie derzeit hauptsächlich auf die Verarbeitung von vollimprägnierten und -konsolidierten Halbzeugen (Tapes). Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neu konzeptionierte Prozesskette, basierend auf der Kombination trockener Rovings (GF) und Polymerpulver (PC/PBT) zu thermoplastischen Pulver-Towpregs, deren anschließender, automatisierter Faserablage zu vorimprägnierten Preforms und der Direktimprägnierung im variothermen Pressprozess, durchlaufen. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wurden die Prozessschritte der Faserablage und des variothermen Pressprozesses methodisch untersucht. Die daraus resultierenden Ergebnisse liefern ein grundlegendes Prozessverständnis der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der Imprägniermechanismen und -fortschritte. Es konnte gezeigt werden, dass im Tapelegeprozess maßgeblich eine Makroimprägnierung der Faserstruktur erreicht wird, welche auch den nachfolgenden Pressprozess signifikant beeinflusst. Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden somit die Grundlage zu Verständnis und Anwendung der neuen Prozesskette, sowie der Einstellung und Bewertung der Prozessparameter zur Herstellung kontinuierlich, lastgerecht faserverstärkter Thermoplaste mit individuellen Matrix- und Faserwerkstoffen.

Abstract

Automated fiber placement offers a high potential for the individual production of load-optimized, continuous fiber reinforced polymer composites. Therefore, this technology is increasingly in the focus of current developments, especially for the manufacture of high performance thermoplastic composite parts. In the field of thermoplastic composites, this technology is currently limited to the processing of fully impregnated and consolidated semi-finished products (tapes). Within the presented research, a newly designed process chain based on the combination of dry rovings (GF) and polymer powder (PC/PBT) to thermoplastic powder-towpregs, their subsequent automated fiber placement to pre-impregnated preforms and direct impregnation within the variothermal pressing process, was methodically investigated using design of experiments. The results provide a basic process understanding of the individual processing steps with regard to impregnation mechanisms and progress. It has been shown that a macro-impregnation of the fiber structure is achieved within the fiber placement process, which also significantly influences the subsequent pressing process. Thus, the results of this work form the basis for understanding and application of the new process chain as well as for the adjustment and evaluation of the process parameters for the production of continuous and load-optimized fiber reinforced thermoplastic composites with individual matrix and fiber materials.

1 Einleitung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund einer globalen Forderung nach nachhaltigem Umweltschutz und Ressourcenschonung, spielt der Aspekt des Leichtbaus in der heutigen Zeit eine immer größer werdende Rolle. Gegenüber Werkstoffen wie Metallen bieten Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), mit ihren potenziell wesentlich höheren spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten, ein großes Leichtbaupotenzial, weshalb diese FKV seit Jahrzehnten immer stärker eingesetzt werden. Der Markt für FKV wies somit in den vergangenen Jahren, bis auf wenige Ausnahmen, ein stabiles Wachstum auf, wobei thermoplastische Verbundwerkstoffe in Verbindung mit Glasfasern (GF) die Hauptwachstumstreiber in großvolumigen Anwendungen darstellen. [1–4] Die Bedeutung der glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) wird bei der Betrachtung der europäischen Herstellungsmengen (siehe Abbildung 1.1) deutlich, wobei in dieser Darstellung keine kurzglasfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffe (z. B. Spritzgussmassen) berücksichtigt wurden. Der europäische Markt für thermoplastische, kurzglasfaserverstärkte (Faserlänge: < 2 mm) Materialien umfasste im Jahr 2018 etwa 1.544 kt. [2]

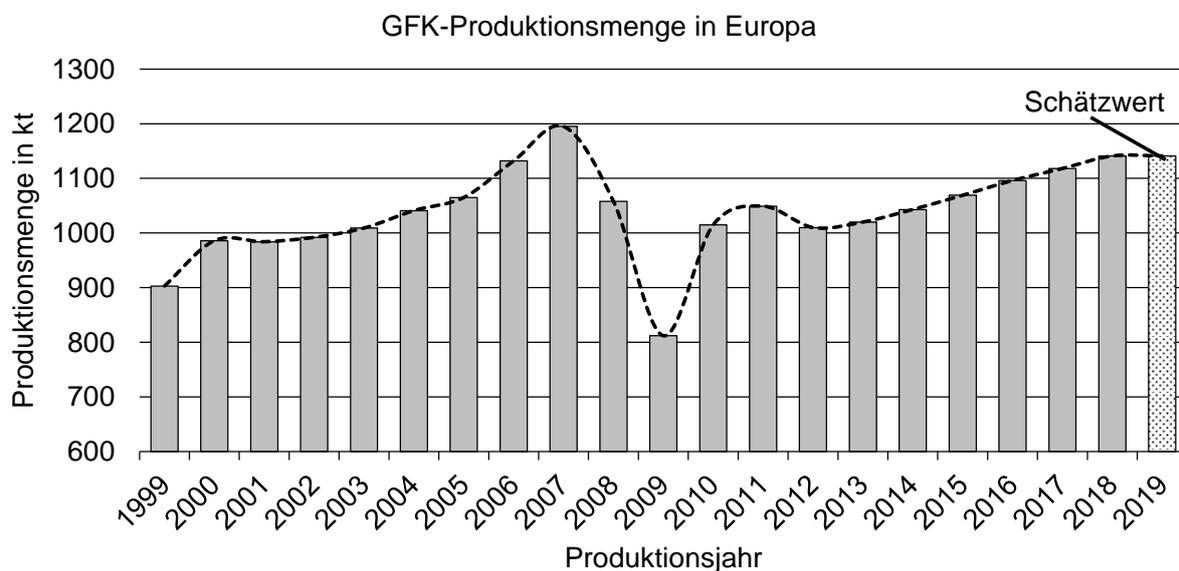


Abbildung 1.1: GFK-Produktionsmenge in Europa seit 1999 nach [2]

Im Jahr 2019 stellten GFK (duroplastisch und thermoplastisch), mit einer geschätzten Menge von 1,141 Mio. Tonnen, über 90 % der Gesamtmarktmenge des Verbundwerkstoffmarktes dar, wobei das kontinuierliche Wachstum von

durchschnittlich ca. 2 % pro Jahr seit 2013 bis 2018 im Jahre 2019 zum ersten Mal stagniert. Von dieser Stagnation sind nicht alle Bereiche gleichermaßen betroffen, so konnten beispielsweise die Bereiche Sheet Molding Compound und Bulk Molding Compound (SMC/BMC), Pultrusion und die thermoplastischen Verfahren weiter zulegen. [2]

Mit zunehmendem Einsatz der thermoplastischen FKV rücken ihre Leistungsfähigkeit und Multifunktionalität immer weiter in den Fokus der Entwickler und Anwender. Ein Hauptvorteil thermoplastischer Verbundwerkstoffe gegenüber duroplastischen Verbundwerkstoffen sind die quasi unbegrenzte Haltbarkeit, die kurze Verarbeitungszeit, die gesundheitliche Unbedenklichkeit während der Verarbeitung und ihre Fähigkeit, wiedergeschmolzen und in bedingtem Maße wiederaufbereitet zu werden. Im Gegensatz zu duroplastischen Matrixsystemen erlauben faserverstärkte Kunststoffe mit thermoplastischen Matrixsystemen kürzere Zykluszeiten, da kein Aushärtungsschritt (Vernetzung) notwendig ist, die Solidifizierung der Thermoplaste erfolgt durch Abkühlung. Die Möglichkeit thermoplastische Werkstoffe mehrfach aufzuschmelzen bietet zudem die Möglichkeit der Anwendung einer Vielzahl an Herstellungs- und Reparaturtechnologien, wie der Umformung, dem Schweißen und eine gute Rezyklierbarkeit. [5–9]

Kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste (Faserlänge: > 50 mm [10, 11]) bieten als Werkstoff, neben dem hohen Leichtbaupotenzial, eine Reihe weiterer vorteilhafter Eigenschaften, wie hohe Schlagzähigkeit, gute mechanische Dämpfungseigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und ein hohes Energieabsorptionsvermögen bei mechanischer Beanspruchung wie bspw. im Crashfall. Wichtige und weit verbreitete Vertreter kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste sind dabei flächige thermoplastische Halbzeuge mit textiler Faserverstärkung (Organobleche), welche meist Anwendung in der Großserienproduktion finden. [5, 12] Um die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern gezielt zu nutzen und somit ein hohes Leichtbaupotenzial der Thermoplastbauteile zu erreichen, sind vor allem unidirektionale (UD) Faserstrukturen und lastgerechte Auslegungen der Bauteile, sowie eine gezielte Materialauswahl mit der damit verbundenen Möglichkeit zur Erzeugung hybrider Bauteile besonders wichtig.

Zur Herstellung von lokal lastgerechten Faserstrukturen ist der Tapelegeprozess, bei dem meist vollimprägnierte und konsolidierte, kontinuierlich faserverstärkte thermoplastische Halbzeuge (Tapes) verarbeitet werden, besonders geeignet. Die manuelle oder automatisierte Ablage der Tapes im Automated Fiber Placement (AFP) ermöglicht einen gezielten Materialeinsatz mit geringem Verschnitt und lastgerechte Faserstrukturen. [5, 7, 12–14] Solche Tapes sind jedoch nur in bestimmten Materialkombinationen und Konfigurationen (Fasern und Polymere) erhältlich, sodass eine begrenzte und vorbestimmte Materialauswahl zur Verarbeitung zur Verfügung steht. Das Anwendungsspektrum und der gezielte Materialeinsatz dieses ansonsten flexiblen Prozesses sind somit deutlich eingeschränkt.

Im Bereich der kontinuierlich faserverstärkten Duroplaste hat sich das Dry Fiber Placement (DFP) als besonders flexibler Preformingprozess etabliert. Das DFP als modifiziertes Tapelegeverfahren greift auf nicht imprägnierte Rovings zurück, um trockene, lastorientierte und individuelle Preforms für das Liquid Composite Molding (LCM) herzustellen. Die Anhaftung der einzelnen Rovings während des Ablegeprozesses wird durch ein Bindersystem, welches auf den Roving appliziert wird, realisiert. [15] Das DFP ist in Bezug auf die Rohstoffe (Rovings) besonders flexibel, sodass individuelle Geometrien und Hybridstrukturen (z. B. Stahlfaser/Kohlenstofffaser) mit geringen Anpassungen des Preformingprozesses erzeugt werden können. [16]

Bisher ist dieser besonders materialflexible Prozess des DFP nicht auf die Verarbeitung von Thermoplasten übertragbar, da eine nachträgliche Imprägnierung trockener Preforms aufgrund der hohen Schmelzviskosität der Thermoplaste nicht umsetzbar ist. Nachfolgend wird ein neues Konzept einer Pulver-Towpreg basierten Prozesskette beschrieben, mit der die Vorteile des DFP mit der Verarbeitung bändchenförmiger, thermoplastischer Halbzeuge kombiniert werden können. Basierend darauf werden weiterhin die Zielsetzung und Struktur der Arbeit dargestellt.

1.1 Konzept einer neuen Prozesskette zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste

Die konzeptionierte Fertigungsprozesskette (siehe Abbildung 1.2) stellt eine Zusammenführung verschiedener Fertigungsverfahren aus den Bereichen der kontinuierlich faserverstärkten Thermoplaste und Duroplaste dar. [17]

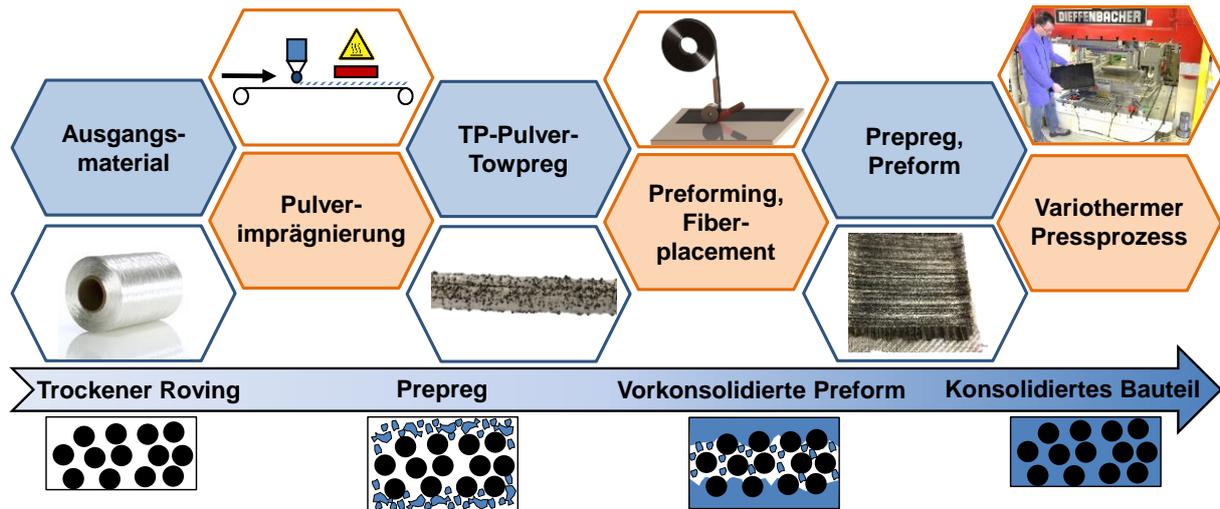


Abbildung 1.2: Prozesskette zur Pulver-Towpreg basierten Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste [17]

In einem ersten Schritt wird ein thermoplastisches Pulver-Towpreg (TPT) auf Rovingebene hergestellt, wobei die gesamte, für die vollständige Imprägnierung erforderliche, Polymermenge auf dem Roving appliziert wird. Im nächsten Schritt findet eine Verarbeitung des TPT zu Preforms durch einen Tapelegeprozess statt, wobei das thermoplastische Pulver die Funktion eines Binders (vergleichbar mit dem DFP) übernimmt. Im Gegensatz zu dem Prozess des thermoplastischen Tapelegens werden die TPT somit nicht vollständig imprägniert und konsolidiert dem Ablageprozess zugeführt. Die vollständige Imprägnierung und Konsolidierung der abgelegten Preforms findet im letzten Verarbeitungsschritt durch einen variothermen Pressprozess statt.

Mit diesem Verfahren soll durch die Verwendung und flexible Kombination von Rohstoffen (Rovings und Polymerpulver) auf die Halbzeugstufen des Tapes mit vollständiger Imprägnierung der Rovings verzichtet werden. Die Nutzung von Pulver-Prepregs ermöglicht weiterhin eine einfache und sichere Handhabung, was bei der Weiterverarbeitung eine wichtige Rolle spielt. [18] Bei erfolgreicher Prozessumsetzung können die Verstärkungsfasern und das Polymerpulver direkt verarbeitet werden, gleichzeitig erlaubt die variable Ablagemöglichkeit eine lokal lastgerechte Verstärkung sowie die Erzeugung materialhybrider Strukturen und somit ein hohes Leichtbaupotenzial. Perspektivisch können mit diesem Herstellungsverfahren auch Hybridbauteile (Kombination verschiedener Rovingmaterialien, z. B. GF und Stahlfasern) hergestellt werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die methodische Untersuchung der sequenziellen Imprägnierung von TPT innerhalb der neuen, kombinierten Prozesskette (siehe Abbildung 1.2). Als Ergebnis sollen die Einflüsse der Kernprozessparameter auf den Imprägnierfortschritt innerhalb der Einzelprozesse Tapelegen und Pressen ermittelt, sowie die Quereinflussung der Vorimprägnierung im Tapelegeprozess auf die Imprägnierung des Pressprozesses bewertet werden. Dazu soll zunächst eine Methode zur Herstellung von TPT im Labormaßstab konzeptioniert und untersucht und anschließend die Prozesskette exemplarisch mit einer Materialkombination (Faser und Matrix) vollständig durchlaufen werden. In Abbildung 1.3 sind der Aufbau und das methodische Vorgehen innerhalb der Arbeit symbolisch dargestellt.

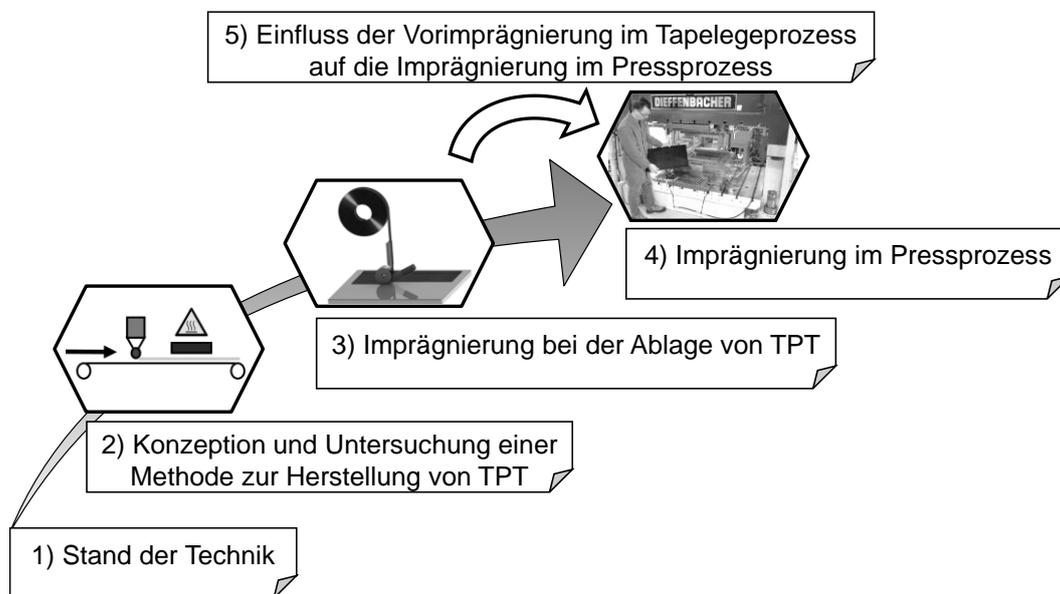


Abbildung 1.3: Strukturierung der Arbeit

Im **ersten Schritt** wird der Stand der Technik bezüglich der Herstellung und Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste dargestellt. Dies schließt alle für die neue Prozesskette relevanten Verfahren und Prozesse ein, wobei in besonderem Maße auf die Herstellung und Verarbeitung pulverimprägnierter Halbzeuge eingegangen wird. Basierend darauf werden die zugrundeliegenden Imprägniermechanismen identifiziert und beschrieben. Erläuterungen zur statistischen Versuchsplanung schließen den Stand der Technik ab.

In einem **zweiten Schritt** findet eine Konzeption und Untersuchung einer Methode zur Herstellung von TPT im Labormaßstab statt. Dazu werden entsprechende

anlagen- und prozesstechnische Entwicklungen durchgeführt. Dies beinhaltet auch die Untersuchung der Prozessstabilität und der Qualität der so hergestellten Halbzeuge.

Im **dritten Schritt** werden die hergestellten Halbzeuge im Tapelegeprozess zu Preforms verarbeitet und mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung die Signifikanz der Kernprozessparameter (Tapelegeprozess) und deren Wechselwirkungen auf die Imprägnierung der TPT untersucht. Die Ergebnisse werden anschließend hinsichtlich der dominanten Imprägniermechanismen beurteilt.

Im **vierten Schritt** wird die vollständige Imprägnierung und Konsolidierung der im vorangegangenen Prozessschritt hergestellten Preforms im variothermen Pressprozess untersucht. Auch bei dieser Untersuchung wird die statistische Versuchsplanung angewandt, um die Signifikanz der Kernprozessparameter (Pressprozess) und deren Wechselwirkungen auf die Imprägnierung der Preforms zu bewerten.

In einer **abschließenden Studie** wird die Querverbeeinflussung des Prozesses der Vorimprägnierung im Tapelegeprozess auf den Prozess der Imprägnierung des Pressprozesses auf Basis der vorangegangenen Versuchsreihen untersucht und eingeordnet.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel soll ein Überblick über kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste gegeben und die entsprechenden Herstellungsverfahren nach dem aktuellen Stand der Technik erläutert werden. Dazu zählen vor allem die Herstellung und automatisierte Ablage thermoplastischer Tapes und die Herstellung und Verarbeitung von flächigen thermoplastischen Halbzeugen (Organobleche) zusammen mit den entsprechenden Imprägniermechanismen. Weiterhin wird der Preformingprozess des DFP mit seinen individuellen Eigenschaften und Vorteilen beschrieben.

2.1 Automatisierte Faserablage

Das Automated Fiber Placement (AFP) sowie das Automated Tape Laying (ATL) als übergeordnete Fertigungsprozesse ermöglichen eine automatisierte, positions- und richtungsvariable Ablage von unidirektional faserverstärkten Halbzeugen (Tapes) oder Rovings zu komplexen, flächigen Preforms oder Bauteilen. Die Ablage erfolgt diskontinuierlich, indem einzelne Tapebahnen abgelegt werden und dadurch schichtweise ein Laminat oder Bauteil ergeben. Die Orientierung der Fasern in der Ebene ist während der Ablage frei wählbar, sodass ein Lagenaufbau erzeugt wird, der individuellen Belastungsanforderungen gerecht werden kann. [12, 19–21] Dies ermöglicht die Generierung großer, flächiger Laminats und schalenförmiger Strukturen mit einer hohen Leichtbaugüte, die zusätzlich durch eine lokale Verstärkung oder Laminataufdickung belastungsgerecht angepasst werden können, ohne dem gesamten Bauteil unnötig große Dicken aufzuprägen. So können funktions- und beanspruchungsgerechte Bauteile optimal dimensioniert werden, was eine hohe Gewichtsoptimierung ermöglicht. [5, 12, 22]

Die Begriffe AFP und ATL werden hauptsächlich in Bezug auf die Breite der verwendeten Ausgangsmaterialien (Halbzeuge) unterschieden. Die Breite der Halbzeuge beeinflusst dabei maßgeblich die Geometrie und Herstellbarkeit der in den jeweiligen Prozessen zu produzierenden Bauteile. Beim AFP, welches nach [23] auf Halbzeugbreiten von 3,175 mm bis 25,4 mm (1/8" bis 1") zurückgreift, wird jedes abgelegte Tape senkrecht zur Längsachse des Tapes geschnitten, um so durch die Ablage vieler schmaler Tapes endkonturnahe und verschnittarme Bauteile zu erzeugen. Im ATL Verfahren kommen hingegen Halbzeuge mit einer größeren Breite

von 76,2 mm bis 304,8 mm (3" bis 12") zum Einsatz. [23] Die Ablage dieser breiten Halbzeuge ermöglicht den Zuschnitt der Tapes entsprechend der Bauteilkontur, was den Verschnitt weiter reduzieren und die Zeit für nachfolgende Prozessschritte, wie das Besäumen der Bauteile, verkürzen kann. [13, 23] Baley et al. [8], sowie Henning und Moeller [19] benennen die Halbzeugbreite für das AFP von 3,175 mm bis 12,7 mm [8, 19], Henning und Moeller definieren weiterhin die Halbzeuge beim ATL bis zu einer Breite von 600 mm. [19]

Durch die große Halbzeugbreite eignet sich das ATL am besten für ebene Bauteile mit glatten und flachen Oberflächen. Das AFP kann hingegen durch die Verwendung der schmalen Tapes zur Erzeugung deutlich komplexerer Geometrien eingesetzt werden. Die Ablage schmaler Tapes ermöglicht beispielsweise die Realisierung stark gekrümmter Oberflächen und Ablegebahnen, während breitere Tapes (ATL) solche Geometrien nicht zulassen oder dabei knicken und das Laminat somit schwächen. [21] Weiterhin limitierend auf die herstellbare Bauteilgeometrie wirkt sich die minimale Ablegelänge, der Abstand zwischen Ablagepunkt und Schneideinheit des Tapelegers, aus. Diese minimale Ablegelänge begrenzt die herstellbare Größe der Bauteile somit auf eine Mindestgröße, die maximale Bauteilgröße hingegen ist theoretisch unbegrenzt und erlaubt die Herstellung großer Komponenten wie Flugzeugflügel oder -rumpfsegmente. [12]

Derzeit werden zur Ablage der Tapes oder Rovings Robotersysteme oder Portalanlagen mit entsprechenden Ablegeköpfen genutzt, wodurch eine exakte, schnelle und reproduzierbare Ablage die Prozesszeit verkürzen und die Qualität steigern kann. [5, 24–28] Ein Anwendungsbeispiel, welches den AFP-Prozess mittels robotergestützter Ablage an der *IVW GmbH* zeigt, ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

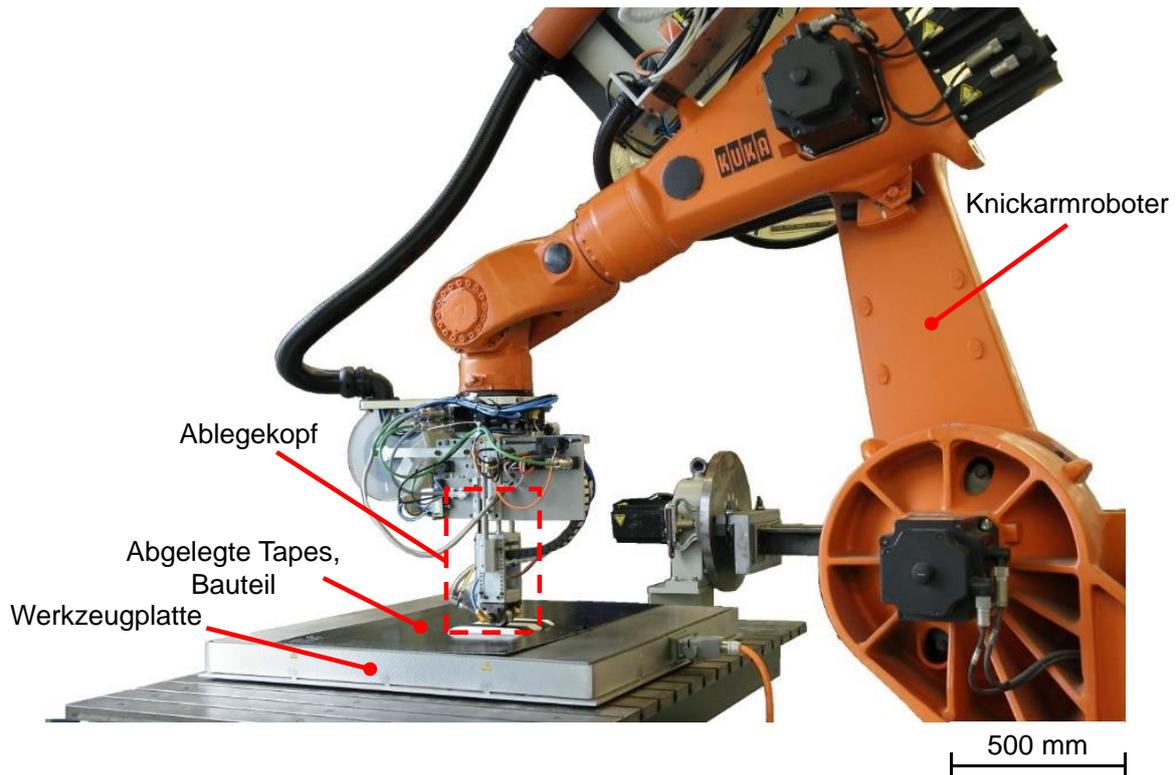


Abbildung 2.1: Ablage von Tapes im robotergeführten AFP-Prozess (System entwickelt an der IVW GmbH) [28]

Im Beispiel der Abbildung 2.1 wird das Tape bei der Verarbeitung durch eine Führung hindurch zur Konsolidierungsrolle des Ablegekopfes gefördert, wo es von einer Heißgasflamme aufgeheizt und durch die Konsolidierungsrolle auf die Oberfläche der Werkzeugplatte, bzw. des bestehenden Bauteils, appliziert wird. [28]

Grundsätzlich gibt es für die Ablage des UD-Tapes keine Einschränkung bei der Wahl der Faser- und der Matrixmaterialien. In den AFP und ATL Verfahren können somit unterschiedliche Halbzeugmaterialien in verschiedenen Faser-Matrix-Kombinationen verarbeitet werden, auch eine Hybridisierung durch die Verarbeitung unterschiedlicher Fasertypen (z. B. CF und Stahlfasern) ist möglich, ebenso die Verarbeitung von Naturfasern. [8, 16]

Sowohl das thermoplastische Tapelegen (TTL), als auch das DFP zur Erzeugung trockener Preforms im LCM Prozess zählen zu den AFP Verfahren und werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Der wesentliche Unterschied beider Verfahren besteht zunächst darin, dass die im TTL verwendeten thermoplastischen Tapes (Halbzeuge) vollimprägniert und -konsolidiert sind (die aufwendige Imprägnierung und Konsolidierung des trockenen Rovings mit der hochviskosen, thermoplastischen

Matrix wird in einen separaten Prozess ausgelagert), wobei sie bereits über den angestrebten Faservolumengehalt (FVG) des gewünschten Bauteils verfügt. Bei den im DFP genutzten Tapes handelt es sich dagegen um sogenannte Bindertapes. Diese besitzen nur eine sehr geringe Beladung mit einem Binderpolymer, welches für die Anhaftung der Tapes während des Ablageprozesses benötigt wird. Die eigentliche, duroplastische Matrix des Bauteils muss in einem separaten Imprägnierungsprozess in die hergestellte Preform (endkonturnahe, fixierte Faserstruktur) eingebracht werden.

2.1.1 Thermoplastisches Tapelegen (TTL)

Wie bereits beschrieben, basiert der Prozess des TTL auf dem AFP Prozess und verfügt somit über die genannten Vorteile dieses Prozesses. In Abbildung 2.2 ist der schematische Aufbau einer Tapelegeeinheit (Tapelegekopf) dargestellt.

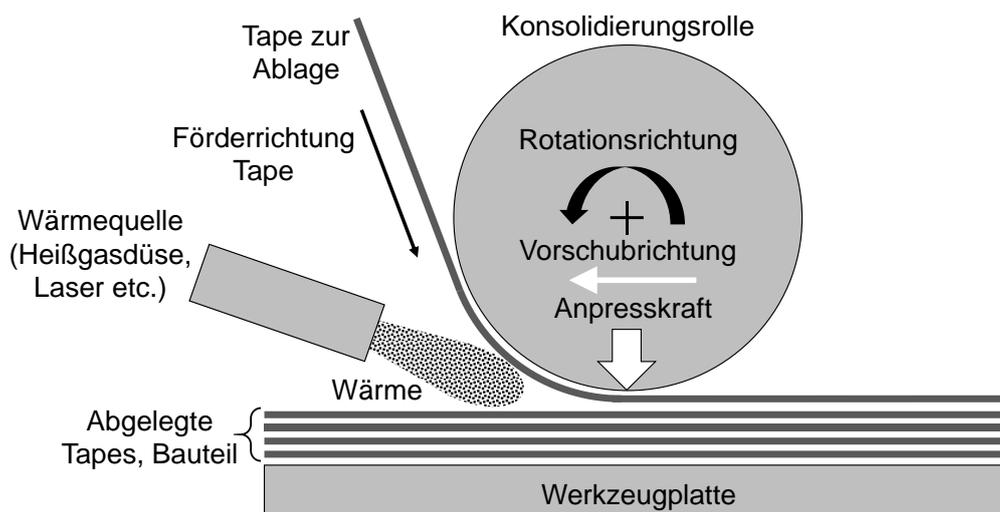


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Tapelegekopfes zum TTL oder DFP [20, 29, 30]

Die Ablage der Tapes findet auf einer Werkzeugplatte statt. Sie dient als Unterlage für die erste Faserlage, womit sie dem Bauteil oder der Preform die geometrische Form vorgibt. Eine Beheizung der Grundplatte ermöglicht dabei eine bessere Anhaftung der Tapes an die Werkzeugplatte und der einzelnen Tapelagen untereinander, da die bereits abgelegten Tapes des Laminats durch die Beheizung eine höhere Grundtemperatur annehmen. [31] Das abzulegende Tape wird unmittelbar vor der Ablage durch eine Wärmequelle erwärmt, um so die Matrix über ihre Schmelztemperatur T_m aufzuheizen. Neben Infrarot (IR)-, Laser- und Ultraschallverfahren hat sich hierbei besonders das Heißgasverfahren mittels

Heißgasdüse durchgesetzt. [32–35] Auch die Matrix des bereits abgelegten Bauteils, bzw. der Preform, unterhalb der Tapeablage wird dabei erwärmt und erneut aufgeschmolzen. Dies führt dazu, dass sich die Matrix der oberen Laminatlage und die des abzulegenden Tapes teilweise oder vollständig verbinden. Die Applizierung des Tapes auf der Grundplatte, bzw. der oberen Lage des Laminats, wird durch die Konsolidierungsrolle mit einer definierten Anpresskraft erreicht. Gleichzeitig finden durch den Kontakt zur Konsolidierungsrolle eine Abkühlung des Tapes und damit die Solidifizierung der thermoplastischen Matrix statt. Die Ablegegeschwindigkeit wird durch den Vorschub der Konsolidierungsrolle oder der Grundplatte bestimmt. [20, 26, 28, 36]

Durch die Verwendung vollständig imprägnierter und konsolidierter, thermoplastischer UD-Tapes wird mit diesem Verfahren eine direkte Bauteilherstellung durch die In-situ-Konsolidierung möglich, welche seit mehreren Jahren untersucht wird. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die vollständige Konsolidierung der verschiedenen Tapelagen direkt während des Ablegeprozesses erfolgt, sodass eine zeit- und energieaufwändige Nachkonsolidierung in einer Presse oder einem Autoklaven entfällt. [14, 20, 27, 28, 34, 36, 37] Dies ermöglicht ein hohes Maß an Prozessautomatisierung, sowie die Herstellbarkeit großflächiger Komponenten wie Strukturbauteile in der Luft- und Raumfahrt, da die Nachkonsolidierung im Autoklaven als größenlimitierender Prozessschritt entfällt. [25, 38, 39] Um eine hohe Konsolidierungsqualität während der Tapeablage zu gewährleisten, sind die Parameter Temperatur, Anpresskraft, sowie die Vorschubgeschwindigkeit, die die Wirkdauer der beiden zuvor genannten Parameter bestimmt, entscheidend. [28, 40]

Aktuelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass Prozesse, welche eine In-situ-Konsolidierung zum Ziel haben, die Gefahr eines hohen, unerwünschten Porengehalts im Laminat bergen können. Henne et al. [38] nennen als Ursachen hierfür eine ungenaue Temperaturverteilung und eine zu geringe Energiezufuhr, die hauptsächlich durch die Legegeschwindigkeit beeinflusst wird. Eine zu hohe Energiezufuhr und -eindringtiefe verursachen wiederum Mikrorisse oder Deformationen. Zudem kann eine zu geringe Konsolidierungsdauer zur Dekonsolidierung führen, wodurch Poren und Fehlstellen entstehen. [38] Der für eine vollständige Konsolidierung zur Verfügung stehende Zeitraum ist zudem, bis auf

wenige Ausnahmen in speziell abgestimmten Fertigungskonzepten, bei den meisten TTL Prozessen zu gering, sodass keine vollständige Konsolidierung im Prozess erreicht wird. [12, 41] Die kurzen Prozesszeitfenster des Aufheizens, Konsolidierens und Abkühlens wurden u. a. von Stokes-Griffin und Compston [42] an der Verarbeitung von CF-PEEK Tapes beschrieben.

Die so hergestellten Bauteile müssen in solchen Fällen nach dem Tapelegeprozess, durch einen nachgeschalteten Konsolidierungsschritt in einer Presse oder einem Autoklaven, nachkonsolidiert werden. Die Bauteilqualität sowie die mechanische Performance lassen sich durch eine solche Nachkonsolidierung deutlich verbessern, wodurch Hochleistungsanwendungen in der Luft- und Raumfahrt erschlossen werden können. Ohne den zusätzlichen Schritt einer Nachkonsolidierung wird andererseits ein besonders schlanker Prozess ermöglicht, der eine für viele Anwendungen ausreichende Bauteilqualität liefert. Dabei können komplexe Bauteile oder Preforms kosteneffizient hergestellt werden. [12, 43, 44]

Wird explizit keine vollständige Konsolidierung im TTL Prozess angestrebt, so eignet sich dieser Prozess zur schnellen Bauteilherstellung in der Art eines Preformingprozesses, bei welchem die einzelnen Lagen des Laminats nur lokal fixiert und so für einen anschließenden Konsolidierungsprozess vorbereitet werden. [12]

Die nachfolgend vorgestellten Prozesse sind Beispiele aktueller Entwicklungen, die auf die automatisierte Faserablage zurückgreifen, ohne dabei auf die klassische Tapelegetechnologie (vgl. Abbildung 2.2) zurückzugreifen.

Kühnel et al. [45] zeigten am Beispiel einer generischen Flugzeugaußenhautkomponente, dass das Preforming von carbonfaserverstärkten Thermoplasten durch robotergestützte Ablage vorgeschchnittener UD-Halbzeuge mit Hilfe von Greifersystemen und die Fixierung der Preform durch Ultraschallschweißen umgesetzt werden kann. Das Demonstratorbauteil wurde dabei mit seinen unterschiedlichen Lagendicken individuell und belastungsgerecht automatisiert abgelegt und anschließend in einem Konsolidierungswerkzeug per Vakuumaufbau vollständig konsolidiert. [45]

Kropka et al. [7, 13] entwickelten ein auf der Ablage unidirektional verstärkter Thermoplasttapes basierendes Preformingsystem FORCE-Placement (siehe Abbildung 2.3, links). Dieses Preformingsystem ermöglicht eine

Ablagegeschwindigkeit von zwei Sekunden je Tapeestreifen, unabhängig von der Tapelänge (die Prototypanlage erlaubt eine maximale Ablegelänge von 1500 mm). Auch diese Preformtechnologie basiert auf dem richtungsvariablen Ablegen und Punktufraschallschweißen individuell zugeschnittener Tapes mit einer Breite von 50 mm bis 165 mm. Für eine kurze Prozesszeit und gleichzeitig hohe Flexibilität werden zwei Ablegetische verwendet, einer zur Ablage einzelner Laminatlagen mit Hilfe eines Vakuumgreifersystems, ein weiterer, drehbarer Tisch zum Stacking der Lagen in frei wählbarer Orientierung. [7, 13]

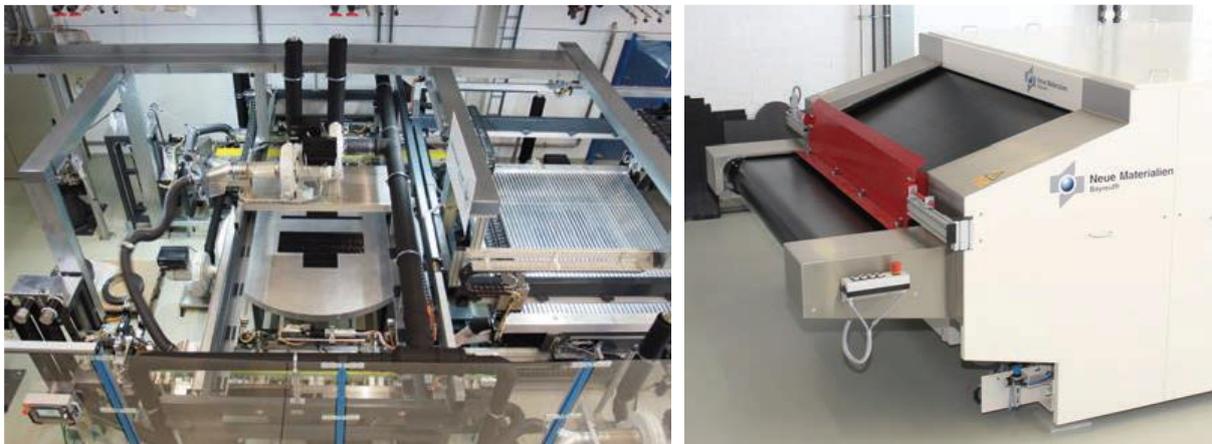


Abbildung 2.3: FORCE-Placement Anlage zur Erzeugung individueller thermoplasttapestasierter Preforms (links) [13], Doppelbandpresse zur Vorkonsolidierung (rechts) [7]

Die so hergestellten, fixierten Preforms werden anschließend in einem nachgeschalteten Prozessschritt in einer Doppelbandpresse (siehe Abbildung 2.3, rechts) vorkonsolidiert. [7, 13, 44] Die vorkonsolidierten Preforms können anschließend in einem hybriden Thermoform-Spritzgussprozess umgeformt und hinterspritzt werden. [7, 13]

Diese vorgestellten Technologien ermöglichen somit die verschnittarme Herstellung individuell, lastgerecht verstärkter Thermoplaste, benötigen jedoch eine Vielzahl einzelner Prozess- und Konsolidierungsschritte, welche für eine hohe Laminatqualität notwendig sind. Weiterhin nachteilig ist, dass diese Prozesse auf vollimprägnierte und vollkonsolidierte Halbzeuge zurückgreifen, welche als kommerziell erhältliche Halbzeuge zugekauft werden müssen, was die Materialauswahl und -kombinationsmöglichkeit einschränkt. Eine direkte Verarbeitung von Matrix und Fasermaterial ist bei diesen aktuellen Entwicklungen nicht vorgesehen. Aufgrund der

hohen Viskosität schmelzflüssiger Thermoplaste und dem damit verbundenen Zeitaufwand zur Benetzung der Einzelfilamente, ist die Imprägnierung und Konsolidierung bei der Verarbeitung endlosfaserverstärkter Thermoplaste vom Bauteilformgebungsvorgang entkoppelt.

2.1.2 Direktes Preforming mittels Dry Fiber Placement (DFP)

Das DFP ist eine direkte Preformtechnologie, welche die Herstellung einer endkonturnahen Preform aus trockenen Einzelrovings, bzw. Bindertapes, für die Weiterverarbeitung (Imprägnierung) in duroplastischen Flüssigimprägnierverfahren (LCM-Prozessen) ermöglicht. Dabei werden die Rovings durch eine automatisierte Faserablage auf eine Werkzeugoberfläche, oder ein bereits bestehendes Halbzeug, aufgebracht. Die Fixierung der Rovings erfolgt durch den Einsatz eines Binders (thermoplastischer oder duroplastischer Binder, in Form von Pulver, Emulsionen oder Spinnvliesen) mit einem Anteil von ca. 3 – 10 Gew.-%. Analog zum TTL wird das Bindertape durch eine Wärmequelle unmittelbar vor der Ablage aufgeheizt und das Bindermaterial somit aktiviert. [5, 15, 16, 19, 46–48] Das Bindersystem kann in einem vorangehenden Bebinderungsprozess auf die trockenen Rovings aufgebracht, oder in situ während der Ablage appliziert werden. [46, 49] Der Aufbau der Ablegeeinheit zum DFP entspricht prinzipiell dem der Ablegeeinheit, die beim TTL zum Einsatz kommt (vgl. Abbildung 2.2). Daher ist es möglich, auf einer vorhandenen Anlage beide Verarbeitungsprozesse umzusetzen. [46] In einem nachfolgenden Injektionsprozess wird die Preform mit einer duroplastischen Matrix infiltriert. [15]

Derzeit werden im DFP hauptsächlich CF verarbeitet, wobei aktuelle Entwicklungen das DFP auf neue, großvolumige Anwendungsebenen bringen sollen, wie z. B. die Herstellung von schalenförmigen Großbauteilen in der Luftfahrt, oder in der Automobilindustrie. [50–53] Aufgrund der Flexibilität des DFP in Bezug auf die Faserwerkstoffe (Rovings) können individuelle Geometrien und Hybridstrukturen (z. B. Stahlfaser/Kohlenstofffaser) durch entsprechende Anpassungen des Preformingprozesses erzeugt werden. Solche Strukturen werden aktuell beispielsweise im Bereich des Blitzschutzes für Strukturanwendungen in der Luftfahrt untersucht. [16] Um die erforderliche elektrische Leitfähigkeit für den Blitzschutz zu gewährleisten, werden FKV derzeit durch zusätzliche Funktionsmaterialien, wie Kupfer- oder Bronzegitter, modifiziert. Diese Gitter tragen aufgrund der schlechten

mechanischen Eigenschaften jedoch nicht zur mechanischen Performance dieser Hybridlamine bei, sodass das mit der Hybridisierung einhergehende zusätzliche Gewicht das Leichtbaupotenzial reduziert. [16, 54] Der Einsatz von Metallfasern zur Erzeugung auf Materialebene hybridisierter Bauteile bietet für solche Anwendungen eine Reihe an Vorteilen. So kann die hohe Faseroberfläche die Faser-Matrix-Haftung verbessern, während die Imprägnierbarkeit der Hybridpreform, aufgrund der porösen Faserstruktur, im Gegensatz zu anderen Hybridisierungskonzepten, wie die geschlossenen Metallfolien bei den Faser-Metall-Laminaten (FML), erhalten bleibt. [16, 19, 55, 56] Aus diesem Grund beschäftigen sich aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit hybriden faserverstärkten Verbundwerkstoffen, die hervorragende mechanische Eigenschaften aufweisen und durch die Kombination von Stahlfasern und organischen oder anorganischen Verstärkungsfasern neue Anforderungen erfüllen können. So sollen die metallischen Komponenten (Metallfasern) nicht mehr als parasitäres Material (wie bspw. Kupfer- oder Bronzegitter) angesehen werden, sondern integraler Bestandteil eines hybriden Verbundkonzeptes sein, bei dem jedes Material entsprechend seiner Eigenschaften optimal genutzt wird. [55, 57–60] Neueste Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anwendung des DFP die Hybridisierung von organischen- oder anorganischen Verstärkungsfasern und Stahlfasern auf Materialebene ermöglicht, wobei die textile Verarbeitung der Stahlfasern, welche hochabrasiv sind und herkömmliche Textilmaschinen ohne deren aufwändige Modifikation beschädigen können, umgangen wird. [16]

2.2 Herstellung und Verarbeitung flächiger, kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste (Organobleche)

Verbreitete Vertreter kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste sind Organobleche, welche als flächige Halbzeuge durch die Verarbeitung von Prepregs in einem vorwiegend offenen Pressprozess hergestellt werden. Im Folgenden werden zunächst die Pressprozesse zur Imprägnierung und Konsolidierung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste vorgestellt, anschließend folgt die Weiterverarbeitung dieser Organobleche in einer Umformtechnik, dem Thermoformen.

2.2.1 Pressprozesse zur Imprägnierung und Konsolidierung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste

Die zur vollständigen Imprägnierung und Konsolidierung eingesetzten Pressprozesse lassen sich grundsätzlich in offene und geschlossene Prozesse mit entsprechenden Presswerkzeugen unterscheiden. Zu den offenen Pressprozessen zählen das diskontinuierliche, das semi-kontinuierliche und das kontinuierliche Prozessprinzip, welche qualitativ in Abbildung 2.4 dargestellt sind. [5, 61]

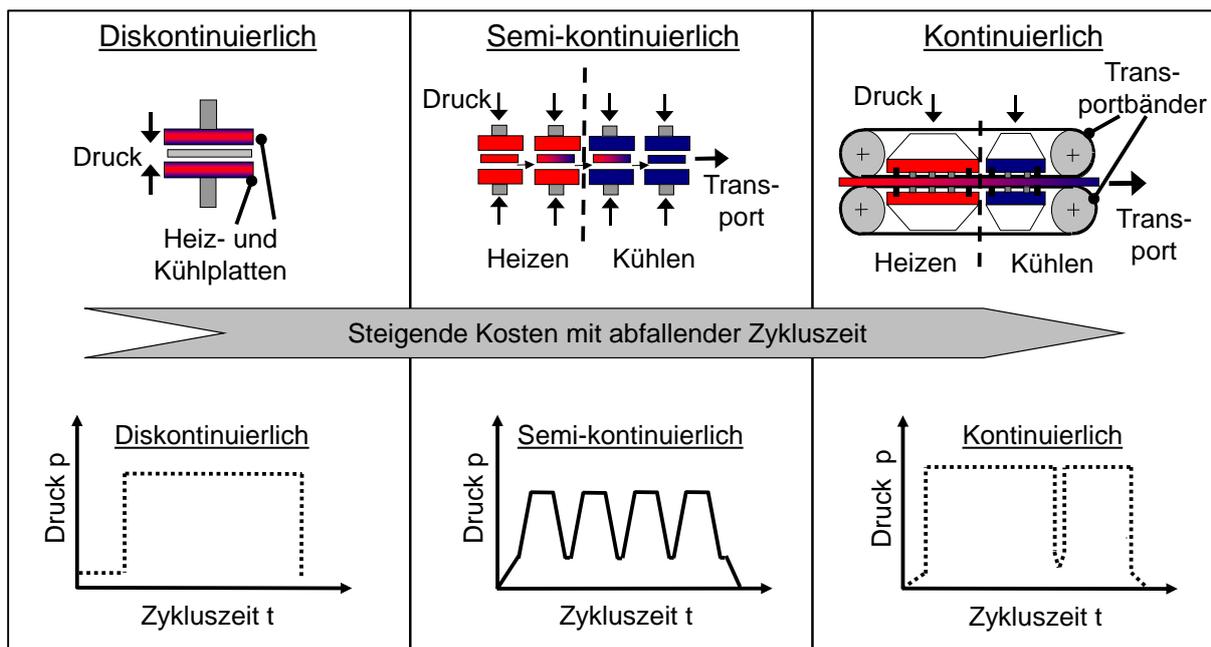


Abbildung 2.4: Anlagentechniken und Prozessabläufe für unterschiedliche Pressprozesse zur Herstellung von Organoblechen nach [5, 61]

Diese Konzepte unterscheiden sich, neben der Prozessgestaltung, in ihrer Produktivität und ihren Anlagenkosten. So nehmen die Produktivität und die Kosten der Anlage von der diskontinuierlichen Presse bis zur kontinuierlichen Prozessmethode zu. Im Gegensatz dazu nimmt die Prozesszeit von der diskontinuierlichen bis zur kontinuierlichen Prozesstechnik ab, wodurch die Anlagenproduktivität steigt. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die resultierende Bauteilqualität, welche durch die diskontinuierliche Presse höher sein kann als bei den semi-kontinuierlichen und kontinuierlichen Pressen. [5, 12, 61]

Eine statische Presse, die entweder mit einem offenen oder geschlossenem Presswerkzeug betrieben werden kann, wird den diskontinuierlich arbeitenden Prozessen zugeordnet. Der Prozessdruck wird mittels eines Presszylinders über den

Pressbär auf das Presswerkzeug und schließlich auf das zu pressende Material übertragen. Die Abmessungen der zu pressenden Materialien sind hierbei je Zyklus durch die Werkzeuggröße beschränkt. [5, 61] Die Temperaturführung während des Pressprozesses erfolgt variotherm. Dies bedeutet, dass das Werkzeug dem Temperaturzyklus des Bauteils vom Aufheizen auf Imprägnierungstemperatur und anschließendem Abkühlen auf Entformungstemperatur folgen muss. Konventionelle Werkzeugkonzepte werden meist elektrisch oder mit Hilfe von Fluiden beheizt und sorgen durch lange Aufheiz- und Kühlzeiten von mehreren Minuten für lange Prozesszykluszeiten. Spezielle variotherme Werkzeuge verfügen aus diesem Grund über leistungsstarke Heiz- und Kühleinrichtungen, sodass innerhalb eines Bearbeitungszyklus die Werkzeugtemperatur mit mehreren Kelvin pro Sekunde variiert werden kann. Dabei kommen u. a. Fluidtemperierungen mit mehreren, getrennten Fluidkreisläufen, oder induktiv beheizte Werkzeuge (elektromagnetische Induktion) zum Einsatz. [5, 62] Die Heizung und Kühlung variothermer Presswerkzeuge erfordert jedoch bei allen Heiz- und Kühltechnologien hohe Leistungen. [5, 61] Zur Steigerung der Energieeffizienz und damit Wirtschaftlichkeit dieses Prozesses sollte die thermisch träge Masse eines variothermen Presswerkzeugs deshalb möglichst gering gehalten werden. Dies kann konstruktionsseitig durch eine optimierte Geometrie mit minimalem, temperiertem Werkzeugvolumen, aber auch Werkstoffseitig durch die Wahl eines Werkzeugmaterials mit entsprechenden thermischen Eigenschaften (geringe Dichte und Wärmekapazität bei gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit) erfolgen. So konnte in Versuchen mit Keramikwerkzeugen (Siliziumcarbid) eine, im Vergleich zu identischen Stahlwerkzeugen, Verdoppelung der Aufheizraten bei gleicher Heizleistung erreicht werden. [63]

Die Intervallheißpressen und Doppelbandpressen, als wichtigste Vertreter der semi-kontinuierlichen bzw. kontinuierlichen Pressprozesse, ermöglichen die Produktion quasi endloser Organobleche oder auch unidirektionaler Tapes. Die Intervallheißpresse besteht aus mehreren, in Reihe angeordneten, temperierten Bereichen innerhalb eines durchgängigen Presswerkzeugs. Das zu pressende Material durchläuft die Anlage durch eine zyklische Vorschubbewegung, welche durch eine Abzugsvorrichtung erzeugt wird. Die Druckbeaufschlagung erfolgt dabei, analog zur statischen Presse, meist über Hydraulikzylinder. [5, 61]

Die Doppelbandpresse als kontinuierlich arbeitende Anlage besteht aus zwei rotierenden Endlosmetallbändern, welche die Aufgabe des Presswerkzeugs und der Vorschubeinheit erfüllen, sodass ein kontinuierlicher Materialtransport durch die unterschiedlich temperierten Zonen erfolgt. [5, 64–66]

Ein Hauptunterscheidungsmerkmal der semi-kontinuierlichen und kontinuierlichen Pressanlagen im Vergleich zu statischen Pressen ist die Tatsache, dass die unterschiedlichen Phasen der Imprägnierung, Konsolidierung und Solidifikation in unterschiedlichen Bereichen des Werkzeugs stattfinden. Durch die isothermen Werkzeugbereiche der semi-kontinuierlichen und kontinuierlichen Presstechnologien entfallen die zyklischen Aufheiz- und Abkühlzeiten, sodass höhere Prozessgeschwindigkeiten, bzw. kürzere Prozessdurchlaufzeiten ermöglicht werden. Weiterhin kann somit Energie eingespart werden, da keine Energie für zyklisches Aufheizen und Abkühlen aufgewendet werden muss. Durch diese vergleichsweise hohe Produktivität bei jedoch gleichzeitig höheren Anlagenkosten bieten sich die semi-kontinuierlichen und kontinuierlichen Presstechniken besonders für die Produktion von Organoblechen in der Großserie an. [5, 61, 64]

2.2.2 Thermoformen von Organoblechen

Die Weiterverarbeitung der Organobleche findet in den meisten Fällen durch Umformtechniken wie dem Thermoformen zu einem Bauteil statt, wobei die Eigenschaft der thermoplastischen Matrix zur nachträglichen Formänderung genutzt wird (siehe Abbildung 2.5).

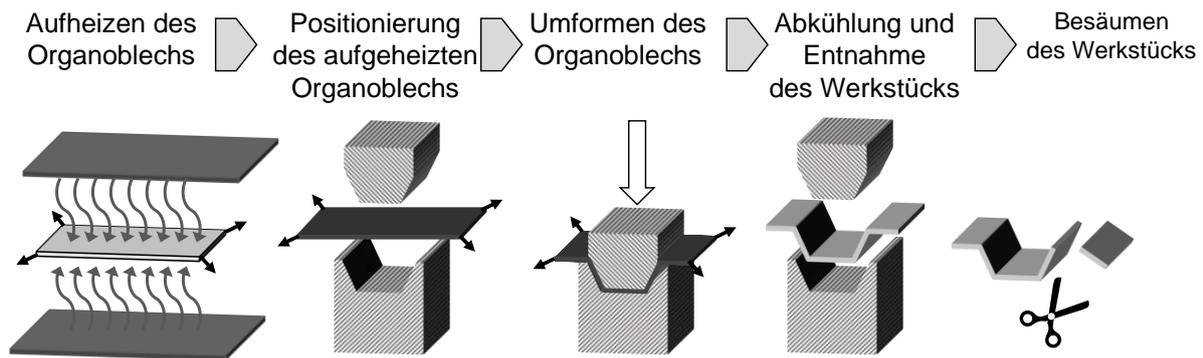


Abbildung 2.5: Prozessablauf des Thermoformens von Organoblechen nach [5]

Bei dem Thermoformen, wie es in Abbildung 2.5 prinzipiell dargestellt ist, kommt vorwiegend das Stempelumformverfahren zum Einsatz. Das vollkonsolidierte Organoblech wird außerhalb des formgebenden Werkzeugs über die Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix erhitzt und anschließend in einem isothermen Werkzeug (konstante Werkzeugtemperatur unterhalb der Schmelztemperatur des Matrixpolymers) umgeformt und zeitgleich unter Druck bis zur Erstarrung des Bauteils abgekühlt. Nach der Entformung folgt bei Bedarf eine Besäumung des Bauteils. [5, 12]

Neben der Verwendung vollimprägnierter Halbzeuge (Organobleche) wird auch die direkte Verarbeitung von nicht vollimprägnierten Halbzeugen erforscht. Thomann und Ermanni [67, 68] untersuchten beispielsweise die direkte Imprägnierung von Geweben und unidirektionalen Preforms aus Hybridgarnen (commingled Rovings) im Thermoformprozess. Eine thermische Isolierung der Umformwerkzeugoberfläche führte zu einer deutlichen Verzögerung der Abkühlzeit und damit einer Verlängerung des Prozessfensters zur Imprägnierung der Faserstruktur. [67, 68] Da jedoch durch die rasche Abkühlung in üblichen, isothermen Thermoformwerkzeugen Fließvorgänge der thermoplastischen Matrix kaum möglich sind und davon ausgegangen wird, dass eine weitere Imprägnierung im Umformprozess somit nur erschwert stattfindet, ist zumeist die vollständige Vorimprägnierung der Verstärkungsfasern des Organoblechs in einem vorausgehenden Fertigungsschritt erforderlich. [5, 12] Die Herstellung der Organobleche erfolgt demnach, wie eingangs erwähnt, auf Basis flächiger textiler Halbzeuge, bzw. Prepregs, wobei keine individuellen, lastgerechten Verstärkungsstrukturen erzeugt werden. Organobleche weisen eine globale und

flächige Verstärkungsstruktur auf, es sind jedoch Lamine herstellbar, deren Faserausrichtung je Lage variabel gestaltet werden kann. Dies erfolgt durch entsprechende Stapelung von vorimprägnierten Geweben, Gelegen oder UD-Halbzeugen (Tapes). [5, 7, 12] Zudem ist die Herstellung von endkonturnahen Laminen nur bedingt möglich, sodass bei der Verarbeitung von Organoblechen ein Materialverschnitt von bis zu 30 % anfällt. [7]

2.3 Prepregs zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste

Bei der Herstellung von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten durch die Verarbeitung von Prepregs werden Verstärkungsfasern und die polymere Matrix bereits vor dem Verarbeitungsprozess zusammengeführt, wobei die angestrebten Mengenverhältnisse, die den späteren FVG des Bauteils bestimmen, bereits eingestellt werden. [5, 12] Bei den meisten Verarbeitungsverfahren thermoplastischer Verbundwerkstoffe wird so der aufwändige Imprägnierungsprozess der eigentlichen Bauteilherstellung vorgelagert und in einem separaten Prozess wie der Tape- oder Organoblechherstellung durchgeführt. Bei der Imprägnierung werden Verstärkungsfasern und thermoplastische Matrix zusammengeführt und das Faser-Thermoplast-Volumenverhältnis (FTV) im Wesentlichen eingestellt. [69] Nach der vollständigen Imprägnierung und Konsolidierung liegt der FVG der Tapes üblicherweise zwischen 30 % und 70 %. [5] Damit entspricht der FVG der Tapes bereits dem des fertigen, herzustellenden Bauteils. [69]

In Abbildung 2.6 ist eine Gesamtübersicht der gängigen Herstellungskette, beginnend mit unterschiedlichen Prepregtypen, über die Imprägnierung und Konsolidierung im Pressprozess zu FKV Halbzeugen, schematisch dargestellt.

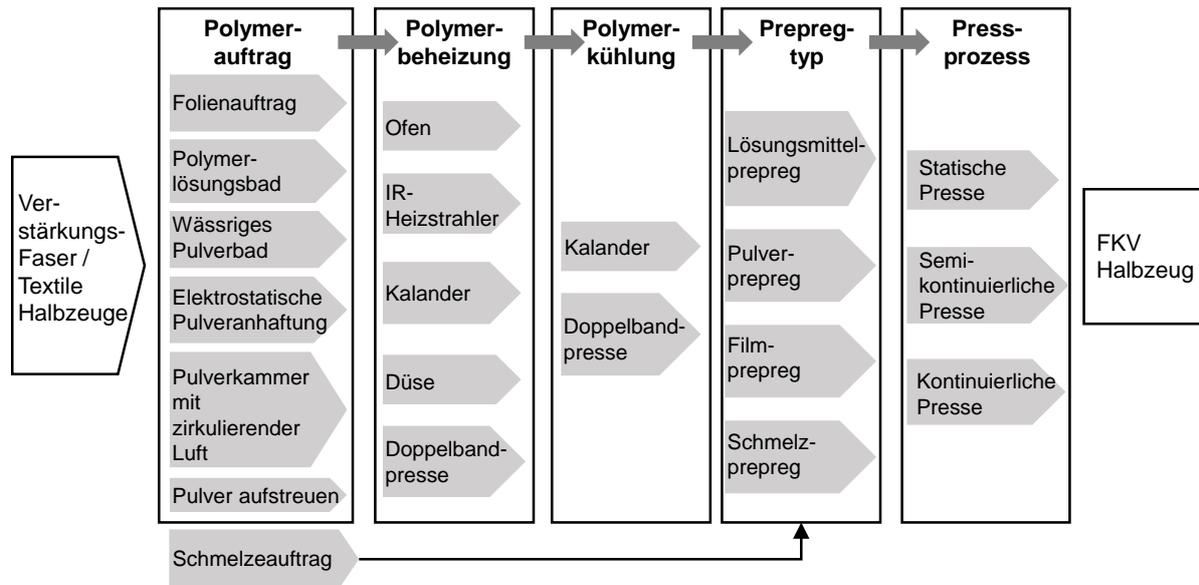


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Herstellungskette von FKV Halbzeugen nach [5]

Zur Herstellung der Prepregs wird zunächst das Polymer durch unterschiedliche Bepulverungsprozesse oder in Form einer Polymerlösung auf die Fasern aufgetragen und in einer darauffolgenden Heiz- und Kühlstrecke vorimprägniert (keine vollständige Benetzung der Einzelfilamente mit der Matrix). Abweichend davon wird bei Schmelz-Prepregs die Polymerschmelze direkt nach Verlassen eines Extruders dem Verstärkungstextil zugeführt. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch den Folienauftrag, bei dem die Polymerschmelze zu einer Folie geformt und in einem wechselnd angeordneten Aufbau aus Folien- und Texillagen zu einem Film-Prepreg verarbeitet wird. [5, 12, 18, 19, 70]

Das für diese Arbeit verwendete Verfahren mittels Polymerbepulverung lässt sich zum einen auf einzelne Rovings [71–73] und zum anderen auf flächige textile Halbzeuge, wie z. B. Gewebe, anwenden, wobei mit der Verwendung von Pulverprepregs eine vergleichsweise hohe Variation des Faservolumengehalts einhergehen kann. [5, 18] Die relevanten Prepregtechnologien werden im Folgenden im Kontext der Prepregherstellung auf Rovingebeine vertiefend vorgestellt.

2.3.1 Schmelzimprägnieren

Die Schmelzimprägnierverfahren nutzen die Eigenschaft von Thermoplasten, dass sich diese verflüssigen, wenn sie über ihre Schmelztemperatur erhitzt werden. Das Polymer wird dabei in einem Extruder aufgeschmolzen und auf die Fasern

aufgetragen, wobei die Einzelfasern direkt mit dem Schmelzbad in Kontakt gebracht werden. Um zu verhindern, dass das geschmolzene Polymer nur oberflächlich mit den Lagen der Fasern in Kontakt kommt und die Faserstränge auch im Kern imprägniert werden, kommen meist verschiedene Umlenkelemente zum Einsatz, um die Faserbündel zu spreizen und so eine bessere Durchtränkung zu erreichen. [5, 61, 69, 74] Alternativ dazu können poröse Umlenkrollen verwendet werden, die von innen mit der Schmelze durchströmt werden und so die Fasern gleichmäßig imprägnieren. [75]

2.3.2 Lösungsmittelimprägnieren

Beim Lösungsmittelimprägnieren liegt das Matrixpolymer in einem Lösungsbad vor, durch welches der trockene Roving gefördert und so imprägniert wird. Diese Lösung weist eine niedrigere Viskosität als eine Thermoplastschmelze des verwendeten Thermoplasts auf, was die Imprägnierung und Benetzung des Rovings begünstigt. Durch eine anschließende Erwärmung des Rovings (Prepregs) verdampft das Lösungsmittel und das Polymer bleibt gleichmäßig auf den Fasern verteilt zurück. [19, 76–78]

Das im Folgenden beschriebene Pulverimprägnierverfahren stellt gegenüber der Lösungsmittelimprägnierung ein anlagentechnisch sichereres Verfahren dar, da keine Lösungsmittel benötigt werden, welche bei erhöhten Temperaturen abgedampft werden müssen. Durch das Verdampfen der Lösungsmittel kann es zu einer nicht vollständig porenfreien Imprägnierung und zur Bildung von Blasen an der Materialoberfläche kommen. Durch die Verwendung gesundheitsschädlicher Lösungsmittel wird weiterhin eine Kapselung des Prozesses notwendig, was den Anlagenaufwand deutlich erhöht. [5, 19, 77, 78]

Das Lösungsmittelimprägnierverfahren kann zudem nur auf Thermoplaste angewendet werden, die sich in Lösungsmitteln lösen lassen und beschränkt sich somit hauptsächlich auf die Verarbeitung amorpher Thermoplaste. [74, 77]

2.3.3 Pulverimprägnieren

Im Gegensatz zum Schmelz- oder Lösungsmittelimprägnierverfahren wird die thermoplastische Matrix beim Pulverimprägnierverfahren in festem Zustand als Pulver auf den Roving aufgebracht. Das Pulverimprägnierverfahren ermöglicht somit den Einsatz nahezu aller Thermoplaste als Matrixmaterial, u. a. ist so auch der Einsatz von

Polymerblends möglich. Ein ideales Pulverimprägnierverfahren bietet den Vorteil, dass die Vorimprägnierung zunächst von der generell hohen Schmelzviskosität der thermoplastischen Matrix oberhalb ihres Erweichungspunktes bei amorphen oder oberhalb der Schmelztemperatur bei teilkristallinen Thermoplasten unabhängig ist. Die ideale Pulverapplikation wird erreicht, wenn die Filamente des Rovings einzeln beschichtet werden, sodass die Polymermatrix nur sehr kurze Fließwege bei der späteren vollständigen Imprägnierung bewältigen muss. [78]

Die Pulverimprägnierung von Rovings kann mittels wässrigem Pulverbad, elektrostatischer Auftragung, Pulverkammer mit zirkulierender Luft, sowie Pulveraufstreuung erfolgen.

Wässriges Pulverbad

Während bei der Imprägnierung im wässrigen Pulverbad die Verstärkungsfasern durch ein flüssiges Medium (oft destilliertes Wasser), in dem das Polymerpulver suspendiert vorliegt, gefördert werden, erfolgt die Imprägnierung bei der Trockenpulvertechnik durch direkte Auftragung des Polymerpulvers auf die Fasern. Das Trägermedium in Form des wässrigen Lösungsmittels muss nach der Vorimprägnierung der Rovings entfernt werden, was meist durch einen thermischen Prozess realisiert wird. Dies birgt die Gefahr einer unvollständigen Verdampfung und kann somit durch Rückstände verursachte Fehlstellen im finalen Bauteil ergeben. [19, 78–82] Ogden et al. [82] reduzierten die zu verdampfende Wassermenge, indem auf den gespreizten Roving ein feiner Wassernebel aufgetragen wurde, was die Anhaftung der Polymerpartikel bei der Pulverapplikation durch Aufstreuen verbessert. [82]

Elektrostatische Bepulverung

Ramani et al. [79] nutzten elektrostatische Aufladung der Polymerpartikel zur Pulverimprägnierung von GF-Rovings. Die Polymerpartikel werden dabei mittels einer negativ geladenen elektrostatischen Corona-Düse auf die gespreizten Glasfasern aufgetragen. [79] Die Spreizung facht den Roving auf, wodurch seine Dicke abnimmt und die zu imprägnierende Eindringtiefe für das Matrixpolymer herabgesetzt wird. [75, 79] Um die Glasfasern elektrisch leitfähig zu machen, werden diese mit Hilfe eines feinen Wassernebels benetzt und über eine elektrisch leitfähige Umlenkrolle geerdet. Die elektrostatische Aufladung der Pulverpartikel wird durch die Anlagerung von freien Luftionen, welche an der Hochspannungs-Elektrode entstehen, erreicht. Die

geladenen Pulverpartikel werden durch das elektrische Feld zum geerdeten Roving transportiert, wo sie aufgrund von Coulombschen Anziehungskräften anhaften. [83] Aufgrund der Ausprägung des elektrischen Feldes, welches zwischen der Elektrode der Corona-Düse und des elektrisch geerdeten Rovings entsteht, wird mit diesem Verfahren das Polymerpulver auch auf die Unterseite des Rovings (zur Düse abgewandte Seite) appliziert. Die bepulverten Fasern werden anschließend durch eine Heizstrecke (keramische Heizelemente) geleitet, um das Thermoplastpulver zu schmelzen, sodass dieses an den Fasern anhaftet. Bei der Herstellung von Pulver-Towpregs durch elektrostatische Bepulverung stellten Ramani et al. [79] eine Abweichung von $\pm 3\%$ des Zielfaservolumengehalts von 50 % fest [79].

Pulverkammer mit zirkulierender Luft

Bei der weitverbreiteten Methode der Imprägnierung in einer Pulverkammer wird der Roving zunächst gespreizt und durchläuft anschließend ein Polymerpulverbett. Das Pulverbett kann als ruhendes Pulverbett ausgeführt sein, bei dem sich die Partikel nicht bewegen, oder wie bei Rath et al. [84] als fluidisiertes Pulverbett, in dem die Partikel mittels Druckluft und Rüttelsieb in Bewegung versetzt werden. Im fluidisierten Pulverbett ähnelt die Art der Partikelbewegung der von kochenden Flüssigkeiten, wobei die thermoplastischen Partikel frei beweglich ohne Agglomeration vorliegen. [84] Die Applizierung des thermoplastischen Pulvers kann durch elektrostatische Anziehungskräfte, oder durch Vorbehandlung der Verstärkungsfasern mit einem Bindersystem, erleichtert werden. [78, 84] Alternativ zur elektrostatischen Aufladung des Pulvers können die Partikel auch direkt an den Roving aufgeschmolzen werden. Dazu wird dieser vor dem Eintauchen in das Pulverbett auf Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur des Matrixpolymers erhitzt. Der heiße Roving wird anschließend durch das Pulverbett gefördert, wo er mit den Thermoplastpartikeln in Berührung kommt. Diese schmelzen an der Oberfläche der Fasern auf und haften so an diesen an. [84, 85]

Pulveraufstreuung

Die Pulverapplikation durch direktes Aufstreuen auf den Roving wurde von Allred et al. [72] umgesetzt. Sie entwickelten einen Pulverimprägnierprozess zur Herstellung thermoplastischer und duroplastischer Towpregs, wobei vier Rovings gleichzeitig mit einer Durchlaufgeschwindigkeit von 6,2 m/min verarbeitet werden können. Die

Pulverapplikation erfolgt hierbei einseitig durch einen Pulvervorhang, durch den die trockenen Rovings gefördert werden. Pulver, welches nicht auf dem Roving haften bleibt wird aufgefangen und erneut zur Applikation im Pulvervorhang gefördert. Die Anhaftung der Polymerpartikel an die Filamente des Rovings erfolgt durch die Erwärmung in einer der Pulverapplikation angeschlossenen Heizstrecke. Die experimentelle Herstellung von duroplastischen Pulver-Towpregs an dieser Bepulverungsanlage, wobei duroplastisches Pulver (Epoxy) auf assemblierte (multi-end) GF-Rovings und CF-Rovings (single-end) appliziert wurde, zeigte eine starke Abhängigkeit der gewünschten Pulverbeladung von den Eigenschaften der verwendeten Rovings. Bei der Verarbeitung der assemblierten GF-Rovings wurde im Vergleich zu den CF-Rovings eine Separation der Einzelstränge beobachtet, was zu einer starken Gassenbildung und schlechten Spreizung der Einzelstränge führte. Weiterhin wurde nur eine geringe Pulverbeladung erreicht, was auf die starke Gassenbildung und damit den geringen projizierten Querschnitt zur Pulverapplikation im Pulvervorhang zurückgeführt wird. Die Beobachtungen zeigten weiterhin, dass aufgrund des sich aus der Gassenbildung ergebenden, lückenhaften Rovingquerschnitts nur wenige Polymerpartikel auf den Einzelsträngen verbleiben, bzw. durch Vibrationen von diesen herabfallen, bevor eine Anhaftung durch die nachfolgende Heizstrecke erfolgen kann. Ferner ergab sich durch die schlechte Spreizbarkeit der assemblierten GF-Rovings, bzw. deren Einzelstränge, nur eine oberflächliche Applikation der Polymerpartikel auf den äußeren Filamenten, die Kernbereiche der Einzelstränge konnten nicht erreicht werden. Dies hat die Ausbildung von einseitigen, polymeren „Krusten“ auf den Rovings nach dem Durchlaufen der Heizstrecke zur Folge, wodurch neben einem erschwerten Handling auch die Imprägnierlänge (Fließwege) zur späteren vollständigen Imprägnierung ansteigt. [72]

Die vollständige Anhaftung wird bei den meisten thermoplastischen Prepregtechniken durch ein Aufschmelzen der Polymerpartikel im direkten Anschluss an deren Applikation mittels Erwärmung (IR-Strahler, Heißluft etc.) über deren Schmelz- oder Erweichungstemperatur erreicht. [79, 82] Iyer et al. [78] haben dazu die Vorgänge Aufschmelzung und Anhaftung der thermoplastischen Polymerpartikel nach deren Auftrag auf einen Roving innerhalb einer Heizstrecke beschrieben (siehe Abbildung 2.7).

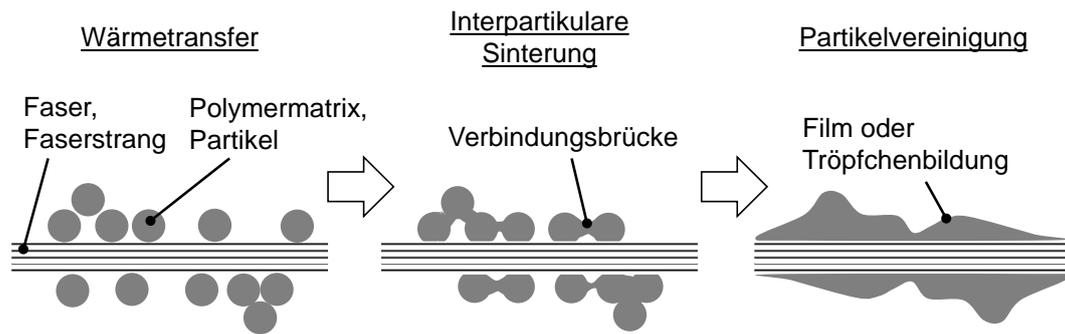


Abbildung 2.7: Prinzip der Aufschmelzung und Vereinigung von erwärmten Polymerpartikeln auf einer Faser oder einem Faserstrang nach [78]

Im ersten Schritt findet eine Erwärmung der zunächst separat auf dem Filament oder Faserbündel vorliegenden Polymerpartikel bis oberhalb deren Schmelztemperatur statt. Anschließend starten interpartikuläre Sintervorgänge, bei welchen benachbarte Partikel eine Brücke ausbilden und sich so verbinden. Gleichzeitig benetzen die Partikel die Einzelfasern und haften so an diesen an. Nach der interpartikulären Sinterung finden weitere Fließvorgänge der schmelzflüssigen Polymermatrix statt, wobei sich aus den verschmolzenen Partikeln ein Film oder zusammenhängende Tröpfchen auf der Oberfläche der Faserfilamente ausbilden können. [78]

Bei Pulverpreg-Verfahrensverfahren ist aufgrund des kurzen Prozesszeitfensters, in welchem sich die Matrix im schmelzflüssigen Zustand befindet, und der Verarbeitung ohne Prozessdruck keine Mikroimprägnierung (Erläuterung der Mikroimprägnierung in Kapitel 2.4.1) oder Benetzung von Einzelfilamenten innerhalb der Rovings zu erwarten. [18]

Zur Erzeugung vollständig imprägnierter und konsolidierter Tapes werden die Towpregs, beispielsweise mit Hilfe von Imprägnierwalzenpaaren oder einer Doppelbandpresse, unmittelbar nach der Erwärmung im Prepregprozess imprägniert und konsolidiert. Nach Imprägnierung und Konsolidierung liegt im Idealfall ein porenfreier Verbund vor, wobei auch die äußere Geometrie des Tapes in diesem Prozessschritt festgelegt und sichergestellt wird. Die imprägnierten und konsolidierten Tapes können anschließend auf Spulen aufgewickelt und als Halbzeug weiter verarbeitet werden. [70, 80, 84]

2.3.4 Direkte Verarbeitung thermoplastischer Pulver-Towpregs

Nunes et al. [71] untersuchten die Herstellung und Verarbeitung thermoplastischer Pulver-Towpregs basierend auf GF/Polypropylen (PP), welche mit Hilfe einer eigens entwickelten Bepulverungsanlage hergestellt wurden. Die trockenen Rovings werden dabei zunächst gespreizt und durch eine Wirbelkammer geführt, wo das thermoplastische Pulver kontinuierlich durch einen Extruder dosiert zugeführt wird. Anschließend durchlaufen die bepulverten Fasern eine Heizstrecke, um die Polymerpartikel aufzuschmelzen, wodurch diese an der Oberfläche der Fasern anhaften. Die hergestellten Towpregs sind in Abbildung 2.8 in Form einer REM-Aufnahme dargestellt.

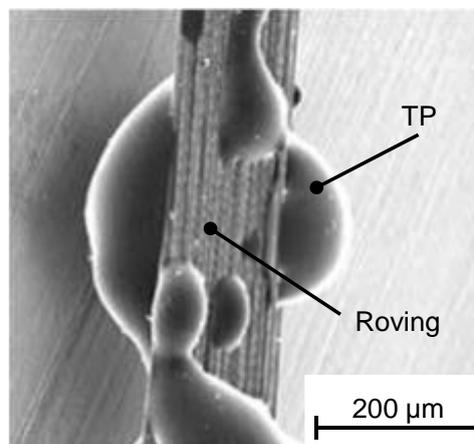


Abbildung 2.8: REM-Aufnahme eines bändchenförmigen Pulver-Towpregs [71]

In Abbildung 2.8 ist zu erkennen, dass die hergestellten Towpregs eine Tropfenbildung der Thermoplastpartikel aufweisen, wobei eine gute Anhaftung an die Filamente des Rovings erkennbar ist. Die Tropfenbildung lässt zudem auf eine vollständige Aufschmelzung der Thermoplastpartikel schließen. [71]

Im Rahmen der Untersuchungen von Nunes et al. [71] wurden die Pulver-Towpregs in unterschiedlichen Fertigungsverfahren weiterverarbeitet, u. a. im Wickelverfahren mit einer Thermoplastwickelanlage zur Herstellung von Rohren oder Druckbehältern. Die Applikation der Pulver-Towpregs auf dem Wickelkern, bzw. Werkstück, erfolgt im Wickelkopf durch eine Kompaktierungsrolle, wobei das Towpreg unmittelbar vor der Kompaktierungsrolle mit Hilfe von Heißluft erwärmt wird. Über die halbzeugspezifischen, limitierenden Faktoren und Laminatbeschaffenheit bei der Verarbeitung der Halbzeuge wird keine Aussage getroffen, ebenso nicht über die

Imprägnierqualität (Porengehalt) nach der Verarbeitung der Towpregs. Zur Beurteilung der Qualität der hergestellten Bauteile (Rohre) wurden einzig mechanische Untersuchungen zur Ermittlung der Zugfestigkeit an Ringproben, welche mit unterschiedlichen Verarbeitungsparametern aus Towpregs hergestellt wurden, durchgeführt. [71]

Der in [71] vorgestellte Herstellungsprozess zur Erzeugung von thermoplastischen Towpregs wurde von Silva et al. [85] weiterentwickelt und optimiert. Dabei wurden thermoplastische Pulver-Towpregs auf Basis von Glas- und Kohlenstofffasern kombiniert mit verschiedenen Polymerpulvern (u. a. PP, PVC) hergestellt. Der Gesamtanteil des Polymerpulvers lag bei der Kombination GF/PP bei ca. 30 Gew.-%, bei der Kombination CF/PP bei ca. 20 Gew.-%. [86] Die Weiterverarbeitung dieser thermoplastischen Pulver-Towpregs fand, wie schon bei Nunes et al. [71], im Wickelverfahren statt. In einem anschließenden Pressprozess wurde die gewickelte GF/PP Preform imprägniert und konsolidiert. [85, 87] Auch bei diesen weiterführenden Untersuchungen wurden keine Analysen zur Bestimmung der Imprägnierqualität der Towpregs, oder der Preform, bzw. des finalen Bauteils durchgeführt und somit keine Aussagen über den entsprechenden Imprägnierfortschritt innerhalb der Einzelprozesse getroffen.

Zur Erwärmung von Tapes über die Schmelztemperatur der polymeren Matrix und damit zum Wärmetransfer bei TTL-Prozessen mit Tapes wurden von Han et al. [88], Tumkor et al. [89] sowie Khan et al. [34] umfassende Überlegungen und Untersuchungen durchgeführt. Diese numerischen Modelle und Ansätze beziehen sich jedoch auf vollständig imprägnierte und konsolidierte Tapes und lassen sich somit nicht auf die in dieser Arbeit untersuchte Ablage von hochporösen, pulverimprägnierten Rovings übertragen.

2.4 Imprägnierung, Konsolidierung und Solidifikation

Bei der Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste stellt die vollständige Imprägnierung, Konsolidierung und Solidifikation eine zentrale prozesseitige Herausforderung dar. Maßgebliche Prozessgrößen sind dabei die Prozesstemperatur, die Verarbeitungszeit und der Prozessdruck. Die Imprägnierung der trockenen textilen Verstärkungsstruktur wird ermöglicht, indem das thermoplastische Polymer durch Erhöhung der Temperatur in den schmelzflüssigen Zustand überführt wird. Sie ist

abgeschlossen, sobald alle Einzelfilamente benetzt und die Faserzwischenräume mit dem Polymer gefüllt sind. [5, 61, 64, 65, 90]

Mit dem Prozess der Imprägnierung findet auch die Konsolidierung durch die Verdrängung der in den Faserzwischenräumen enthaltenen Luft aus dem Verbund statt. Der applizierte Prozessdruck wirkt den elastischen Rückstellkräften der Verstärkungsstruktur entgegen und verhindert dabei eine Dekonsolidierung des Laminates. [61, 65] Während der Solidifikation wird das thermoplastische Polymer unter Prozessdruck abgekühlt, wobei es erstarrt und wieder in den festen Zustand überführt wird. [12]

Um den Vorgang der Imprägnierung besser zu verdeutlichen, werden vereinfachte Modelle angewandt, um eine schematische Darstellung des Prozesses und mathematisch vereinfachte Beschreibungen zu ermöglichen.

2.4.1 Makro- und Mikroimprägnierung

Die Imprägnierung textiler Verstärkungsstrukturen (z. B. Gewebe, Gelege) kann in die zwei Phasen der Makro- und Mikroimprägnierung unterteilt werden. [65, 66] In Abbildung 2.9 ist der schematische Ablauf vom Ausgangszustand, in dem die Matrix und Fasern noch separat vorliegen, bis zur vollständigen Imprägnierung (vollständige Benetzung der Faseroberflächen und Verdrängung der Luft einschlüsse) dargestellt.

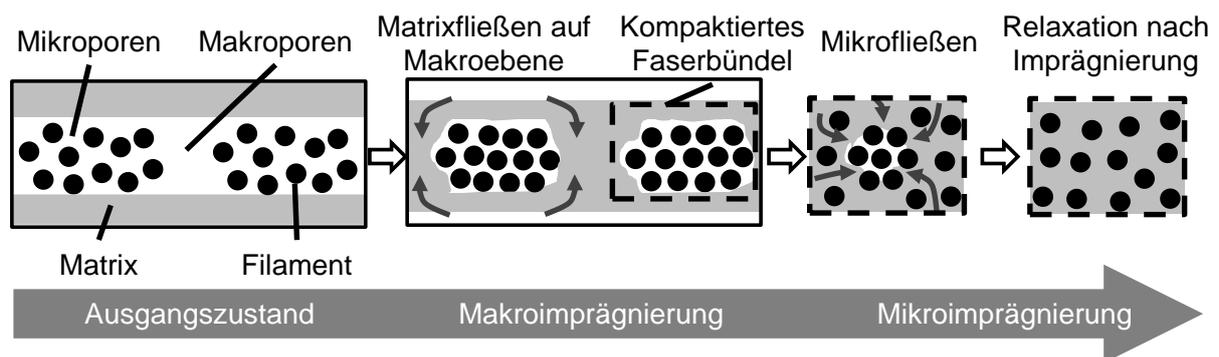


Abbildung 2.9: Stadien der Imprägnierung nach [65, 66, 91–93]

Im Ausgangszustand sind die Faserbündel (Rovings) noch unkompaktiert und die Matrix liegt getrennt von den Einzelfilamenten in einer festen Phase vor. Unter Temperatur- und Druckeinwirkung werden die Faserbündel kompaktiert und die nun schmelzflüssige Matrix beginnt zunächst in die Makroporen, die Grobstruktur der Verstärkungsfasern, zu fließen. [94, 95] Das Füllen dieser Makroporen, welche meist

durch die Zwischenräume zweier oder mehrerer Faserbündel gebildet werden, wird als Makroimprägnierung bezeichnet. Im Anschluss erfolgt die Mikroimprägnierung, bei der die Matrix die einzelnen Faserbündel infiltriert, die Einzelfilamente benetzt und eine dadurch bedingte Luftverdrängung aus den Faserzwischenräumen verursacht wird. [66, 93] Diese Mikroimprägnierung benötigt im Vergleich zur Makroimprägnierung deutlich mehr Zeit, was auf eine vergleichsweise hohe Permeabilität der makroskopischen Verstärkungsstruktur im Vergleich zu der mikroskopischen Struktur der Einzelfilamente innerhalb des Rovings zurückzuführen ist. Die Makroimprägnierung ist somit selbst bei niedrigen Prozessdrücken im Pressprozess möglich und innerhalb von wenigen Sekunden abgeschlossen, wobei die Mikroimprägnierung maßgeblich die Gesamtzykluszeit beeinflusst. [91, 92, 96] Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, weisen die Faserbündel in den noch nicht imprägnierten Bereichen aufgrund des hydrodynamischen Druckes der einströmenden, schmelzflüssigen Matrix den geringsten Abstand, also die höchste Packungsdichte, auf. Erst nach erfolgter Imprägnierung eines Einzelfilamentes ist dieses einem geringeren Strömungsdruck ausgesetzt, sodass sich der Faserabstand durch elastische Rückstellkräfte der Filamente wieder vergrößert. Diese Expansion der Faserbündel wird weiterhin durch den Strangaufweitungseffekt des Polymers verursacht, nachdem dieses durch die linienförmigen Kapillaren zwischen parallel verlaufenden Filamente geströmt ist. [65, 66]

2.4.2 Einflussgrößen der Imprägnierung

Das Fließen des schmelzflüssigen Polymers durch die Faserstruktur kann vereinfacht mit dem eindimensionalen, gesättigten Fließen eines Fluids innerhalb eines homogenen, isotropen und porösen Mediums nach dem Gesetz von Darcy [97] mit Formel 2.1 beschrieben werden: [61, 65, 66, 97, 98]

$$\bar{v} = \frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{K}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad 2.1$$

Dabei ist \bar{v} die mittlere Fließgeschwindigkeit, K die Permeabilität und η die Viskosität des Fluids. Der Druckabfall über die von der Zeit t abhängige Fließlänge x wird durch den Druckgradienten $\partial P/\partial x$ beschrieben. Durch vereinfachende Annahmen, wie beispielsweise der Konstanz und Druckunabhängigkeit der Materialeigenschaften des Fluids und des porösen Mediums, lässt sich durch Integration und Umstellung die in

Formel 2.2 beschriebenen Bewegungsgleichung zur quadratischen Fließlänge (Imprägniertiefe) lösen: [61, 65, 91]

$$x^2 = - \frac{2 \cdot t \cdot K \cdot \Delta P}{\eta} \quad 2.2$$

Durch weitere Umstellung der Formel 2.2 und unter Voraussetzung eines von der Permeabilität unabhängigen Druckgradienten (Druckabfall) in Höhe des Prozessdrucks lässt sich die Zeitspanne t_{imp} zur vollständigen Imprägnierung berechnen:

$$t_{imp} = \frac{\eta \cdot x^2}{2 \cdot K \cdot P} \quad 2.3$$

Die Eindringtiefe (Fließlänge zur vollständigen Imprägnierung) geht demnach quadratisch in die Imprägnierzeit ein, wobei die temperaturabhängige Viskosität, die Permeabilität und der Druck nur einen linearen Einfluss bewirken. Im Folgenden werden die Parameter Viskosität und Permeabilität weiter erläutert.

Viskosität

Durch die steigende Temperatur sinkt die Viskosität der schmelzflüssigen Polymermatrix, wobei eine zu hohe Temperatur die thermische Degradation des Polymers induziert. [99] Die Viskosität einer Thermoplastschmelze weist zumeist ein strukturviskoses Verhalten auf, wobei die Viskosität hauptsächlich von der Scherrate abhängig ist (siehe Abbildung 2.10). Bei steigenden Scherraten nimmt die Orientierung der Makromoleküle durch Verstreckung zu, was einen Abfall der Viskosität bewirkt. [5]

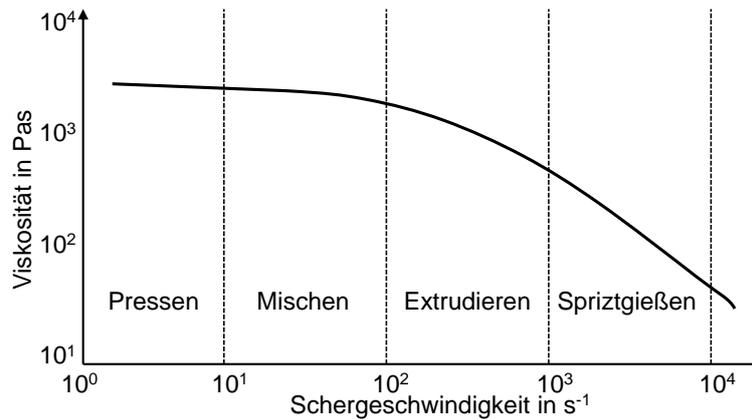


Abbildung 2.10: Beispielhafter Viskositätsverlauf einer Thermoplastschmelze während der Verarbeitung nach [5]

Die Prozesse zur Verarbeitung von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten, wie beispielsweise die Pressprozesse, laufen meist bei kleinen Scherraten ab, weshalb annäherungsweise ein quasi-newtonsches Verhalten für diese kleinen Scherraten (linker Bereich in Abbildung 2.10) angenommen werden kann. [91, 100, 101] Die Messung der Schmelzviskosität eines Thermoplasts kann mit standardisierten Verfahren und Messgeräten, wie beispielsweise dem Platte-Platte-Rheometer, erfolgen. [5, 65]

Permeabilität

Die Permeabilität beschreibt allgemein die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber eines durchströmenden Fluides. [12] Aufgrund der anisotropen Struktur von FKV-Halbzeugen (Rovings, Gelege, Gewebe) weist deren Permeabilität einen tensoriellen Charakter auf. Die Strömung des Polymers in Faserrichtung erfährt dabei einen geringeren Strömungswiderstand als eine Strömung senkrecht zur Faserrichtung (vgl. Abbildung 2.11), was auf eine größere Querschnittsfläche der Faserzwischenräume in Faserrichtung und somit einen größeren Strömungsquerschnitt zurückzuführen ist. [5, 91, 92, 102, 103]

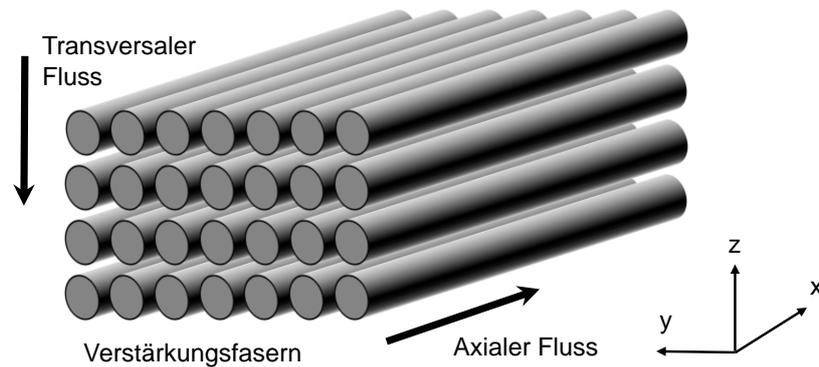


Abbildung 2.11: Fließrichtungen in einer unidirektionalen Faserstruktur nach [99]

Durch den applizierten Druck und der damit einhergehenden Kompaktierung der textilen Struktur kommt es weiterhin zu einer kontinuierlichen Verengung der im Faserbündel vorliegenden Fließwege, im Extremfall sogar zu einer vollständigen Blockierung der Fließwege quer zur Faserrichtung (transversal). Ein zu hoher Druck oberhalb eines Optimums kann somit die Permeabilität senken, was zur Folge hat, dass das Eindringen der Polymermatrix in der Imprägnierungsphase erschwert wird und eine Verlangsamung der Imprägniergeschwindigkeit eintritt, oder die transversale Strömung vollständig zum Erliegen kommt. [61, 65, 103, 104] Jespersen et al. [105] stellten in ihren Untersuchungen zur Imprägnierung von UD-Strukturen (CF) im Film-Stacking Verfahren mit PA6 Folien einen optimalen Prozessdruck von ca. 20 bar fest. Eine Steigerung des Prozessdruckes bis zu diesem Optimum konnte eine Reduktion der Imprägnierzeit bewirken, weitere Drucksteigerungen führten hingegen zu einem erneuten Anstieg der Imprägnierzeit. [105]

Mit der Imprägnierung der Faserstruktur findet auch eine Verdrängung der Luft einschüsse statt. Die Luftverdrängung kann dabei durch die Komprimierung der Poren oder durch den Transport der Poren aufgrund thermoplastischer Fließvorgänge in Richtung des geringsten Widerstandes erfolgen. Die Komprimierung einer Pore wird durch die Differenz zwischen dem Poreninnendruck und dem von außen applizierten Prozessdruck, von der Oberflächenspannung der Pore sowie von der Viskosität der thermoplastischen Matrix beeinflusst. [20, 106] Zudem können Fließwege mit einem zunehmenden Imprägnierungsfortschritt versiegelt werden, wodurch die Permeabilität soweit herabgesetzt werden kann, dass eine weitere Imprägnierung und der Transport der eingeschlossenen Luft nicht mehr möglich ist und eine Pore im Verbund verbleibt. [65]

2.4.3 Konsolidierungsverhalten thermoplastischer Tapes

Zur Konsolidierung thermoplastischer Bändchenhalbzeuge werden je nach Halbzeug und Prozess sehr unterschiedliche Ansätze betrachtet.

Barnes und Cogswell [107] haben die grundlegenden Fließmechanismen, die beim Zusammenfügen von vollständig konsolidierten Thermoplasttapes (CF/PEEK) unter Temperatur und Druckeinwirkung auftreten, beschrieben. Eine zentrale Beobachtung ist hierbei das transversale Fließen senkrecht zur Faserrichtung, was als Ursache für Deformationen (Dickenabnahme und Breitenzunahme) des Tapes beim Ablegevorgang gesehen wird. [107] Experimentelle Untersuchungen von Ranganathan et al. [108] und Rogers [109] bestätigen diesen transversalen Fließmechanismus. Als Ursache kann das anisotrope Verhalten der Tapes unter den gegebenen Verarbeitungsbedingungen bei der Ablage vermutet werden. Die hohe Dehnsteifigkeit der Fasern in Faserrichtung (Längsrichtung des Tapes) führt dazu, dass sich das Tape nur quer zu Faserrichtung deformieren lässt. Diese Anisotropie der Tapes beeinflusst somit die geometrische Deformation bei der Konsolidierung in direkter Weise. [110] Ein solcher transversaler Matrixfluss der hochviskosen Thermoplastschmelze kann jedoch eine hydrodynamische Kompaktierung der Faserstruktur des Rovings bewirken. Als Folge davon nimmt das Fasernetzwerk im Tape einen immer größeren Anteil des Konsolidierungsdruckes auf, wodurch es zu teilelastischen Verformungen kommt. Bei nachlassendem Konsolidierungsdruck erfolgt eine teilelastische Rückverformung der Fasern und somit eine Rückverformung des gesamten Laminats. Dies kann zu Delaminationen und Porenwachstum führen. [111]

2.4.4 Imprägniermechanismen bändchenförmiger Pulverprepregs

Connor et al. [112] entwickelten ein Modell für pulverimprägnierte unidirektionale Faserstrukturen, das von einer maßgeblichen Imprägnierung in Längsrichtung der Fasern im Pressprozess ausgeht. Die Vorstellung in ihrer Arbeit ist, dass zwischen benachbarten, parallelen Fasern ein Matrixpartikel aufschmilzt und eine Matrixbrücke zwischen den Fasern ausbildet (siehe Abbildung 2.12, links).

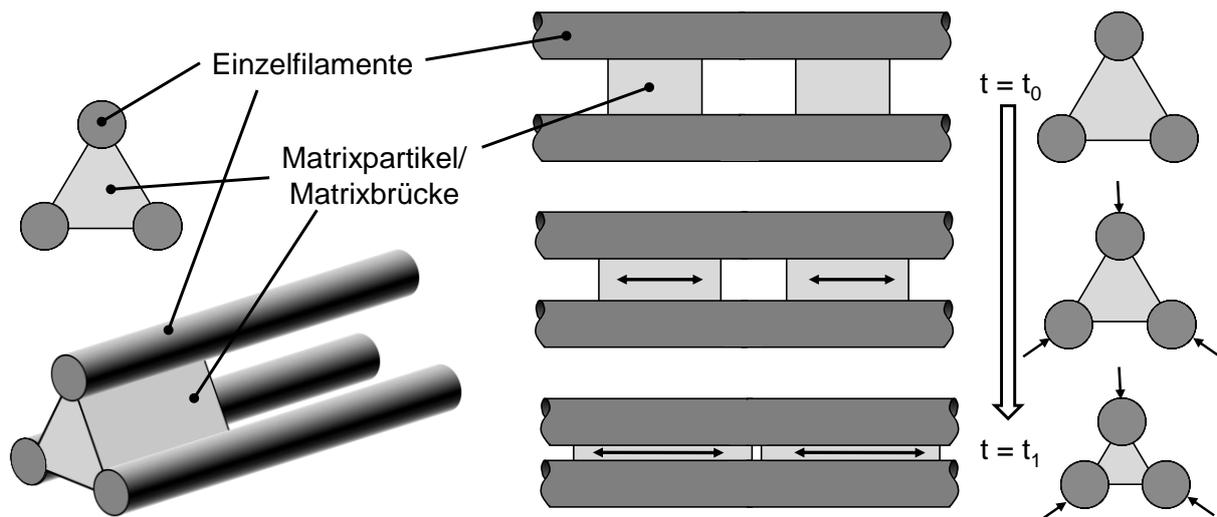


Abbildung 2.12: Darstellung des Matrixbrückenmodells bei der Imprägnierung und Konsolidierung von Towpregs aus der Arbeit von Connor et al. [112]

Bei der Imprägnierung unter Prozessdruck breitet sich diese Matrixbrücke, begünstigt durch Kapillarkräfte, ausgehend von der porösen Struktur der pulverimprägnierten Faserstruktur ($t = t_0$) in beide Richtungen entlang der Fasern aus (siehe Abbildung 2.12, rechts). Diese Ausbreitung verdrängt nach der Modellvorstellung die Luft aus dem Laminat und führt so zu einer Verringerung des Volumens und einer Dickenabnahme des Laminats, bis eine vollständige Imprägnierung erreicht ist ($t = t_1$). Dieses Modell konnte anhand der Imprägnierung und Konsolidierung von CF/PEEK und CF/PEI Versuchsmaterialien experimentell verifiziert und zur Vorhersagen des Porengehalts im fertigen Bauteil herangezogen werden. [112, 113]

Nunes et al. [71] beschreiben die Imprägniervorgänge eines pulverimprägnierten Faserstrangs mit einem ähnlichen Modell wie Connor et al. [112] Auch sie gehen zunächst von einer Brückenbildung eines über die Schmelztemperatur erwärmten Polymerpartikels zwischen benachbarten Einzelfilamenten aus, wobei eine quadratische und hexagonale Faseranordnung unterschieden wird. Die Imprägnierung findet nach diesem Modell ebenfalls in Faserrichtung statt, wobei eine vollständige Imprägnierung als vollständige Überwindung des Abstands zweier benachbarter Polymerbrücken definiert wird. Zur Berechnung der momentanen Brückenlänge (Imprägniergrad) und der finalen Brückenlänge bei vollständiger Imprägnierung wird der Verlauf der Laminatdicke, der finale FVG und die Größe der Polymerpartikel zu Beginn des Prozesses herangezogen. Weiterhin wird der für die Polymerströmung in Faserrichtung erforderliche Druckgradient in Abhängigkeit der Polymereigenschaften

für die hexagonale und quadratische Faseranordnung berechnet. Experimentelle Untersuchungen haben dabei eine gute Übereinstimmung des Berechnungsmodells für quadratische und hexagonale Faseranordnungen mit den Versuchsergebnissen im Pressprozess ergeben. [71]

Diese Modelle von Connor et al. [112] und Nunes et al. [71] setzen eine homogene Verteilung von Fasern und Polymerpartikeln innerhalb des gesamten Laminats und damit auch des Towpregs voraus. Die idealisierten Polymerpartikel müssen sich dabei symmetrisch in den Faserzwischenräumen befinden und mit jedem benachbarten Filament in Kontakt stehen. Der Bepulverungsprozess der Faserstränge muss somit ideal erfolgen, wobei der Faserstrang bis auf die Dicke eines Filamentes gespreizt und mit einem Polymerpulver entsprechend kleiner Partikelgröße vorimprägniert werden muss.

Die reelle Beschaffenheit pulverimprägnierter Rovings in Bezug auf die Partikelverteilung und zur Verfügung stehender Fließwege weicht jedoch in den meisten Anwendungsfällen von solchen vereinfachten Annahmen stark ab. So findet zumeist eine Sinterung der Pulverpartikel auf den Faserbündeln statt (vgl. Abbildung 2.7), wobei diese Vorimprägnierung auf makroskopischer Ebene abläuft. Dadurch werden ganze Faserbündel anstatt der Einzelfilamente mit Partikeln beschichtet, gleichzeitig verschmelzen einzelne Partikel zu größeren, zusammenhängenden Tropfen. [78] Dies entspricht mehr einer äußeren Beschichtung der Faserstränge als einer homogenen Partikelverteilung innerhalb des Faserstrangs.

Unter der Annahme, dass solche identischen, vorimprägnierten Faserbündel symmetrisch in einem Laminat angeordnet und gleichzeitig in einem Pressprozess imprägniert werden, kann eine nach innen gerichtete Imprägnierung der Einzelbündel quer zur Faserrichtung angenommen werden (Mikroimprägnierung). [101] Allerdings ist zu vermuten, dass zunächst ein Fließen auf der Oberfläche der Faserbündel entlang der Fasern stattfindet, bis eine homogene und vollständige Verbindung der schmelzflüssigen Partikeltröpfchen vorliegt (Makroimprägnierung).

2.5 Statistische Versuchsplanung

Die Methode der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) wird zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchen und Experimenten genutzt. Im

Vergleich zu der Ein-Faktor-Methode, der Versuchsplanung und -durchführung mit Variation eines Parameters je Versuch, liefert die statistische Versuchsplanung einen Mehrwert an Informationen. So können zum einen Informationen bezüglich der Effekte und Signifikanz einzelner Parameter gefunden und zusätzlich die Wechselwirkungseffekte aller Parameter identifiziert werden. [114, 115] Das Prinzip der Ein-Faktor-Methode und eines vollständigen faktoriellen, statistischen Versuchsplans ist in Abbildung 2.13 am Beispiel von drei Parametern grafisch dargestellt.

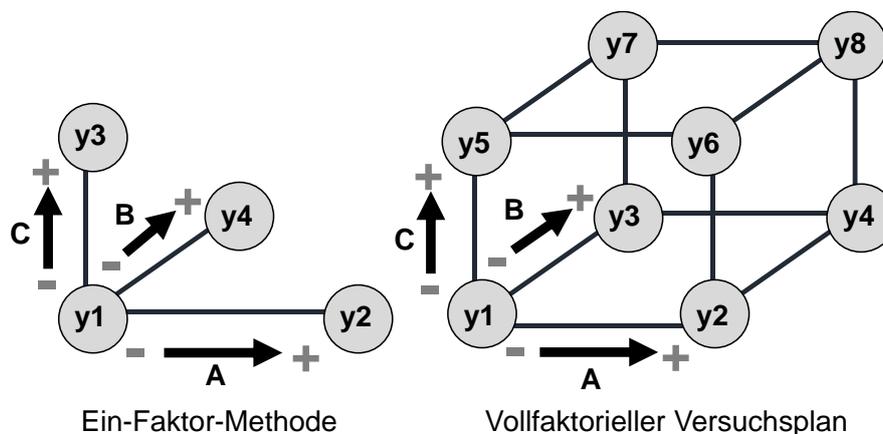


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Ein-Faktor-Methode (links) und des vollständigen faktoriellen Versuchsplans (rechts) nach [114]

Bei der Ein-Faktor-Methode (siehe Abbildung 2.13, links) stellen die Punkte y1 bis y4 die jeweiligen Versuchsergebnisse (Messgrößen) der entsprechenden Faktorstufenkombinationen dar. Die einstellbaren Parameter, bzw. Faktoren (A, B, C), werden ausgehend von einer ursprünglichen Faktorstufenkombination (in diesem Beispiel ist der Ausgangspunkt y1) einzeln in jeweils einem Versuch verändert. Jeder Faktor wird dabei nur um jeweils einen Wert variiert, was als Faktorstufe bezeichnet wird. Die Stufe mit dem kleineren Betrag eines Faktors ist mit einem Minussymbol, die Stufe mit dem höheren Betrag eines Faktors mit einem Pluszeichen bezeichnet. Bei der Ein-Faktor-Methode ist der Effekt einer Faktorstufenerhöhung auf das entsprechende Ergebnis eindeutig zuzuordnen. Jeder Faktor wird dabei immer von dem gleichen Ausgangspunkt ausgehend verändert, was voraussetzt, dass die Wirkung eines Faktors unabhängig von den Einstellungen der anderen Faktoren ist. Dabei werden jedoch keine weiteren Informationen über Ergebnisse, bzw. Effekte, erzeugt, bei welchen ein Faktor ausgehend von einer anderen

Faktorstufenkombination geändert wird. Somit lassen sich auch keine Wechselwirkungen zwischen zwei oder mehreren Faktoren identifizieren und bewerten, ohne den Versuchsaufwand durch Verschieben des Ausgangspunkts deutlich zu erhöhen. [114, 115]

Bei der statistischen Versuchsplanung mit vollständigem faktoriellen Versuchsplan, schematisch in Abbildung 2.13 rechts zu sehen, werden hingegen die Faktoren ausgehend von jeder möglichen Parameterkombination verändert. In der Darstellung des vollständigen faktoriellen Versuchsplans ergibt sich so ein Würfel. Mit diesem vollständigen faktoriellen Versuchsplan können die Wirkungen, bzw. Effekte, der variablen Faktoren (A, B, C) ebenso ermittelt werden wie mit der Ein-Faktor-Methode. Zudem lässt diese Methode auch Aussagen über die Wechselwirkungen zwischen Faktoren zu, wobei jedoch auch der Versuchsumfang wächst. Erreicht wird dies durch eine gleichzeitige Variation der Faktoren. Die Einzelergebnisse (y_i) werden anschließend durch vergleichende Betrachtung mehrfach zur statistischen Auswertung herangezogen, was die Aussagekraft einzelner Ergebnisse erhöht. Durch einen ausgewogenen Versuchsplan lassen sich die Effekte weiterhin auf einzelne Faktoren zurückführen. Nach diesem Versuchsplan sind für jede Stufe eines Faktors die Einstellungen der übrigen Faktoren gleichmäßig verteilt. Am Beispiel des Faktors A in Tabelle 2.1 kann die Ausgewogenheit des Versuchsplans erläutert werden. Hierbei wird jede mögliche Faktorstufenkombination zwischen den Faktoren B und C jeweils mit der hohen und niedrigen Faktorstufe von A untersucht. [114, 115] Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Parametereinstellung und dem Effekt, werden für die drei Faktoren dieses Beispiels je zwei Stufen vorgesehen. Daraus ergeben sich $m = 2^3 = 8$ Faktorstufenkombinationen. Man spricht daher von einem vollständigen faktoriellen 2^3 -Versuchsplan. [114] Die beispielhafte Übersicht über die Faktorstufenkombinationen ist in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1: Faktorstufenkombinationen des ausgewogenen vollständigen faktoriellen 2^3 -Versuchsplans nach [114]

Syst. Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Ergebnis
1	-	-	-	y1
2	+	-	-	y2
3	-	+	-	y3
4	+	+	-	y4
5	-	-	+	y5
6	+	-	+	y6
7	-	+	+	y7
8	+	+	+	y8

Für die Wahl der Faktorstufen ist es wichtig, einen effektiven Unterschied zwischen den Stufen zu wählen. Ein zu kleiner Unterschied kann zu ebenso kleinen Unterschieden im Ergebnis führen, sodass eine Auswertung erschwert wird. Auch ein zu groß gewählter Abstand der Faktorstufen kann durch die mögliche Übergehung und damit fehlende Erfassung von Extremwerten das Ergebnis verfälschen. [114]

Um statistisch aussagekräftige Messergebnisse zu erzielen, sollte die Versuchsdurchführung jeder Faktorstufenkombination mindestens dreimal wiederholt werden. Die Gesamtanzahl an Einzelergebnissen N ergibt sich hierbei aus der Multiplikation der m -Faktorstufenkombinationen mit der Anzahl an Wiederholungen n für jede Kombination (siehe Formel 2.4). [114]

$$N = n \cdot m \quad 2.4$$

Bei acht Faktorstufenkombinationen mit drei Versuchsdurchführungen ergibt sich somit eine Gesamtanzahl von $N = 24$ Einzelergebnissen. Zunächst sollte sichergestellt werden, dass die N Ergebnisse normalverteilt sind. Dies kann grafisch überprüft werden, indem zunächst die N Ergebnisse ihrer Größe nach geordnet werden. Stammen die Ergebniswerte aus einer normalverteilten Grundgesamtheit, so liegen sie näherungsweise auf einer Geraden. Hierbei lassen sich auch einzelne Ausreißer erkennen, die auf vereinzelte Fehlmessungen hinweisen können. [114]

Zur statistischen Auswertung werden die Effekte der drei Faktoren (A, B, C) aus den Ergebnissen der Faktorstufenkombinationen berechnet. Exemplarisch für den Faktor A berechnet sich der Effekt als Differenz zwischen dem Mittelwert der

Ergebnisse der Stufe A + (2.5) und dem Mittelwert der Ergebnisse der Stufe A - (2.6) nach Formel 2.7: [114, 115]

$$\bar{y}_{A+} = \frac{y_2 + y_4 + y_6 + y_8}{4} \quad 2.5$$

$$\bar{y}_{A-} = \frac{y_1 + y_3 + y_5 + y_7}{4} \quad 2.6$$

$$\text{Effekt A} = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{y_2 + y_4 + y_6 + y_8}{4} - \frac{y_1 + y_3 + y_5 + y_7}{4} \quad 2.7$$

Analog dazu werden die Effekte der übrigen Parameter B und C berechnet. [114, 115]

Neben den Haupteffekten lassen sich auch die Effekte der Zwei- und Dreifachwechselwirkungen berechnen. Eine Zweifachwechselwirkung liegt vor, wenn der Effekt eines Faktors von einer gleichzeitigen Veränderung eines anderen Faktors beeinflusst wird. Weist der Zweifachwechselwirkungseffekt das gleiche Vorzeichen wie der Einzeleffekt auf, so bedeutet dies, dass eine gleichzeitige Erhöhung der beiden Faktoren eine Verstärkung des Effektes verursacht. Besitzt der Zwei-Faktor-Wechselwirkungseffekt ein umgekehrtes Vorzeichen zu dem Einzeleffekt, so wird durch die gleichzeitige Erhöhung beider Faktoren eine Abschwächung des Effektes der einzelnen Faktoren bewirkt. Die Wechselwirkung AB beschreibt beispielsweise den Einfluss einer Änderung des Faktors B auf den Effekt des Faktors A. Der Effekt dieser Wechselwirkung berechnet sich als Mittelwert von Effekt A, mit B auf Stufe + (2.8), und Effekt A, mit B auf Stufe - (2.9) nach Formel 2.10 [114, 115]:

$$\text{Effekt } A_{B+} = \bar{y}_{A+B+} - \bar{y}_{A-B+} = \frac{y_4 + y_8}{2} - \frac{y_3 + y_7}{2} \quad 2.8$$

$$\text{Effekt } A_{B-} = \bar{y}_{A+B-} - \bar{y}_{A-B-} = \frac{y_2 + y_6}{2} - \frac{y_1 + y_5}{2} \quad 2.9$$

$$\begin{aligned} \text{Wechselwirkungseffekt AB} &= \frac{\text{Effekt } A_{B+} - \text{Effekt } A_{B-}}{2} \\ &= \frac{y_1 + y_4 + y_5 + y_8 - y_2 - y_3 - y_6 - y_7}{4} \end{aligned} \quad 2.10$$

Analog dazu werden die Effekte der Zweifachwechselwirkungen AC und BC berechnet. [114, 115]

Der Effekt der Dreifachwechselwirkung ABC wird aus mathematischen Gründen der Orthogonalität nach Formel 2.11 [114] berechnet:

Wechselwirkungseffekt ABC

$$= \frac{y_2 + y_3 + y_5 + y_8 - y_1 - y_4 - y_6 - y_7}{4} \quad 2.11$$

Die Dreifachwechselwirkung liefert Informationen darüber, ob der Effekt eines Faktors von der Faktorstufenkombination der anderen Faktoren abhängt. [114]

Um die Signifikanz der jeweiligen Einzeleffekte und Wechselwirkungen abzuschätzen, werden diese mit den Breiten verschiedener, zweiseitiger Vertrauensbereiche (Konfidenzintervalle) der Student-Verteilung verglichen. Dabei werden 95 %-, 99 %- und 99,9 %-Konfidenzintervalle nach Formel 2.12 [114] berechnet:

$$\pm t * s_{\bar{d}} \quad 2.12$$

Der t-Wert ist ein Faktor, der durch eine Multiplikation mit dem Schätzwert der Standardabweichung $s_{\bar{d}}$ angibt, welches Vertrauensintervall bei der jeweiligen Wahrscheinlichkeit (95 %, 99 % und 99,9 %) vorliegt. Um die t-Werte für die jeweiligen Konfidenzintervalle aus einer Student-Verteilungstabelle¹ entnehmen zu können, muss der Freiheitsgrad f nach Formel 2.13 aus der Differenz der Ergebnisanzahl (Versuchsumfang) N und der Anzahl an Faktorstufenkombinationen m berechnet werden. [114]

$$f = N - m \quad 2.13$$

Der Schätzwert der Standardabweichung der Effekte $s_{\bar{d}}$ wird aus dem Mittelwert s^2 der Einzelvarianzen jeder Faktorstufenkombination s_i^2 (Formel 2.14) nach Formel 2.15 berechnet. [114]

$$s^2 = \frac{\sum s_i^2}{m} \quad 2.14$$

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} * s^2} \quad 2.15$$

Liegt ein Effekt innerhalb des 95 %-Vertrauensbereichs, so gibt es keinen Hinweis auf einen Einfluss (der Effekt liegt innerhalb der Messfehler bzw. zufällige Streuung der Versuchsreihe). Befindet er sich zwischen dem 95 %- und 99 %-Vertrauensbereich ist

¹ Ein Auszug einer t-Werttabelle zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche nach [114, 116] ist im Anhang in Tabelle 10.1 dargestellt.

er indifferent und es sollten nach Möglichkeit weitere Daten gesammelt werden, um eine fundierte Aussage treffen zu können. In dem Intervall zwischen dem 99 %- und 99,9 %-Vertrauensbereich ist er signifikant. Ragt der Effekt über den 99,9 %-Vertrauensbereich hinaus, so gilt er als hochsignifikant. [114]

2.6 Schlussfolgerungen

Bei Betrachtung des Standes der Technik ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Generell kann ein stark wachsender Bedarf an kontinuierlich, lastgerecht verstärkten thermoplastischen FKV für verschiedene Anwendungsbereiche festgestellt werden. Dazu stehen unterschiedliche Fertigungsmethoden und -prozesse zur Verfügung.
- Die **Herstellung und Verarbeitung von Organoblechen** auf Basis flächiger textiler Halbzeuge erlaubt nur bedingt (bspw. durch gezielten Lagenaufbau) individuelle, lastgerechte Verstärkungsstrukturen. Zudem ist die Herstellung von endkonturnahen Laminaten kaum möglich, sodass bei der Verarbeitung von Organoblechen ein hoher Materialverschnitt in Kauf genommen werden muss.
- Das **Thermoplastische Tapelegen (TTL)** bietet sich besonders zur verschnittarmen Herstellung lastgerecht verstärkter Thermoplaste an, wobei auf kommerziell verfügbare, vollimprägnierte und vollkonsolidierte Halbzeuge zurückgegriffen wird. Dies begrenzt die Materialauswahl und -kombinationsmöglichkeiten, wodurch das Anwendungsspektrum und der gezielte Materialeinsatz dieses ansonsten flexiblen Prozesses deutlich eingeschränkt werden. Durch die Verwendung dieser vollkonsolidierten Halbzeuge kann weiterhin eine direkte Bauteilherstellung durch die In-situ-Konsolidierung erreicht werden. Diese In-situ-Konsolidierung ist jedoch nur in speziell abgestimmten Fertigungskonzepten möglich, in vielen Fällen müssen die Bauteile nach dem Tapelegeprozess durch einen nachgeschalteten Konsolidierungsschritt, in einer Presse oder einem Autoklaven, nachkonsolidiert werden.
- Im Bereich der kontinuierlich faserverstärkten Duroplaste hat sich das **Dry Fiber Placement (DFP)** durch die Ablage trockener (bebinderter) Rovings zu lastgerechten, individuellen Faserstrukturen als Preformingprozess etabliert.

Das DFP ist in Bezug auf die Rohstoffe (Rovings) besonders flexibel, sodass neben individuellen Geometrien auch Hybridstrukturen (z. B. durch die Kombination von Stahlfaser/Kohlenstofffaser) erzeugt werden können. Der Prozess des DFP ist derzeit jedoch nicht auf die Verarbeitung von Thermoplasten übertragbar, da eine nachträgliche Imprägnierung trockener Preforms aufgrund der hohen Schmelzviskosität der Thermoplaste nicht umsetzbar ist.

- Ein bisher wenig untersuchtes Verfahren (abgesehen von der Textilen Weiterverarbeitung) ist die **direkte Verarbeitung thermoplastisch pulverimprägnierter Rovings**. Aktuelle Untersuchungen greifen auf das Wickelverfahren zurück, wobei jedoch keine Analysen zur Bestimmung der Imprägnierqualität der Towpregs, der Preform, bzw. des finalen Bauteils durchgeführt und somit keine Aussagen über den entsprechenden Imprägnierfortschritt innerhalb der Einzelprozesse getroffen wurden.

Durch das in dieser Arbeit untersuchte Konzept einer **thermoplastischen Pulver-Towpreg (TPT) basierten Prozesskette** sollen die Vorteile des DFP (flexibel hinsichtlich Materialauswahl und -kombination) mit der Verarbeitung bändchenförmiger, thermoplastischer Halbzeuge kombiniert werden, wobei durch die direkte Verarbeitung von trockenen Rovings und Polymerpulver auf die Halbzeugstufe eines vollständig vorimprägnierten Tapes verzichtet werden kann. Durch die Pulverimprägnierung der Rovings ist, im Gegensatz zu einer Schmelzimprägnierung, eine Wiederverwendung des Verlustpulvers möglich, was zusammen mit der verschnittarmen, variablen Ablagemöglichkeit zu lokal lastgerechten Strukturen einen besonders materialeffizienten Prozess ergibt.

Zusammenfassend lassen sich die betrachteten Prozesse, sowie die untersuchte Pulver-Towpreg basierte Prozesskette, in folgender Tabelle 2.2 bewerten:

Tabelle 2.2: Bewertung der betrachteten Prozesse und der untersuchten
Pulver-Towpreg basierte Prozesskette

Kriterien	TTL	DFP	Organoblech	TPT
Lastgerechte Faserstrukturen	++	++	-	++
Hohe Flexibilität hinsichtlich Fasermaterialauswahl / -kombination	0	++	0	++
Geringer Materialverschnitt / -verlust	++	++	--	+
Verwendung TP-Matrix	++	--	++	++
Kurze Einzelprozessschritte	+	0	+	+
Erläuterung	Symbol			
Erfüllt sehr gut	++			
Erfüllt gut	+			
Neutral	0			
Erfüllt schlecht	-			
Erfüllt sehr schlecht	--			

3 Versuchsmaterialien

Zur Validierung der Anlagen- und Prozessentwicklung, als auch für die Durchführung der Parameterstudien zur statistischen Bewertung der Einzelprozesse, wurde eine Materialkombination (Verstärkungsfasern und thermoplastisches Matrixpolymer) ausgewählt. Aufgrund der Ausrichtung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Prozesses auf die direkte Verarbeitung individueller Basismaterialien, soll die Auswahl unter dem Aspekt günstiger und massenprozesstauglicher Materialien erfolgen, wobei zur Validierung eines stabilen Herstellungs- und Verarbeitungsprozesses besonders die Verstärkungsfasern prozesstechnische Herausforderungen bewirken sollen. Die verwendeten Versuchsmaterialien werden im Folgenden beschrieben.

3.1 Verstärkungsfasern

Als Faserhalbzeug wurde der Glasfaserroving *VETROTEX P185-EC14-2400 tex* von *Saint-Gobain* ausgewählt. Bei diesem Roving handelt es sich um einen Multi-End Roving, der sich aus mehreren einzelnen Faserbündeln zusammensetzt und auf einer Spule mit Außenabzug geliefert wird. Die Bezeichnung *EC14* beschreibt die verwendeten Filamente, bei denen es sich um kontinuierliche E-Glas Filamente mit einem Durchmesser von 14 μm handelt. Dieser Roving ist hauptsächlich für das Filamentwickel- und Pultrusionsverfahren konzipiert, wobei eine Silan-Schlichte zunächst eine gute Kompatibilität mit Epoxidharzen aufweist. [117] Die wichtigsten Materialeigenschaften dieses GF-Rovings sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Eigenschaften Glasfaserroving *VETROTEX P185-EC14-2400 tex* [117, 118]

Linear-gewicht in tex	Dichte in g/cm^3	Zugfestigkeit in MPa	Zug-E Modul in GPa	Bruch-dehnung in %
2400 (2350 ²)	2,55	3500	73	$\approx 4,5$

Zur Herstellung der Multi-End Rovings werden die im Düsenspinnverfahren hergestellten Glasfilamente zunächst zu sogenannten Strands mit einer Feinheit von 30 bis 80 tex gebündelt und aufgewickelt. In einem weiteren Prozessschritt werden

² Zur Kontrolle ist das Längengewicht des verwendeten Rovings experimentell bestimmt worden. Siehe dazu Tabelle 10.2 im Anhang

eine, dem geforderten Längengewicht des Rovings entsprechende, Anzahl dieser Strands zu einem Roving zusammengeführt (assembliert) und aufgewickelt. Da die einzelnen Strands bei diesem zusammenführenden Prozess nicht aneinander haften, fächert sich der Roving bei der Weiterverarbeitung wieder in die einzelnen Strands auf, worauf bereits durch den Hersteller hingewiesen wird [119]. Generell werden assemblierte Rovings derzeit überwiegend in Schneidverfahren eingesetzt, wie z. B. im Faserspritzen. [119]

3.2 Matrixpolymer

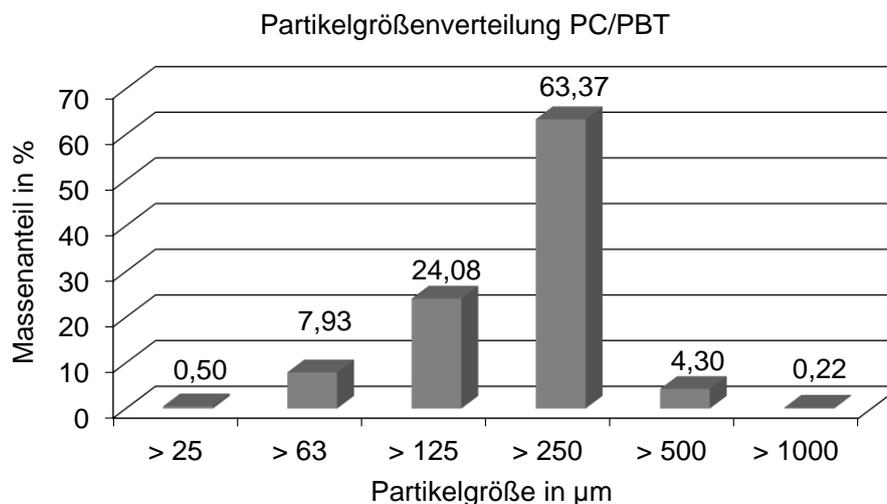
Die Matrixauswahl basiert im Wesentlichen auf Untersuchungsergebnissen eines im Jahr 2015 abgeschlossenen BMBF-Forschungsvorhabens (Akronym: *MultiKab*) [120] mit dem Ziel der Herstellung faserverstärkter thermoplastischer Bauteile für den Verkehrssektor. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden u. a. Werkstoffkombinationen zur Herstellung von Organoblech-Profilstrukturen getroffen und bewertet. Untersucht wurden dabei die Polymerwerkstoffe Polyamid 6 (PA6) sowie ein Polymerblend aus Polycarbonat (PC) und Polybutylenterephthalat (PBT) in Kombination mit zwei unterschiedlichen GF-Verstärkungstextilien, wobei sich die Verstärkungstextilien hinsichtlich ihrer Schlichte (Amino-Silan und Epoxy-Silan) unterschieden. In mechanischen Prüfungen wurde die Faser-Matrix-Anhaftung der Materialkombinationen untersucht, wobei die Kombination aus GF-Textil mit Epoxy-Silan Schlichte und PC/PBT die besten Eigenschaften aufwiesen. [120]

Entsprechend dieser veröffentlichten Ergebnisse, wurde zur Durchführung der Versuchsreihen dieser Arbeit eine vergleichbare Materialkombination gewählt. Ergänzend zu dem GF-Roving mit einer Epoxy-Silan Schlichte [117] kam als polymere Matrix das PC/PBT Polymerblend mit dem Handelsnamen *Makroblend KU2-7912/4* der *Covestro AG* zum Einsatz. [121] Ein Polymerblend besteht im Allgemeinen aus einer Mischungen zweier oder mehrerer Polymere, wobei durch das Vermischen der Polymere aus den Eigenschaften der Basispolymere spezifisch gewünschte Eigenschaftsbilder generiert werden können. Dabei ist es möglich, synergetische Eigenschaftsverbesserungen zu erzielen. [122, 123] Die detaillierte Zusammensetzung des verwendeten *Makroblend* geht aus den Unterlagen des Herstellers nicht hervor, in Tabelle 3.2 sind die wichtigsten prozesstechnischen Eigenschaften des verwendeten Polymerblends aufgeführt. [121, 124]

Tabelle 3.2: Eigenschaften *Makroblend KU2-7912/4* [121, 124, 125]

Dichte in g/cm ³	Zugmodul in MPa	Schmelz- temp. in °C	Zer- setzungs- temp. in °C	Formbe- ständig- keitstemp. in °C	Wärme- leitfähigkeit in W/m K	Wärme- kapazität der Schmelze in J/kg K
1,2	2150	223	≥ 380	85 ³	0,2	2000

Das Polymer ist als Granulat verfügbar und wurde für die Verarbeitung in den Versuchsreihen dieser Arbeit durch die Firma *Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG* zu einem Pulver mit einer Partikelgröße im Bereich von überwiegend 250 µm (63,37 %) gemahlen. In Abbildung 3.1 ist die ermittelte Partikelgrößenverteilung des gemahlene *Makroblend* dargestellt. Die Analyse der Partikelgrößenverteilung wurde gravimetrisch mit Hilfe des Siebturms *Analysette 3 PRO* der Firma *Fritsch* mit Siebschalen der Maschenweite 25 µm, 63 µm, 125 µm, 250 µm, 500 µm und 1000 µm durchgeführt.

Abbildung 3.1: Partikelgrößenverteilung des verwendeten PC/PBT Pulvers (*Makroblend*)

³ Prüfbedingung: 1,8 MPa

4 Konzeption und Untersuchung einer Methode zur Herstellung thermoplastischer Pulver-Towpregs im Labormaßstab

In diesem Kapitel wird der erste Prozessschritt der zugrundeliegenden Prozesskette, die Herstellung der TPT im Labormaßstab, konzeptioniert und untersucht. Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen an den Bepulverungsprozess definiert und der Versuchsaufbau und Ergebnisse aus einer Vorversuchsreihe an bestehenden Anlagen zur Bindertapeherstellung (DFP) [46] beschrieben. Basierend auf den durch die Vorversuche gewonnenen Erkenntnissen wird anschließend der angepasste Versuchsaufbau zur Prozessuntersuchung erläutert, die Methoden und Versuchsplanungen vorgestellt und abschließend die Versuchsergebnisse dargestellt und bewertet.

4.1 Anforderungen an den Bepulverungsprozess

Da bei der Herstellung thermoplastischer Pulver-Towpregs bereits das gesamte Matrixpolymer des finalen Bauteils gefördert und appliziert werden muss, soll sichergestellt sein, dass das Verhältnis zwischen Fasern und Polymer den Vorgaben an das finale Bauteil entspricht. Für die TPT, die im Rahmen dieser Untersuchung hergestellt und verarbeitet werden sollen, wird als Ziel ein Faser-Thermoplast-Volumenverhältnis (FTV) von 1:1 festgelegt. Unter der Annahme einer idealen, vollständigen Konsolidierung entspricht dies einem theoretischen FVG von 50 % im finalen Bauteil. Aufgrund der zu erwartenden hohen Variation des FVG bei der Verwendung von Pulverprepregs [5], wird für den Herstellungsprozess thermoplastischer Pulver-Towpregs eine maximale Abweichung von $\pm 2\%$ des theoretischen FVG festgelegt. Zudem soll zur Erreichung eines nachhaltigen und ökonomischen Prozesses das Verlustpulver, welches während des Bepulverungsprozesses nicht auf dem Roving haften bleibt, wiederverwendet werden können.

Weiterhin soll der Bepulverungsprozess folgende Anforderungen erfüllen:

- Kontinuierlicher Prozessdurchlauf und Bepulverung des Rovings.
- Automatische Förderung des Rovings mit einstellbarer und konstanter Prozessgeschwindigkeit.

- Stabiler Prozess (max. Abweichung des theoretischen FVG von $\pm 2 \%$) auch bei Verwendung assemblierter Rovings.
- Bepulverung der Rovings und Vorimprägnierung (Aufschmelzen und Anhaftung der Partikel) ohne Applikation eines Prozessdrucks
- Adaptierbarkeit der Heizstrecke (Anpassung der übertragenen Wärmemenge) an Verwendung verschiedener thermoplastischer Pulvermaterialien.
- Zuführung des Rovings auf einer Spule mit Außenabzug zur Vermeidung von Twists (Verdrehungen des Rovings).
- Aufwicklung des bepulverten Rovings (TPT) auf einer Bandspule des Typs BSH 315⁴ zur Weiterverarbeitung an der Labortapelegeanlage der *IVW GmbH* im nächsten Prozessschritt.

4.2 Vorversuche zur TPT-Herstellung

In Vorversuchen an bestehenden Anlagen zur Bindertapeherstellung [46] wurde die prinzipielle Machbarkeit des Prozesses überprüft. Die im Folgenden vorgestellte Anlage zur Bindertapeherstellung erfüllt weitgehend die Anforderungen an einen kontinuierlichen und adaptiven Bepulverungsprozess (s. o.), so dass aus den Erkenntnissen der Vorversuchen weitere Anforderungen für den angepassten Bepulverungsprozess zur Herstellung von TPT abgeleitet werden können.

Die Versuchsdurchführung der Vorversuche entsprach der Herstellung von Bindertapes für das DFP nach [46] mit einer entsprechend höheren Pulvermasse, wobei die applizierte Pulvermasse in Abhängigkeit zur geförderten Pulvermasse analysiert wurde.

4.2.1 Versuchsaufbau: Vorversuche zur TPT-Herstellung

Pulverdosiereinheit

Die Pulverdosiereinheit übernimmt die Aufgabe einer kontinuierlichen Förderung eines thermoplastischen Pulvers mit einstellbarer Fördermenge. In Abbildung 4.1 ist die verwendete Pulverdosiereinheit, welche im Rahmen vorangegangener Untersuchungen entwickelt wurde [15, 46], dargestellt.

⁴ Hersteller: *Häfner & Krullmann GmbH*

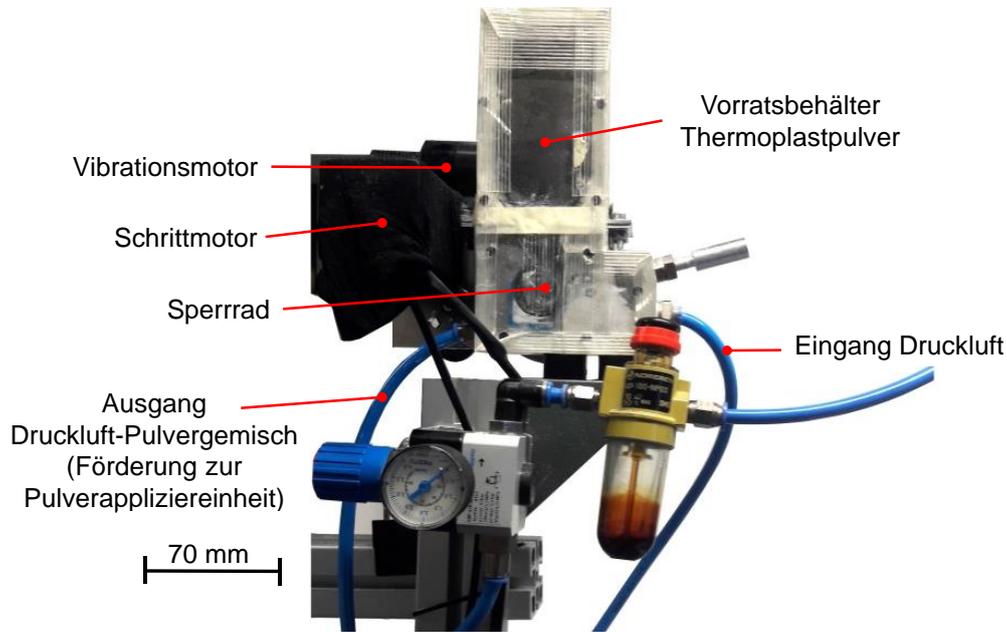


Abbildung 4.1: Pulverdosiereinheit zur Dosierung und Förderung eines polymeren Pulvers [46]

Das Thermoplastpulver befindet sich in einem Vorratsbehälter im oberen Bereich der Dosiereinheit. Dieser mündet trichterförmig auf ein Sperrrad, welches von einem Schrittmotor angetrieben und von einem CNC-basierten Softwaresystem gesteuert wird. Durch einstellbare Sperrradrehzahlen können definierte und variable Pulvermengen gefördert werden. Die gesamte Pulverdosiereinheit wird durch einen luftgetriebenen Vibrationsmotor in Schwingungen versetzt, wodurch die Agglomeration des Polymerpulvers verhindert und so die Pulverförderung erleichtert wird. Der Bereich unterhalb des Sperrrads wird von einem einstellbaren Druckluftstrom durchströmt, welcher das geförderte Pulver aufnimmt und durch einen Schlauch zur Pulverappliziereinheit weitertransportiert.

Pulverappliziereinheit (DFP)

Nach dem Durchlaufen einer Spreizeinheit (Spreizung durch Umlenkung) wird der Roving durch die Pulverappliziereinheit gefördert. Innerhalb der Pulverappliziereinheit (siehe Abbildung 4.2) wird das Polymerpulver-Luftgemisch durch eine Düse in den Heißluftstrom eines Heißluftgebläses eingebracht. Dieser Heißluftstrom ist orthogonal auf den darunter verlaufenden, trockenen Roving ausgerichtet, welcher die Einheit mit einer einstellbaren, konstanten Geschwindigkeit durchläuft. Durch die Erwärmung im

Heißluftstrom (Heißlufttemperatur 250 °C) werden die Thermoplastpartikel aufgeschmolzen, treffen schmelzflüssig auf den Roving und haften an diesem an.

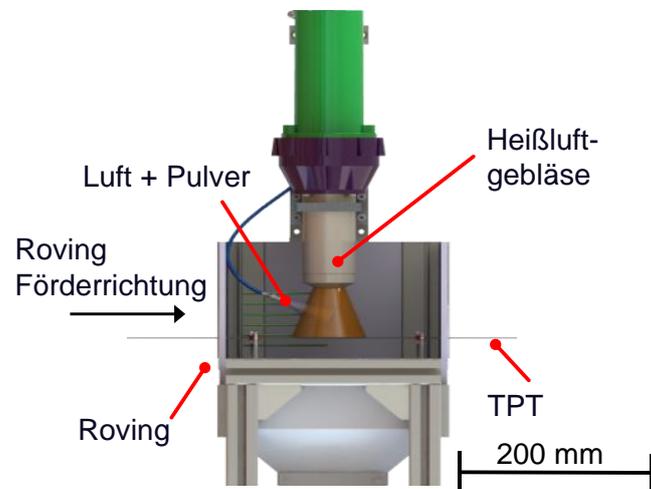


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Pulverappliziereinheit zum Aufsprühen von duroplastischem Binderpulver auf einen Roving nach [46]

Das so hergestellte TPT wird im Anschluss zur Weiterverarbeitung auf eine Spule aufgewickelt. Die Beschreibung der Abwickel-, Spreiz- und Aufspuleinheit erfolgt in Kapitel 4.4

4.2.2 Ergebnisse der Vorversuche

Die Bepulverung der Rovings mit der bestehenden Anlage zur Bindertapeherstellung ist mit einem hohen Pulververlust bei der Applikation verbunden (Pulververlust ca. 80 Gew.-%). Die Ergebnisse dieser Vorversuche sind in Abbildung 10.1 im Anhang zusammengefasst dargestellt. Aufgrund der dynamischen Pulverapplikation im Heißluftstrom des Heißluftgebläses wird weiterhin die gesamte geförderte Pulvermenge aufgeschmolzen, wodurch das nicht applizierte Pulver (80 % der Gesamtfördermenge) nicht wiederverwendet werden kann. Die bestehende Pulverappliziereinheit zur Herstellung von Bindertapes kann somit nicht zur Herstellung von TPT unter den Anforderungen der Wiederverwendbarkeit des Pulvers eingesetzt werden.

Basierend auf den Resultaten der Vorversuche wird eine entsprechende Prozess- und Anlagenentwicklung zur optimierten Herstellung der TPT durchgeführt und bewertet.

4.3 Versuchsaufbau: Angepasste Pulverappliziereinheit (TPT)

Die Basis der Optimierung des Bepulverungsprozesses bilden, neben den Messergebnissen, Beobachtungen, welche im Rahmen der Vorversuche gemacht wurden. So war eine starke Tendenz zur Gassenbildung (Lücken in Faserrichtung) innerhalb der verwendeten, assemblierten Rovings während der Verarbeitung feststellbar. Diese Gassenbildung tritt vorwiegend zwischen einzelnen Fasersträngen des assemblierten Rovings auf, was auf die Herstellungsweise dieser Rovings zurückzuführen ist. Die Gassen begünstigen einen hohen Pulververlust, da die Thermoplastpartikel während der dynamischen Applikation im Heißluftstrom mit hoher Geschwindigkeit auf den Roving treffen und sich durch dessen offene Struktur hindurchbewegen oder diesen seitlich verfehlen können. Besonders stark ist die Gassenbildung in langen, ungeführten Bereichen bei freier Förderung des Rovings zu beobachten.

Eine deutliche Verringerung dieser Gassenbildung konnte im Bereich der Spreizeinheit beobachtet werden. Durch die Umlenkung des Rovings an den Spreizstangen liegt dieser unter Zugspannung auf einer gekrümmten Fläche auf, was zu einer parallelen und ebenen Ausrichtung der Einzelstränge führt. Diese Beobachtung ist schematisch in Abbildung 4.3 dargestellt.

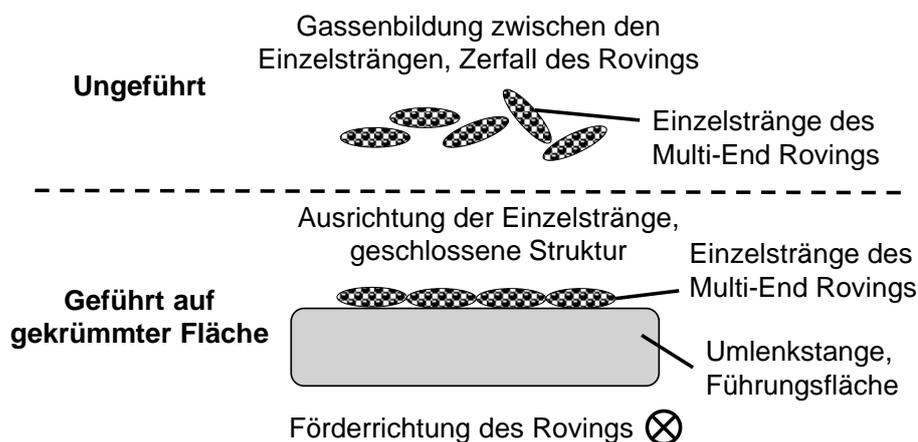


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des beobachteten Verhaltens eines assemblierten Rovings während der Verarbeitung, ohne Führung (oben) und mit Führung (unten)

Aufgrund dieser Beobachtung sollen für die Neuentwicklung der Pulverappliziereinheit, ergänzend zu den Anforderungen in Kapitel 4.1, folgende Vorgaben umgesetzt und erreicht werden:

- Der Glasfaserroving soll im Bereich der Bepulverung über eine gekrümmte Oberfläche geführt werden, um so die Bildung von Gassen im Roving zu minimieren.
- Eine zusätzliche seitliche Führung des Rovings soll eine definierte Breite des TPT sicherstellen und den seitlichen Pulververlust verringern.
- Die Erwärmung und Aufschmelzung der Thermoplastpartikel soll getrennt von der Pulverapplikation stattfinden, um eine Wiederverwendung der Verlustpulvermenge zu gewährleisten.
- Durch die Verwendung einer Wärmestrahlungsquelle zur Aufschmelzung der Thermoplastpartikel soll im Vergleich zu der dynamischen Aufschmelzung in einem Heißluftstrom der Pulververlust weiter reduziert werden.
- Eine beidseitige Bepulverung des Rovings soll durch die, im Vergleich zur einseitigen Bepulverung, halbierte Pulvermenge je Seite den Pulververlust reduzieren und zu einem symmetrischen und homogenen TPT führen.

Abbildung 4.4 zeigt eine Übersicht der überarbeiteten Bepulverungsanlage und deren einzelner Komponenten (Brems-, Spreiz- und Bepulverungseinheit, Heizstrecke und Aufwickleinheit).

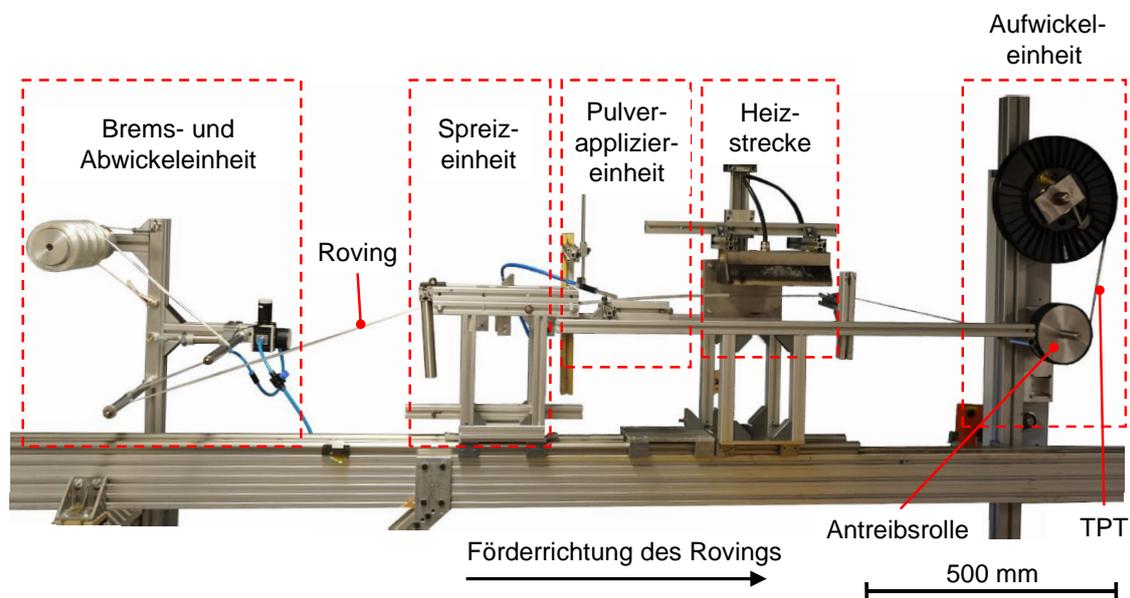


Abbildung 4.4: Aufbau der überarbeiteten Bepulverungsanlage zur Herstellung von TPT mit neu entwickelter Pulverappliziereinheit und Heizstrecke

Der Roving befindet sich zunächst auf einer Spule mit Außenabzug in einer gebremsten Brems- und Abwickleinheit. Hier sorgt eine Bandbremse für eine

Abwicklung des Rovings mit konstanter und definierter Spannung, wobei die Bremskraft über ein pneumatisches System geregelt werden kann. Der Roving wird anschließend durch die Spreizeinheit gefördert, wo er von zwei Umlenkstäben über einen Spreizstab geführt wird (siehe Abbildung 4.5). Die Entwicklung und Funktionsweise der Spreizeinheit wird in [46] ausführlich beschrieben.

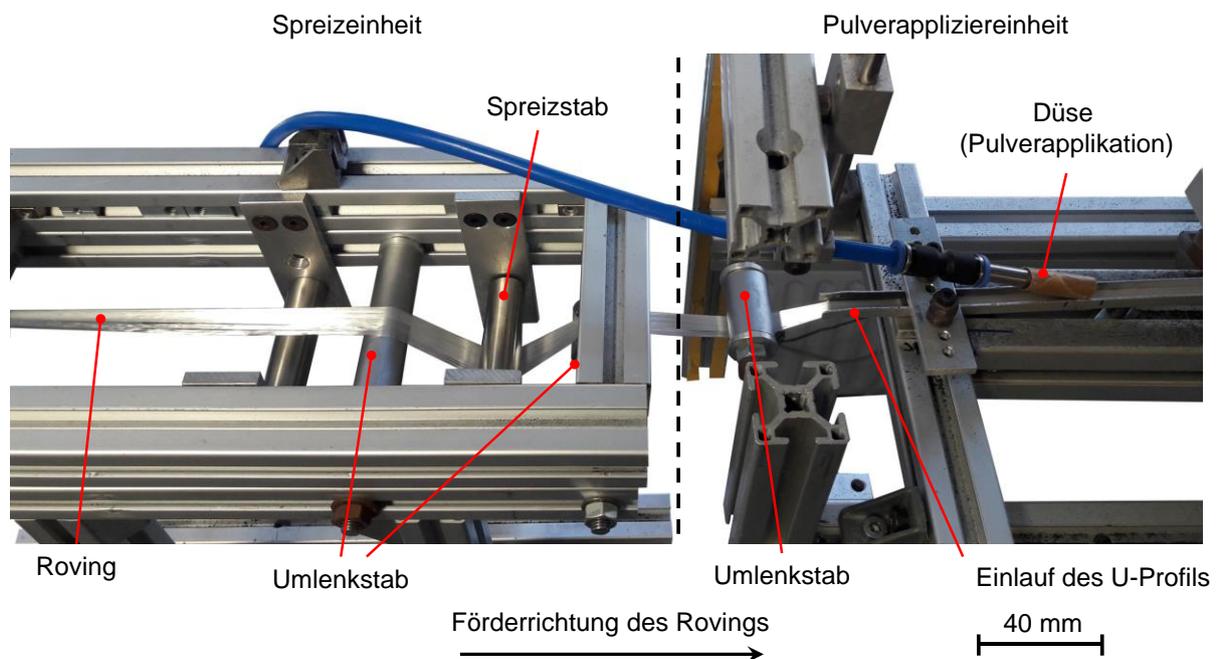


Abbildung 4.5: Detailansicht der Spreizeinheit (links) und Übergang zur Pulverappliziereinheit (rechts)

Vor dem Eintritt in die Pulverappliziereinheit ist ein zusätzlicher Umlenkstab installiert, der dafür sorgt, dass der Roving beim Einlaufen in die dahinterliegende Führung flach auf der Führungsschiene (Teil der Pulverappliziereinheit) aufliegt. Das Konzept der neuentwickelten Pulverappliziereinheit und der Heizstrecke ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

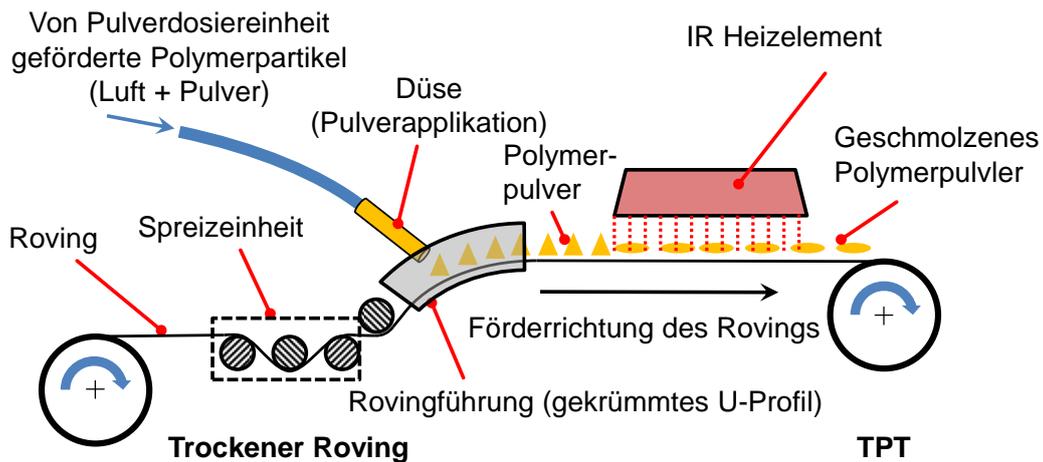


Abbildung 4.6: Konzeptionelle Darstellung der neuentwickelten Pulverappliziereinheit zur Herstellung von TPT

Innerhalb der Pulverappliziereinheit wird der Roving nach dem Durchlaufen der Spreizeinheit in einem gekrümmten U-Profil mit einem Flankenabstand von 7 mm geführt. Im Rahmen der Vorversuche wurde beobachtet, dass bis zu einer Spreizung auf 8 mm Rovingbreite keine Gassenbildung auftrat. Durch die Zusammenführung auf 7 mm soll eine homogene und lückenfreie Faserverteilung während der Pulverapplikation erreicht werden. Die Breite des Rovings von 7 mm entspricht unter Berücksichtigung des gemessenen Längengewichts von 2350 tex einem Flächengewicht von ca. 335 g/m². Dieses U-Profil dient als Führung des Rovings auf einer gekrümmten Fläche, sowie als seitliche Führung für eine konstante Breite des Rovings während der Bepulverung. Der Luftstrom zum Transport des Thermoplastpulvers von der Pulverdosiereinheit wird durch eine Düse geleitet und ist innerhalb des U-Profils in Produktionsrichtung auf den Roving gerichtet. Die Führung im U-Profil zwingt die so applizierten Polymerpartikel auf dem Roving zu verweilen bis unmittelbar nach der Bepulverung die Heizstrecke erreicht wird. Das Aufschmelzen der Polymerpartikel erfolgt durch ein keramisches Infrarot (IR)-Heizelement (IR-Heizstrahler) *Elstein FSR* mit einer Heizleistung von 1000 W und einem Wellenlängenbereich von 2 – 10 µm [126]. Die Länge des IR-Heizelements von 250 mm entspricht somit auch der Heizstrecke, in welcher der bepulverte Roving, zur Vermeidung von Anhaftung der Partikel an Führungselementen, frei gefördert wird. Um die Wärmemenge, die durch das IR-Heizelement bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit in den bepulverten Roving eingebracht wird, und damit die Temperatur anpassen zu können, ist der Abstand zwischen dem Roving und dem

IR-Heizelement einstellbar. Hinter dem IR-Heizelement befindet sich eine weitere kurze Führung in einem U-Profil, wodurch sichergestellt wird, dass der bepulverte Roving parallel zum IR-Heizelement gefördert wird und vor dem Erstarren des Polymers eine erneute seitliche Führung erhält. Nachdem der Roving mit den geschmolzenen TP-Partikeln das Heizelement verlassen hat, kühlt das Polymer ab, erstarrt und haftet an den Filamenten des Rovings an.

Im letzten Prozessschritt wird das TPT in der Aufwickereinheit auf eine Spule (BSH 315) aufgewickelt. Die Aufwickereinheit besteht im Wesentlichen aus einer Antriebsrolle, die über ein Riemengetriebe mit der Spule verbunden ist. Die gummierte Antriebsrolle wird von dem TPT mit einem Winkel von ca. 270° umschlungen und sorgt durch die so erzeugte Haftreibung für einen konstanten Vorschub des TPT, bzw. Rovings. Der Antrieb erfolgt über einen Schrittmotor mit einstellbarer Drehzahl und damit definierter Rovinggeschwindigkeit. Das Riemengetriebe zwischen Antriebsrolle und Spule fungiert dabei als Rutschkupplung, wodurch eine konstante Fördergeschwindigkeit und spannungsfreies Aufwickeln des TPT ermöglicht wird (unabhängig von der Lagenzahl des bereits aufgewickelten TPT).

Die Forderung einer beidseitigen Bepulverung des Rovings kann an dieser Anlage durch einen zweifachen Prozessdurchlauf des Rovings durch die Bepulverungsanlage realisiert werden. Dabei wird im ersten Prozessdurchlauf eine einseitige Bepulverung mit der halben Zielpulvermenge durchgeführt. Im zweiten Durchlauf wird der einseitig bepulverte Roving dem Prozess erneut zugeführt, wobei eine Verdrehung um 180° eine Bepulverung der zweiten Seite des Rovings abermals mit der halben Zielpulvermenge, ermöglicht. Für die Bepulverung der zweiten Seite wird auf die Verwendung der Spreizeinheit verzichtet, da der einseitig bepulverte TPT bereits die gewünschte, durch die Bepulverung stabilisierte und fixierte, Breite aufweist.

4.4 Methoden und Versuchsplanung zur Bewertung des TPT-Herstellungsprozesses

Nachfolgend werden die Untersuchungen zur Bewertung des Bepulverungsprozesses mit der angepassten Pulverappliziereinheit beschrieben. Dabei stellen die Aufschmelzung und Anhaftung der Polymerpartikel, die applizierte Pulvermasse sowie die Homogenität der Bepulverung die Schwerpunkte der Untersuchung dar.

4.4.1 Untersuchung der Thermoplastpulvererwärmung

Der Einfluss des IR-Strahlerabstandes auf die Oberflächentemperatur der TPT nach der Bepulverung wurde in einer Parameterstudie experimentell ermittelt. Ziel war es, eine möglichst hohe Oberflächentemperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Thermoplasts (223 °C [121]) zu erreichen, um eine gute Aufschmelzung und Adhäsion der Polymerpartikel an den Glasfasern zu gewährleisten. Dabei darf die Degradationstemperatur des Polymers jedoch nicht überschritten werden. Als Temperaturuntergrenze wurden 300 °C festgelegt. Als Obergrenze wurde 340 °C gewählt, um eine große und damit sichere Differenz zur Degradationstemperatur von 380 °C [124] einzuhalten. In den Experimenten wurden anschließend Bepulverungsversuche durchgeführt und die Oberflächentemperatur des TPT unmittelbar am Ende des IR-Heizstrahlers in Prozessrichtung optisch ermittelt. Zur Temperaturmessung wurde die Wärmebildkamera *TIM 160* des Herstellers *Micro-Epsilon* verwendet, welche in Prozessrichtung hinter dem IR-Heizstrahler positioniert wurde (siehe Abbildung 4.7, links). Diese Wärmebildkamera kann einen Temperaturbereich von -20 °C bis 900 °C mit einer optischen Auflösung von 160x120 Pixeln erfassen [127].

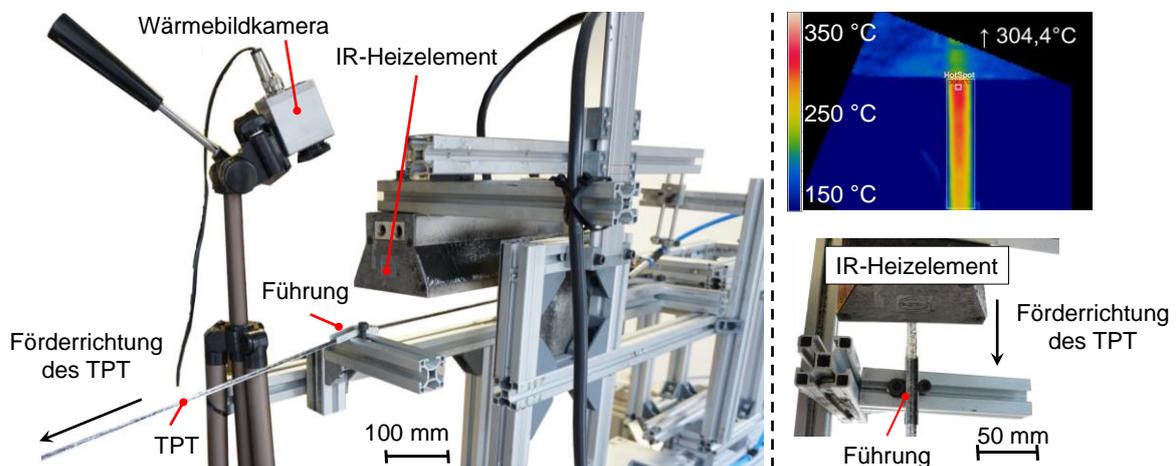


Abbildung 4.7: Versuchsanordnung zur Oberflächentemperaturmessung des TPT mit Hilfe einer Wärmebildkamera (links), Aufnahme der Wärmebildkamera des TPT unmittelbar nach der Heizstrecke bei einem IR-Strahlerabstand von 35 mm und der Blickwinkel der Wärmebildkamera (rechts)

Der Abstand zwischen dem TPT und dem Heizelement wurde in diskreten Schritten von 30 mm, auf 35 mm und 40 mm eingestellt, wobei jeweils 10 Messungen

durchgeführt und die entsprechenden Mittelwerte gebildet wurden. Die Fördergeschwindigkeit des TPT war konstant 1 m/min.

4.4.2 Analyse der applizierten Pulvermenge

Zur Überprüfung der applizierten Pulvermenge, bzw. der Verlustmenge, bei der Herstellung von TPT mit der überarbeiteten Pulverappliziereinheit, wurden zunächst die Gesamtpulvermengen, die von der Pulverdosiereinheit bei unterschiedlichen Sperrradrehzahlen gefördert werden, systematisch untersucht. Dazu wurde die Masse des im Zeitraum von 60 s geförderten Pulvers gravimetrisch ermittelt. Zur statistischen Absicherung wurden je Sperrradrehzahl fünf Messungen durchgeführt.

Die Applikation des geförderten Polymerpulvers auf die Rovings innerhalb der Pulverappliziereinheit wurde bei einer Rovinggeschwindigkeit von 1 m/min durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde so die von der Pulverappliziereinheit auf den Roving applizierte Pulvermenge gravimetrisch untersucht. Auch hier wurden zur statistischen Absicherung jeweils fünf Messungen durchgeführt und der Mittelwert der Ergebnisse gebildet. Zur Überprüfung und Bewertung der applizierten Pulvermenge wird das FTV bestimmt. Wie bereits beschrieben entspricht das FTV dem FVG unter der theoretischen Annahme eines vollständig imprägnierten und konsolidierten Verbundes. Der FVG beschreibt dabei das Verhältnis des Faservolumens V_F zu dem Gesamtvolumen des TPT V_{ges} nach Formel 4.1.

$$\frac{V_F}{V_{ges}} = \frac{\frac{m_F}{\rho_F}}{\frac{m_F}{\rho_F} + \frac{m_T}{\rho_T}} \quad 4.1$$

Dabei bilden die jeweiligen Quotienten der Faser­masse m_F bzw. der Thermoplast­masse m_T und der Faser­dichte ρ_F bzw. der Thermoplast­dichte ρ_T die Einzelvolumina der jeweiligen Materialien. Zur Ermittlung der jeweiligen Massen werden diese auf die Länge eines Meters des TPT bezogen.

Da die Masse des applizierten Thermoplastpulvers nicht direkt bestimmt werden kann, wird sie als Differenz der Gesamtmasse des Towpregs m_{ges} nach der Bepulverung und der trockenen Fasermasse bei gleicher Gesamtlänge nach Formel 4.2 ermittelt:

$$m_{\text{T}} = m_{\text{ges}} - m_{\text{F}} \quad 4.2$$

Um das Längengewicht des Rovings zu bestimmen, wurde das Einzelgewicht von jeweils 5 Abschnitten von je einem Meter Länge an drei Stellen einer Rovingspule gravimetrisch ermittelt (vgl. Tabelle 10.2 im Anhang). Daraus ergab sich, abweichend von den Datenblattangaben (2400 tex [117]), ein mittleres Längengewicht von 2,35 g/m (2350 tex). Bei einem angestrebten FTV von 1:1 (50 % FVG) und einer Dichte des verwendeten Thermoplastpulvers von 1,2 g/cm³ [121] sowie einer Dichte der Glasfaser von 2,55 g/cm³ [29] muss nach Formel 4.1 eine Pulverbeladung von 1,10 g/m erreicht werden.

4.4.3 Überprüfung der Homogenität der Bepulverung des TPT

Zur Überprüfung der Homogenität der Pulververteilung des TPT, wurden je Material (GF-Roving und TPT) drei Abschnitte von je 1 m Länge sechsmal halbiert und die daraus resultierenden Zuschnitte nach jeder Halbierung gewogen. Je Halbierung verdoppelt sich also die Anzahl der Einzelmessungen, sodass n Halbierungen 2^n Einzelmessungen ergeben. Die Homogenität der Pulverbeladung bei der Herstellung der TPT soll durch die Bewertung der Standardabweichungen der einzelnen Messreihen in Abhängigkeit der Zuschnittlänge untersucht werden. Eine hohe Homogenität wird durch geringe Schwankungen der Einzelzuschnittmassen und damit kleinen Standardabweichungen bei geringen Zuschnittlängen erreicht.

Da bei den Versuchen zur Ermittlung des Längengewichtes des verwendeten GF-Rovings nur sehr kleine Masseschwankungen festgestellt wurden (siehe Tabelle 10.2 im Anhang), ist bei einer trockenen Rovingstruktur eine hohe Homogenität des Rovings zu erwarten. Diese Homogenität sollte, besonders bei kleinen Zuschnittlängen, zu geringeren Schwankungen der Messergebnisse und damit der Standardabweichung im Vergleich zu den bepulverten Rovings (TPT) führen.

4.5 Ergebnisse zur Bewertung des Bepulverungsprozesses

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Aufschmelzung und Anhaftung der Polymerpartikel, der applizierten Pulvermasse sowie der Homogenität der Bepulverung werden im Folgenden dargestellt.

4.5.1 Thermoplastpulvererwärmung im TPT-Herstellungsprozess

In Abbildung 4.7 (Kapitel 4.4.1), rechts, ist exemplarisch ein aufgenommenes Bild der Wärmebildkamera der Oberfläche eines TPT bei 35 mm IR-Strahlerabstand mit dem entsprechenden Blickwinkel abgebildet. Die Stelle mit der höchsten Temperatur im Erfassungsbereich (HotSpot, hier 304,4 °C) befindet sich erwartungsgemäß in Produktionsrichtung unmittelbar nach dem Ende des IR-Heizstrahlers. Weiterhin lässt sich ein Temperaturabfall von dem wärmsten Bereich in der Mitte zu den Seiten hin erkennen. Dies deutet auf eine Verfälschung der Messung in den Außenbereichen des TPT durch die zusätzliche Führung in einem U-Profil in diesem Bereich hin. Das TPT kühlt im erfassten Bereich innerhalb weniger Zentimeter um etwa 50 °C ab. Somit setzt bereits kurz nach der Heizstrecke die Solidifikation des Polymers ein. In Abbildung 4.8 sind die aus je zehn Einzelmessungen gemittelten Temperaturen der HotSpots aller untersuchter IR-Strahlerabstände dargestellt.

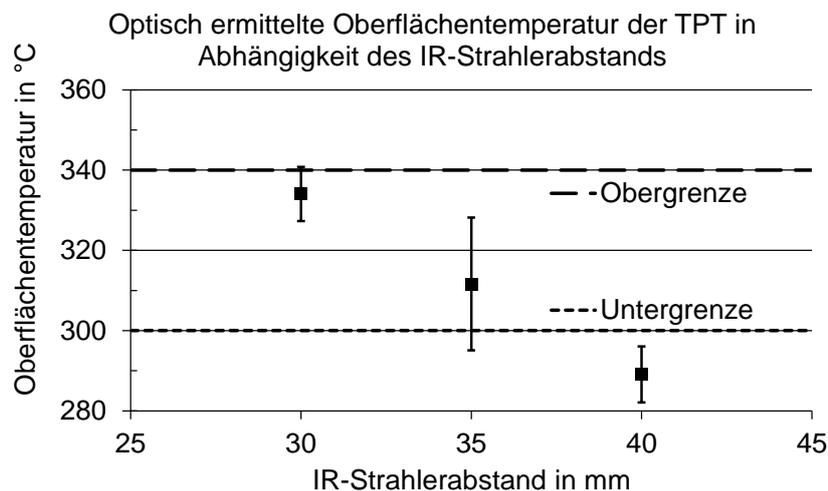


Abbildung 4.8: Die gemessenen Temperaturen des Towpregs bei verschiedenen Abständen zwischen Towpreg und Heizelement

Die gemessenen, mittleren Oberflächentemperaturen des TPT liegen mit 334 °C bei 30 mm IR-Heizstrahlerabstand und 312 °C bei 35 mm, bzw. 289 °C bei 40 mm Abstand, in allen Fällen deutlich oberhalb der Schmelztemperatur des verwendeten

Polymers von 223 °C [121]. Alle ermittelten Temperaturen liegen dabei unterhalb der gesetzten maximalen Grenztemperatur von 340 °C. In Anbetracht einer Standardabweichung von 6,8 °C kann bei einem Abstand von 30 mm jedoch die maximale Temperatur überschritten werden, wodurch dieser Abstand als zu gering einzustufen ist. Bei einem Abstand von 35 mm liegt die Oberflächentemperatur des TPT deutlich unterhalb der maximalen Grenztemperatur und oberhalb der minimalen Grenztemperatur, wobei diese durch die relativ hohe Standardabweichung dieses Messpunktes von 16,5 °C unterschritten werden kann. Die gemessene Oberflächentemperatur von 289 °C ist die niedrigste Temperatur der Messreihe und liegt somit deutlich unterhalb der minimalen Grenztemperatur. Resultierend aus diesen Messreihen wird für den Herstellungsprozess der TPT ein Abstand zwischen dem IR-Heizelement und dem TPT von 35 mm festgelegt. Dieser Wert ist konservativ gewählt und bietet ausreichende Sicherheit, um einer Überhitzung des Polymers vorzubeugen, wobei die Schmelztemperatur auf der Polymeroberfläche deutlich überschritten wird.

Da es sich bei den ermittelten Temperaturen, wie bereits dargestellt, um die Temperaturen an der Oberfläche des TPT, bzw. des Polymers, handelt, ist keine zuverlässige Aussage über die Temperatur im Kern der Thermoplastpartikel möglich. Um die Aufschmelzung und Anhaftung der Partikel dennoch zu bewerten, wurden REM-Aufnahmen eines TPT, bzw. der applizierten Polymerpartikel, mit den Aufnahmen des Polymerpulvers im Ausgangszustand verglichen (siehe Abbildung 4.9).

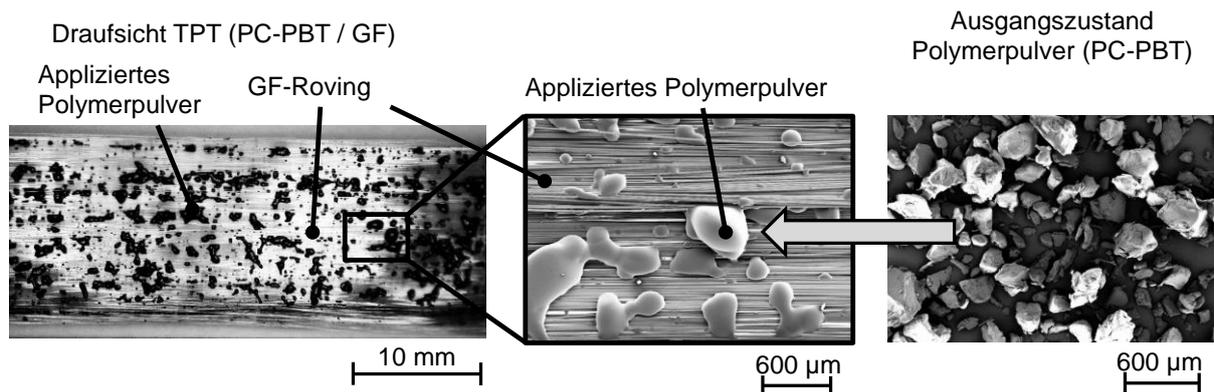


Abbildung 4.9: Vergleichende Darstellung der applizierten Polymerpartikel (links Mikroskop, Mitte REM) und der Polymerpartikel im Ausgangszustand (rechts REM)

Wie in Abbildung 4.9 erkennbar, weisen die applizierten und erwärmten Partikel (Mitte) eine im Vergleich zum Ausgangszustand sphärische Form (Tropfenbildung) auf, was zusammen mit den beobachtbaren Zusammenschlüssen benachbarter Partikel, wie es in Kapitel 2.3.3 im Zusammenhang der interpartikulären Sinterung dargestellt wurde, auf ein vollständiges Aufschmelzen schließen lässt. Dabei werden jedoch keine großen, übergreifenden Agglomerationen beobachtet, das applizierte Polymerpulver weist auch nach der Aufschmelzung eine weitgehend homogene Verteilung auf. Weiterhin ist in den Randbereichen der Partikel eine Benetzung der Einzelfilamente erkennbar, wodurch die Ergebnisse der thermografischen Aufnahmen (einer ausreichenden Erwärmung der Polymerpartikel) bestätigt werden.

4.5.2 Applizierte Pulvermenge und Prozessstabilität

Die Ergebnisse der Untersuchung der von der Pulverdosiereinheit bei unterschiedlichen Sperraddrehzahlen geförderten Pulvermassen (Mittelwert und Standardabweichung) sind in Abbildung 4.10 (oben) abgebildet.

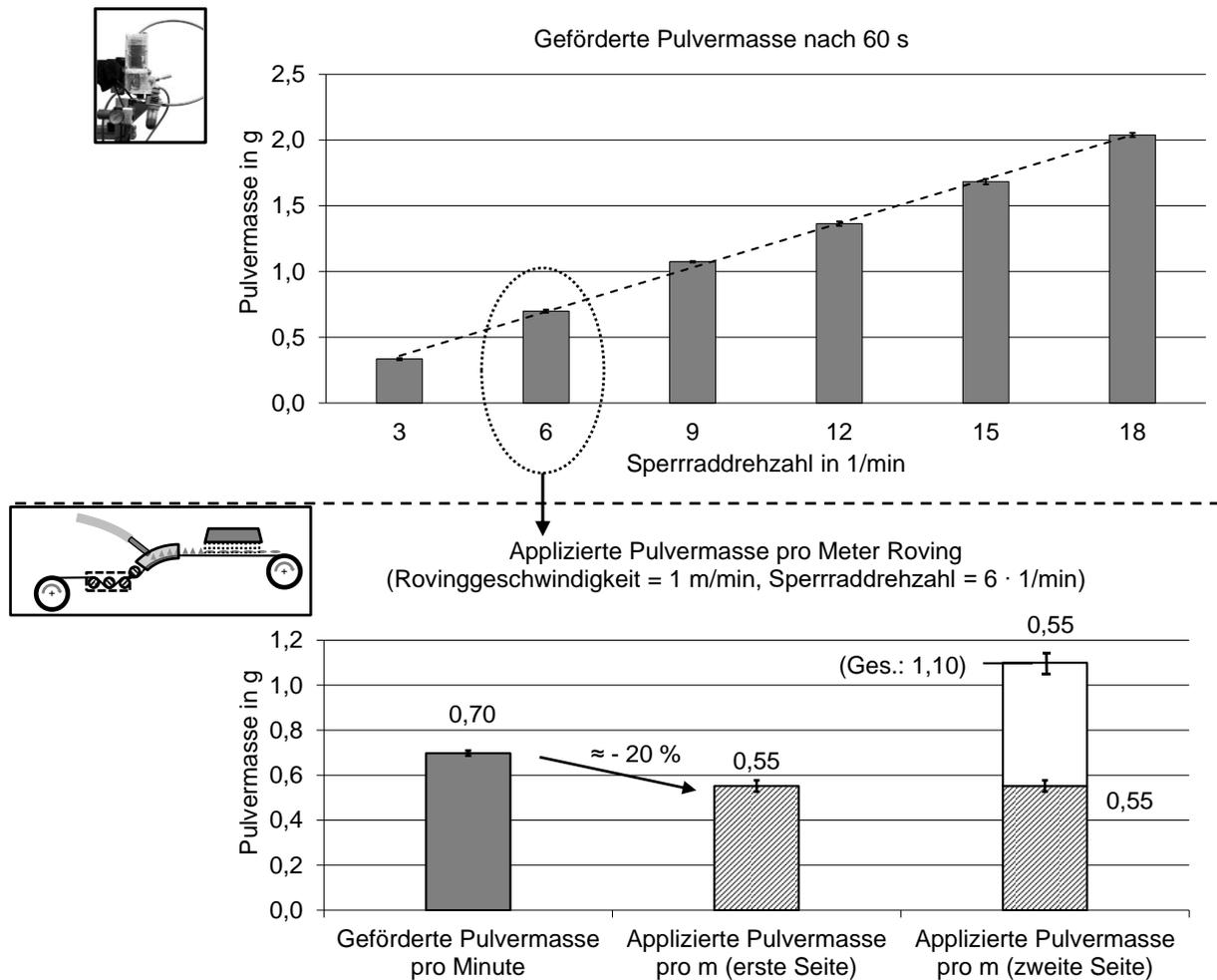


Abbildung 4.10: Durch die Pulverdosiereinheit geförderte Pulvermassen, oben, und auf den Roving applizierte Pulvermassen (Bepulverung der ersten und zweiten Rovingseite), unten

In Abbildung 4.10 (oben) ist zu erkennen, dass die geförderte Pulvermasse linear von der Drehzahl des Sperrades abhängig ist und eine hohe Wiederholgenauigkeit der geförderten Pulvermassen erreicht wird. Der untersuchte Parameterbereich ermöglicht somit eine präzise und konstante Pulverförderung, ohne dass nichtlineare, drehzahlabhängige Faktoren, die den Pulverdurchsatz beeinflussen, erkennbar sind. Dies ermöglicht seitens der Pulverdosiereinheit einen robusten Prozess, wobei ein konstanter Pulverstrom durch die Drehzahl des Sperrades präzise eingestellt werden kann.

Zur Erfüllung der Forderung nach einer beidseitigen Bepulverung wurde ein doppelter Prozesslauf (Prozessgeschwindigkeit 1 m/min) umgesetzt. Bei einer Sperrradrehzahl von 6 · 1/min wird innerhalb von 60 s eine Gesamtmenge von 0,70 g gefördert. Mit

diesen Einstellungen konnte eine Masse von ca. 0,55 g/m Thermoplastpulver auf jede Seite des Rovings (je Bepulverungsprozess) appliziert werden. Dies entspricht einem durchschnittlichen Pulvermasseverlust von ca. 20 %. Mit einer Gesamtpulvermenge von 1,10 g/m auf dem Roving wird ein theoretischer FVG von 50 %, bei Annahme einer porenfreien Imprägnierung, erreicht.

Zur Überprüfung der Prozessstabilität wurde dieser theoretische FVG bei der Herstellung der Versuchsmaterialien für die nachfolgenden Untersuchungen strichprobenhaft untersucht. In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse der Stichproben aus 5 verschiedenen TPT-Spulen (Herstellungsprozessen) dargestellt, wobei jeweils die Mittelwerte aus 10 Messungen aufgetragen sind.

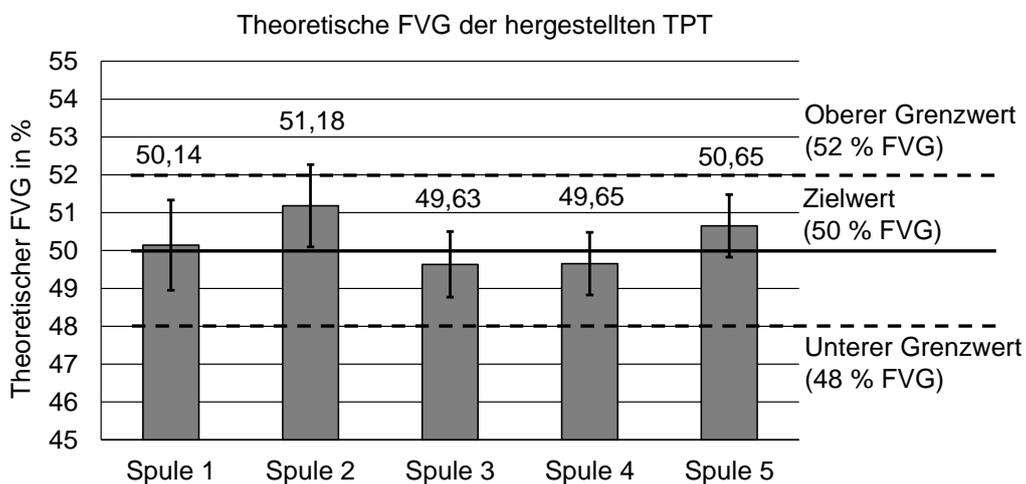


Abbildung 4.11: Theoretischer FVG der TPT aus 5 Stichproben

Die Zielvorgabe eines theoretischen FVG (FTV 1:1) von 50 ± 2 % konnte bei allen Stichproben erfüllt werden, lediglich die Messung von Spule 2 übersteigt mit ihrer Standardabweichung von 1,09 Prozentpunkten (Pp) die obere Grenze.

4.5.3 Homogenität des TPT

In Abbildung 4.12 sind die aus den drei Messreihen gemittelten Standardabweichungen der Zuschnittmassen des GF-Rovings sowie des TPT über der Zuschnittlänge aufgetragen.

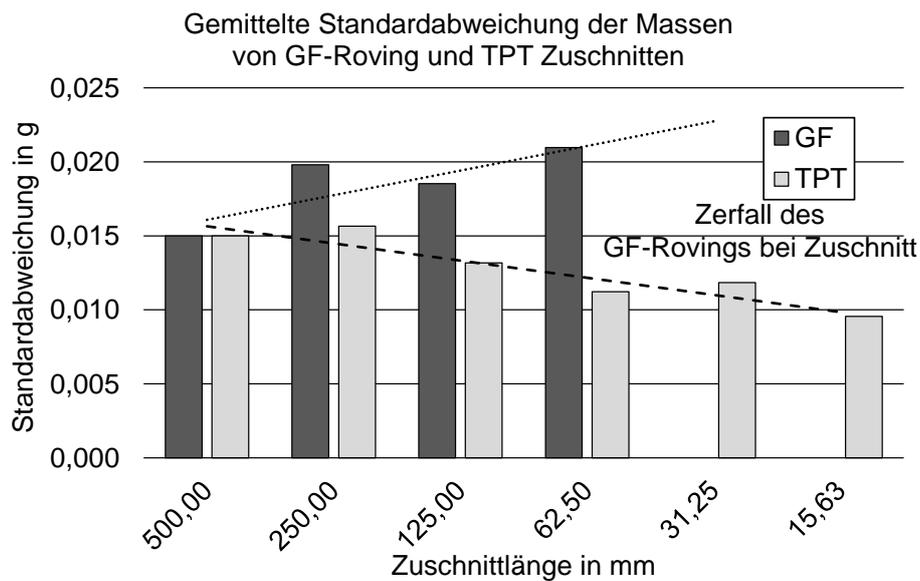


Abbildung 4.12: Standardabweichungen der Zuschnittmassen von GF-Roving und TPT bei 1 – 6-facher Unterteilung (Halbierung) der Zuschnitte

Entgegen der in der Versuchsplanung vorangestellten Vermutung, zeigen die Ergebnisse in Abbildung 4.12 im Falle des GF-Rovings keine abfallende Tendenz der Standardabweichungen bei sinkender Zuschnittlänge. Dies kann auf einen hohen zufälligen Fehler bei dem händischen Probenzuschnitt hinweisen. Dabei lässt sich die geringe Stabilität des assemblierten GF-Rovings und die bereits beschriebene Tendenz zum Zerfall in die Einzelstränge und Filamente beobachten, worauf die schlechten Handhabungseigenschaften während des Zuschnitts zurückzuführen sind. So waren aufgrund des starken Zerfalls des GF-Rovings in dessen Einzelstränge weiterhin keine sinnvollen Massenbestimmungen der Zuschnittlängen 31,25 mm und 15,63 mm möglich. Die Standardabweichungen der TPT-Messreihen weisen hingegen ein, im Vergleich zu dem des GF-Rovings, allgemein niedrigeres Niveau auf. Auch sinken die Standardabweichungen hier mit abnehmender Zuschnittlänge, was auf einen kleineren zufälligen Fehler bei dem Probenzuschnitt und damit deutlich verbesserte Handhabungseigenschaften der TPT hinweist. Zur Verdeutlichung dieser Beobachtungen sind in Abbildung 4.13 beispielhaft einzelne Zuschnitte des TPT und des GF-Rovings nach 2 – 6-facher Unterteilung dargestellt.

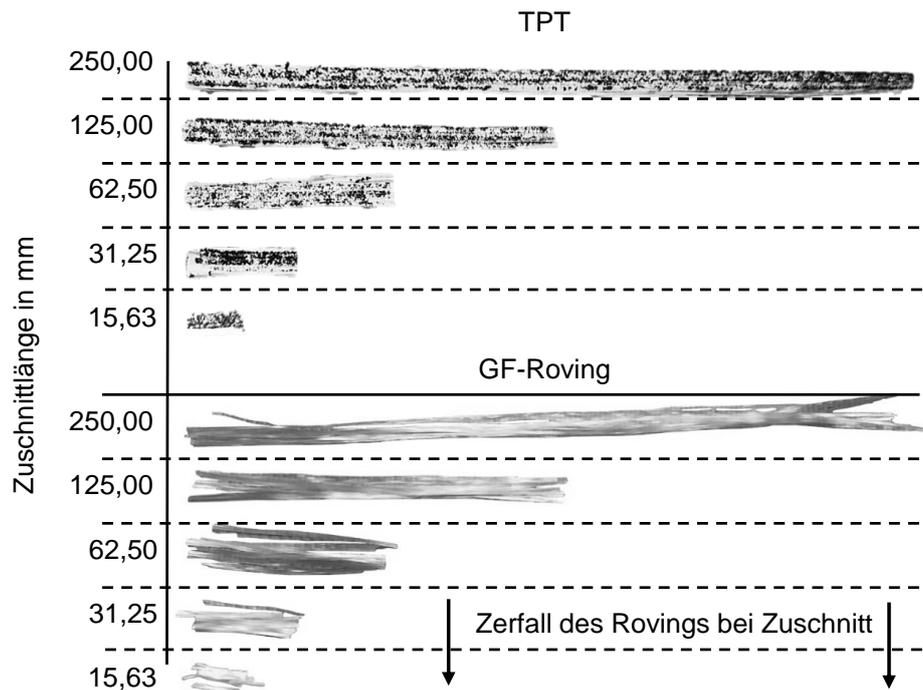


Abbildung 4.13: Beispielhafte Darstellung der Zuschnitte (TPT oben, GF-Roving unten) bei 2 – 6-facher Unterteilung (Halbierung)

In Abbildung 4.13 ist die Instabilität des assemblierten GF-Rovings deutlich erkennbar. Schon bei einer Zuschnittlänge von 250 mm ist der Zerfall in Einzelstränge stark ausgeprägt. Die Zuschnitte des TPT weisen hingegen eine hohe Stabilisierung und damit gute Handhabbarkeit auf, was auf die beidseitige Bepulverung zurückzuführen ist.

Um die Homogenität der Bepulverung des TPT quantitativ zu bewerten, wurden in einem weiteren Schritt die Massen der Zuschnitte der TPT auf die Zuschnittlänge bezogen und somit das Längengewicht der Zuschnitte in Abhängigkeit der Zuschnittlänge berechnet. Die ermittelten und in Abbildung 4.14 dargestellten Standardabweichungen sind somit ebenso auf die Zuschnittlänge bezogen, wodurch sie eine mit dem Variationskoeffizienten vergleichbare Aussagekraft besitzen (Abweichung bezogen auf die Länge der Zuschnitte). Aufgrund der großen Fehler beim Zuschnitt der trockenen Rovings, werden diese in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Für die Masse der trockenen GF-Rovings wird vereinfachend ein konstantes Längengewicht vorausgesetzt, sodass die Standardabweichungen auf die Bepulverungsmenge zurückgeführt werden.

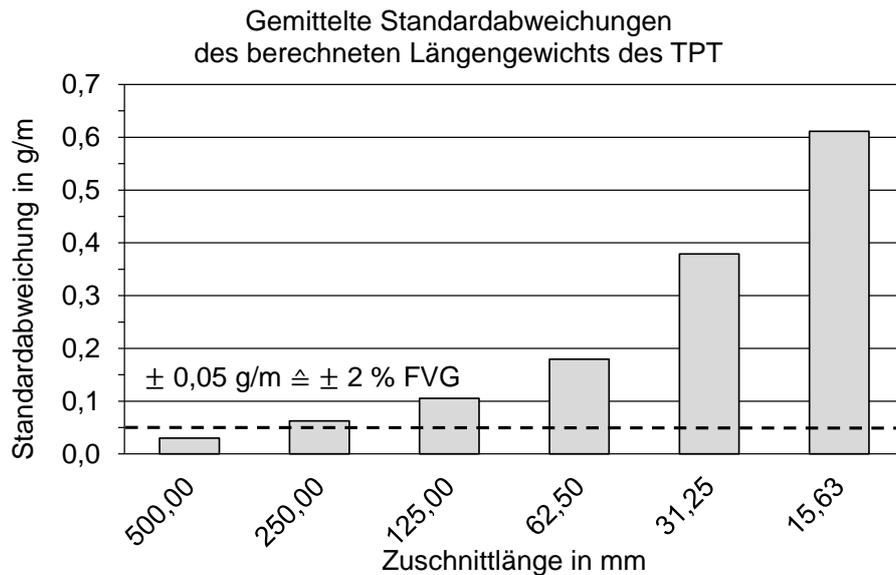


Abbildung 4.14: Standardabweichungen der ermittelten Längengewichte von GF-Roving und TPT bei 1 – 6-facher Unterteilung (Halbierung) der Zuschnitte

Der in Abbildung 4.14 dargestellte Grenzwert von 0,05 g/m entspricht einer Abweichung von ca. 2 % des theoretischen FVG. Es kann somit eine homogene Pulververteilung bis zu einer Zuschnittlänge von ca. 250 mm angenommen werden, ohne dass die Schwankung der applizierten Pulvermasse diesen Grenzwert überschreitet. Weiterhin kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der zufällige Fehler beim Probenzuschnitt auch bei den TPT einen erheblichen Anteil an der Standardabweichung trägt und der Grenzwert erst bei geringeren Zuschnittlängen überschritten wird. Eine geringere Schwankung der Bepulverungsmenge und damit eine höhere Homogenität, auch bei kleineren Längen des TPT, sind demnach zu erwarten, wodurch der ermittelte Grenzwert (250 mm) als konservative Näherung eingestuft werden kann.

5 Untersuchung des Imprägnierfortschritts bei der TPT-Ablage (Preforming) im Tapelegeprozess

In diesem Kapitel wird der zweite Prozessschritt der Prozesskette, das Tapelegen der TPT mit einer Labortapelegeanlage zu vorimprägnierten Preforms, untersucht. Zunächst erfolgt eine Übersicht der verwendeten Anlagentechnologien (Versuchsaufbau), anschließend werden die statistische Versuchsplanung des Tapelegeprozesses und die Methoden zur Bewertung des Einflusses der Kernparameter auf den Imprägnierfortschritt erläutert. Vor dem Hintergrund des generellen Strebens nach hohen Ablegeraten im Tapelegeprozess soll dabei vorrangig eine Makroimprägnierung der Faserstruktur erreicht werden, die verglichen mit der Mikroimprägnierung ein deutlich kürzeres Prozesszeitfenster benötigt. Die vollständige Mikroimprägnierung der Faserstruktur wird im letzten Prozessschritt, dem Pressprozess (Kapitel 6), erwartet. Nach der statistischen Auswertung und Einordnung der Ergebnisse wird in einer weiteren, ergänzenden Versuchsreihe (abweichend von dem Ziel einer Makroimprägnierung) die Möglichkeit der Mikroimprägnierung im Tapelegeprozess untersucht und bewertet.

5.1 Versuchsaufbau: Labortapelegeanlage

Zur experimentellen Ablage der TPT zu vorimprägnierten Preforms wurde eine an der *IVW GmbH* entwickelte Labortapelegeanlage eingesetzt (siehe Abbildung 5.1). Diese Anlage wurde zum Ablegen von vollkonsolidierten Thermoplast-Tapes konzipiert, sie eignet sich jedoch auch zur Ablage von Bindertapes im DFP [16]. Es können Preforms oder Bauteile mit einer Faserorientierung von 0° und 90° je Ablagevorgang erzeugt werden, die Variation der Faserorientierung kann durch Verdrehen der Werkzeugplatte eingestellt werden.

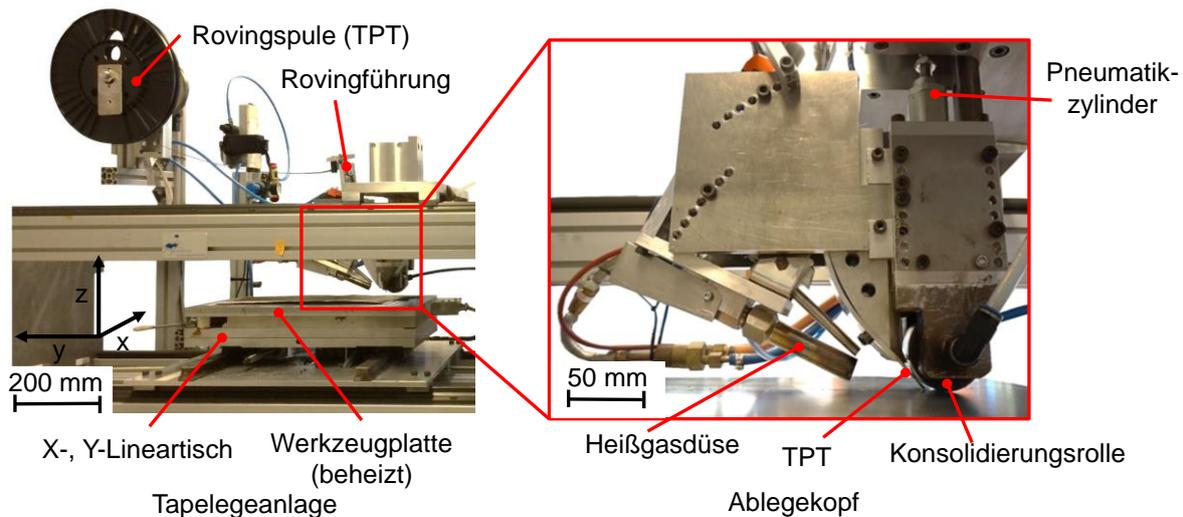


Abbildung 5.1: Labortapelegeanlage (links) und Ablegekopf im Detail (rechts) an der *IVW GmbH*

Der Prozessablauf des Ablegens von TPT ist dabei an den des DFP angelehnt (vgl. Kapitel 2.1.2). Es werden einzelne Bahnen des TPT unter Druck- und Wärmeeintrag auf der beheizten Werkzeugplatte (bzw. bereits abgelegte Bahnen) platziert, um eine mehrlagige Preform herzustellen. Die Grundplatte (Werkzeugplatte) ist auf einem X-, Y-Lineartisch montiert und damit sowohl orthogonal der Ablegerichtung (X-Achse) als auch parallel der Ablegerichtung (Y-Achse) verfahrbar. In X-Richtung lassen sich so die Abstände zwischen den Bahnen und in y-Richtung die Länge der Ablage einstellen. Auch der benötigte Vorschub beim Ablegen wird durch eine Verschiebung der Werkzeugplatte in Y-Richtung mit definierter Geschwindigkeit erzeugt. Der eigentliche Ablegeprozess startet mit der Verschiebung der Werkzeugplatte in Vorschubrichtung. Der detaillierte Aufbau des ortsfesten Ablegekopfes ist in Abbildung 5.1 (rechts) dargestellt. Das TPT wird zunächst von einer Materialspule durch eine Führung zur Konsolidierungsrolle gefördert, wo die thermoplastische Matrix des TPT durch eine Heißgasdüse aufgeschmolzen wird. In der an der *IVW GmbH* entwickelten Heißgasdüse wird ein Gasmisch, bestehend aus Wasserstoff und Sauerstoff in einem Volumenverhältnis von 9:1 [26, 46], entzündet, die heißen Verbrennungsgase strömen aus der Düse und treffen unmittelbar vor der Ablage auf die Oberfläche des TPT und der oberen Lage der bestehenden Preform. Die Berechnung und Messung der Heißgastemperatur wurde bereits untersucht und beschrieben [26, 28, 34, 46], da die direkte Messung der Temperatur jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden ist,

wird die Regelgröße und der Faktor zur statistischen Versuchsplanung für diese Arbeit auf die Variation und Regelung des Heißgasvolumenstroms in Normliter pro Minute (NI/min) beschränkt.

Die computerunterstützte Regelung des Labortapelegers erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung, wobei u. a. folgende Parameter eingestellt und variiert werden können:

- Der Heißgasvolumenstrom H_v der Heißgasdüse und dessen Zusammensetzung.
- Die Vorschubgeschwindigkeit der Werkzeugplatte v_w .
- Der Systemdruck des Pneumatikzylinders der Konsolidierungsrolle p_k : Der gesamte Ablegekopf ist in Z-Richtung verschiebbar und kann mittels Pneumatikzylinder und geregelter Luftdruck (Systemdruck) auf die Grundplatte abgesenkt werden. Somit wird eine systemdruckabhängige Kraft durch die temperierte Konsolidierungsrolle auf das abzulegende TPT, bzw. die Preform, ausgeübt. Durch die auf das erwärmte TPT aufgebrachte Kraft der Kompaktierungsrolle soll sich die schmelzflüssige thermoplastische Matrix des TPT mit der bereits abgelegten und durch das Heißgas erneut erwärmten oberen Lage der Preform verbinden und die Faserstruktur vorimprägnieren.
- Die Kühlwassertemperatur T_k der durchströmten Konsolidierungsrolle: Die Temperierung der Konsolidierungsrolle (Innenkühlung mit Wasser) soll ein Anhaften der thermoplastischen Matrix an der Rolle unterbinden und die Abkühlung des abgelegten TPT bei der Vorkonsolidierung beschleunigen.
- Die Temperatur T_w der Werkzeugplatte: Durch die Beheizung der Werkzeugplatte und die der Preform so zugeführten Wärme, soll die Anhaftung und die Vorimprägnierung der abgelegten Lagen erleichtert werden.

Die Kraft F_K , die die Konsolidierungsrolle auf die Werkzeugplatte ausübt, lässt sich nach Formel 5.1 berechnen:

$$F_K = 48,287 \left(\frac{\text{N}}{\text{bar}} \right) \cdot p_k + 4,726 \text{ N} \quad 5.1$$

Die Kraft F_k wurde mit Hilfe einer Feinwaage für verschiedene Systemdrücke p_k ermittelt, diese der Berechnung zugrundeliegende Messreihe ist im Anhang in Tabelle 10.3 und Abbildung 10.2 zu finden.

5.2 Versuchsplanung und Methode zur Untersuchung des Tapelegeprozesses

Ziel der Hauptuntersuchung war es, die Wirkung und Signifikanz der Faktorstufen der Verarbeitungsparameter (Kernparameter) des Tapelegeprozesses auf eine Minimierung des Porenvolumengehaltes (PVG), mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung der Ergebnisse, systematisch zu identifizieren und zu bewerten. Eine Minimierung des PVG im Preformprozess (Tapelegen) wird als Imprägnierfortschritt in diesem Prozessschritt eingestuft, wobei in den Hauptuntersuchungen des Tapelegeprozesses eine Makroimprägnierung der Faserstruktur erreicht werden soll. Zur Bewertung der Auswirkungen der jeweiligen Faktorstufenkombinationen auf den Imprägnierfortschritt wurde somit der PVG als Zielgröße festgelegt und ermittelt. Dazu wurden Schliffbilder der Proben mit Hilfe eines Lichtmikroskops erstellt und mittels Grauwertanalyse untersucht, wobei vereinfacht angenommen wurde, dass der gemittelte prozentuale Porenflächenanteil als PVG innerhalb der gesamten Probe angesehen werden kann.

In einer erweiterten Versuchsreihe sollen anschließend, abweichend von der Zielsetzung der Hauptuntersuchung, die Möglichkeit und Grenzen der Mikroimprägnierung innerhalb des Tapelegeprozesses untersucht werden. Dabei werden, ausgehend von den Parameterstufen mit minimalem PVG der Hauptversuchsreihe, Ablageversuche bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen durchgeführt und der Imprägnierfortschritt in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur bewertet. Diese Untersuchung stellt eine Ergänzung der Hauptuntersuchung (statistische Parameterstudie) dar, die Weiterverarbeitung der Preforms im Pressprozess (Kapitel 6) erfolgt auf Basis der in der Hauptuntersuchung hergestellten Preforms.

5.2.1 Statistische Versuchsplanung des Tapelegeprozesses

Durch die systematische Parameterstudie zur Bewertung des Imprägnierfortschritts innerhalb des Prozessschritts des Tapelegens (Preforming) sollen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung die Effekte der Hauptverarbeitungsparameter des

Prozesses auf die Verringerung des PVG, der Zielgröße der Untersuchungen, nachgewiesen werden. Ziel dieser Untersuchungen ist dabei keine absolute Prozessoptimierung, sondern der Aufbau eines Prozessverständnisses. Ausgangsmaterial dieser Untersuchungen ist das, nach der in Kapitel 4 vorgestellten Methode, hergestellte Halbzeug (Beidseitig bepulvertes TPT mit einem FTV von 1:1). Zur Umsetzung der statistischen Versuchsplanung wird ein vollständig faktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren auf jeweils zwei Stufen gewählt. Je größer der Unterschied zwischen den gewählten Parameterstufen ist, desto deutlicher ist auch der aus den Ergebnissen abgeleitete Effekt, wenn kein Extremwert (Prozessgrenze) übergangen wird. Aus Vorversuchen wurden Faktorstufen ermittelt, die unter Berücksichtigung von material- und prozesseitigen Randbedingungen, eindeutige und statistisch auswertbare Ergebnisse erzeugten.

In Tabelle 5.1 sind die Einstellungen der Parameter, die für die statistische Versuchsplanung und Untersuchung des Tapelegeprozesses verwendet werden, als Übersicht aufgeführt.

Tabelle 5.1: Übersicht der Prozessparameter des Tapelegeprozesses (Faktoren für die statistische Versuchsplanung und konstante Prozessparameter)

	Parameter	Niedrige Stufe (-)	Hohe Stufe (+)
Faktoren (variable Prozessparameter)	Heißgasvolumenstrom H_v	3 NI/min	5 NI/min
	Vorschubgeschwindigkeit v_w	3 m/min	6 m/min
	Systemdruck Konsolidierungsrolle p_k	3 bar	4 bar
Konstante Prozessparameter	Temperatur Konsolidierungsrolle T_k	40 °C	
	Temperatur Werkzeugplatte T_w	60 °C	
	Faserorientierung	0°	
	Lagenanzahl	6	
	Bahnabstand	7 mm	

Um den Einfluss der Hauptprozessparameter des Tapelegeprozesses (Heißgasvolumenstrom H_v , Vorschubgeschwindigkeit v_w und Systemdruck Konsolidierungsrolle p_k) herauszustellen, werden die Parameter Kühlwassertemperatur Konsolidierungsrolle T_k (40 °C) und Temperatur Werkzeugplatte T_w (60 °C) konstant gehalten. Die gewählte T_w von 60 °C

liegt unterhalb der Formbeständigkeitstemperatur von 85 °C und der durch den Hersteller empfohlenen Werkzeugtemperatur von 70 °C (für eine Verarbeitung im Spritzgussprozess) [121].

- Als Einstellungen für die Vorschubgeschwindigkeit v_w haben sich in Vorversuchen 3 m/min, bzw. 6 m/min als Faktorstufen zur Ablage mit dem Labortapeleger bewährt. Die Einstellungen für den Heißgasvolumenstrom H_v und den Systemdruck der Konsolidierungsrolle p_k wurden ausgehend von diesen Einstellungen der Vorschubgeschwindigkeit ausgewählt.
- Um die niedrigere Einstellung des H_v zu bestimmen, wurden bei einer v_w von 6 m/min Preforms bei 2,5 NI/min und 3 NI/min hergestellt und verglichen. Zur Bestimmung der höheren Einstellung, wurden analog dazu bei einer v_w von 3 m/min die Preforms bei 5 NI/min und 6 NI/min hergestellt. Diese Kombinationen zwischen Vorschubgeschwindigkeiten und Heißgasvolumenstrom werden als kritisch angenommen, da so die zeitlich kürzeste Wärmeübertragung mit dem geringeren Wärmestrom bzw. die zeitlich längste Wärmeübertragung mit dem höheren Wärmestrom erreicht wird. Die Einstellung des Systemdrucks der Konsolidierungsrolle p_k wurde für diese Vorversuchsreihe konstant auf 3 bar eingestellt. Resultierend weist die Preform der Ablage bei einem H_v von 2,5 NI/min eine unzureichende Anhaftung der Rovings und Einzelfilamente auf, wodurch keine auswertbaren Proben herstellbar sind. Die Fasern der Preform bei einem H_v von 3 NI/min zeigen hingegen ein deutlich verbessertes Anhaftungsverhalten und die so hergestellten Preforms sind zur Probenherstellung geeignet. Folglich wird als untere Stufe des H_v 3 NI/min festgelegt. Die Preforms der Ablagen bei einem H_v von 5 NI/min und 6 NI/min weisen keine erkennbaren Unterschiede auf, beide verfügen über eine stabile, kompakte Struktur. Um jedoch keine thermische Überlastung und damit einhergehende Degradation der polymeren Matrix zu riskieren, wird für die obere Stufe des H_v 5 NI/min festgelegt.
- Für die Wahl der Parametereinstellungen des Systemdrucks der Konsolidierungsrolle p_k fand ein Vergleich der Preforms, die mit Systemdrücken von 3, 4 und 6 bar hergestellt wurden, statt. Der H_v wird dabei konstant auf 5 NI/min und die v_w auf 6 m/min eingestellt. Der optische Vergleich der Proben

in Abbildung 5.2 (hergestellt mit einem p_k von 4 bar und 6 bar) zeigt, dass die Fasern mit zunehmendem Anpressdruck verstärkt ondulieren.

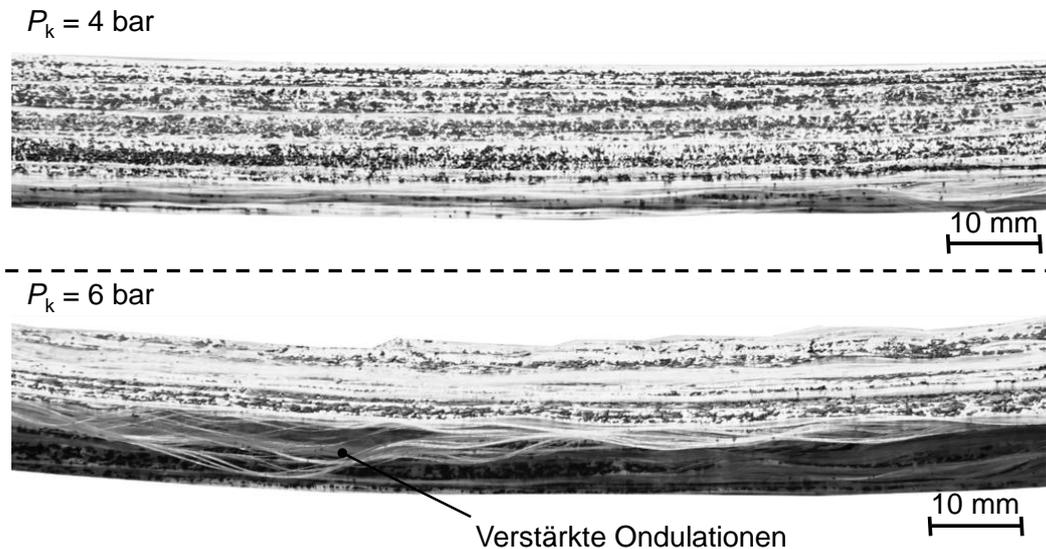


Abbildung 5.2: Abgelegte TPT-Preforms bei $p_k = 4 \text{ bar}$ (oben) und $p_k = 6 \text{ bar}$ (unten). Bei 4 bar (Abbildung 5.2, oben) sind nur leichte Ondulationen der Fasern festzustellen, eine deutlich stärkere Ondulation tritt bei der Ablage mit 6 bar Systemdruck auf (Abbildung 5.2, unten). Eine Erklärung für die verstärkte Ondulation bei höheren Anpressdrücken könnte ein lagerreibungsbedingtes Schleppmoment der Kompaktierungsrolle sein, welches mit einer Erhöhung des Anpressdrucks zunimmt. Da die Kompaktierungsrolle über keinen eigenen Antrieb verfügt, kann es so zu einer, von der Walze auf die Preform bzw. das TPT, ausgeübten Schubkraft kommen, wodurch die Fasern ondulieren. Um die Ondulation und damit diese Fehlerquelle möglichst gering zu halten, werden für die Parametereinstellungen für p_k von 3 bar (untere Stufe) und 4 bar (obere Stufe) verwendet.

Die drei Faktoren H_v , v_w und p_k , werden nach dem in Kapitel 2.5 vorgestellten vollfaktoriellen 2^3 -Versuchsplan mit 8 Faktorstufenkombinationen kombiniert. Die Preforms, die bei der Ablage hergestellt werden, bestehen aus sechs Lagen (Einzelschichten) mit je vier parallelen Bahnen des TPT. Zwischen zwei Lagen wird jeweils ein Bahnversatz einer halben Bahnbreite (3,5 mm) vorgesehen, um eine hohe Homogenität der Faserverteilung zu erreichen. Die Länge der abgelegten TPT-Bahnen beträgt 250 mm. Weiterhin werden ausschließlich Bahnen in 0° -Faserorientierung abgelegt. Dies soll die lichtmikroskopische Auswertung der Proben hinsichtlich ihres

PVG vereinfachen, wobei Längsschliffe der Fasern vermieden werden können. Der vollständige Versuchsplan ist in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Volfaktorieller 2^3 -Versuchsplan für den Tapelegeprozess mit den festgelegten Parametereinstellungen

Syst. Nr.	H_v in NI/min		v_w in m/min		p_k in bar		Ergebnis (PVG in %)
TL1	3	-	3	-	3	-	y1
TL2	5	+	3	-	3	-	y2
TL3	3	-	6	+	3	-	y3
TL4	5	+	6	+	3	-	y4
TL5	3	-	3	-	4	+	y5
TL6	5	+	3	-	4	+	y6
TL7	3	-	6	+	4	+	y7
TL8	5	+	6	+	4	+	y8
TL0	4		4,5		4		y9

Je Faktorstufenkombination wird eine Preform hergestellt und hinsichtlich ihres PVG ausgewertet.

Ergänzend zu den in Tabelle 5.2 dargestellten Faktorstufenkombinationen wird eine weitere Faktorstufenkombination mit der Bezeichnung TL0 definiert und untersucht. Diese Faktorstufenkombination stellt sich als Mittelwert der entsprechenden Faktoren der Faktorstufenkombinationen, welche zu dem höchsten und niedrigsten Ergebnis (PVG) führen, dar (Festlegung der Faktorstufenkombinationen nach der Auswertung in Kapitel 5.3, Werte wurde in der Tabelle 5.1 bereits übernommen). Durch einen Vergleich des Gesamtmittelwerts aller Ergebnisse und dem Ergebnis der gemittelten Faktorstufenkombination TL0, kann abgeschätzt werden, ob lineare Zusammenhänge innerhalb des gewählten Parameterbereichs bestehen, oder eventuelle Extremwerte übergangen wurden.

5.2.2 Schlibbildanalyse und -auswertung der Tapelegeproben

Zur lichtmikroskopischen Auswertung werden je hergestellte Preform drei Proben entnommen und zur Schlibbildanalyse vorbereitet. Aufgrund der starken Porosität der Preforms und der damit verbundenen geringen Stabilität (Fixierung) der Einzelfilamente, werden die Proben unter Vakuum in ein Harzsystem des Herstellers *HEXION* (Infusionsharz MGS RIM 935, Härter RIMH 937) eingebettet, sodass die

vorhandenen Poren (Lufteinschlüsse) mit dem Harzsystem gefüllt und somit die Proben, bzw. Fasern, stabilisiert werden. Zur Erhöhung des Kontrastes zwischen den Fasern und der Matrix der Preform-Proben und des Einbettharzsystems, wurde das Einbettharz grün eingefärbt, was die nachfolgende optische Phasenanalyse vereinfachen soll. Die Phasen des Einbettharzes wurden hierbei als Quasi-Poren behandelt (Bereiche des Einbettharzes waren vormals Porenräume), wodurch der Volumenanteil des Einbettharzes als PVG der Preform für die statistische Auswertung herangezogen werden kann. Das beispielhafte Vorgehen zur Probenentnahme und Bestimmung des PVG mittels Grauwertanalyse ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

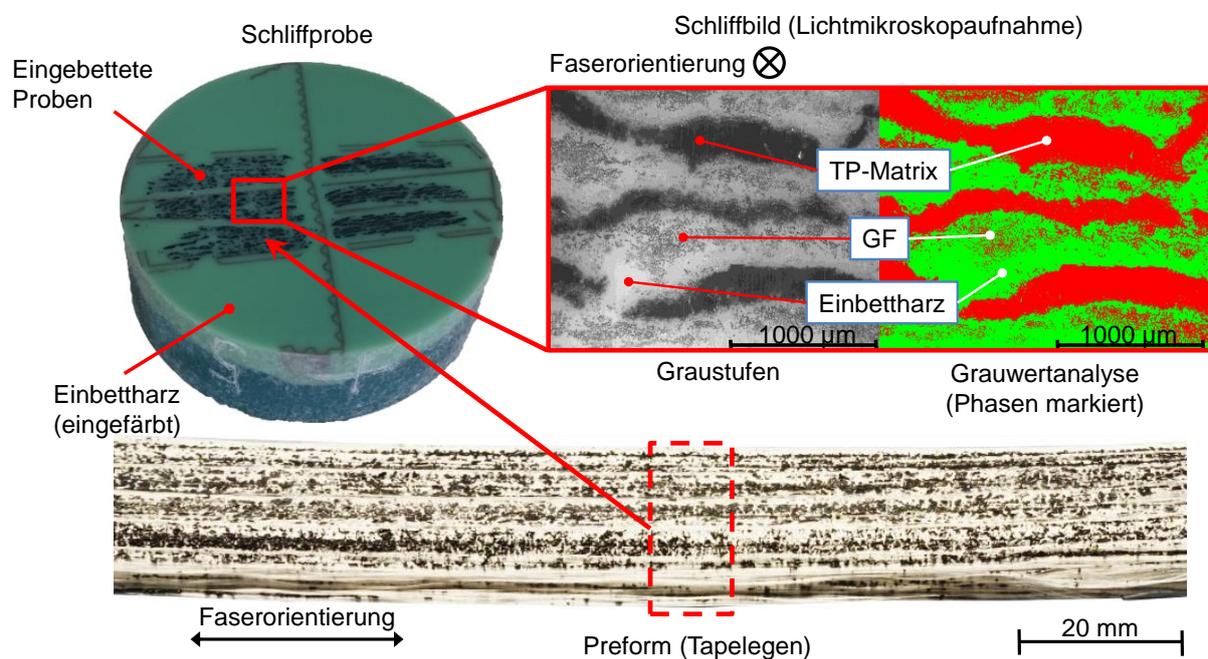


Abbildung 5.3: Beispielhafte Schliifprobenentnahme einer Preform (unten) zur Schliifbilderstellung und Ermittlung des PVG mittels Grauwertanalyse (oben)

Zur Bestimmung des durchschnittlichen PVG einer Preform wurden die drei eingebetteten Proben an jeweils drei Stellen des Querschnitts analysiert (Mittelwert aus 9 Messungen je Faktorstufenkombination). Dadurch verteilen sich die Ergebnisse sowohl in der Längen- als auch in der Breitenrichtung über die Preform. Die Schliifbilder wurden mittels Lichtmikroskop (Lichtmikroskop der Firma *Leitz*) aufgenommen und mit Hilfe der Computersoftware *analySIS* phasenanalysiert (vgl. Abbildung 5.3, oben). Der Grenzwert für den Übergang zwischen den Phasen kann justiert werden, sodass in diesem Beispiel die rot markierten Bereiche den

Fasern mit Polymermatrix entsprechen und die grüne Phase das Einbettharz markiert. Das Programm berechnet den Flächenanteil der jeweiligen Phase, wodurch der Porenvolumengehalt (PVG) in der Preform anhand des Anteils des Einbettharzes bestimmt werden kann.

5.3 Ergebnisse und Auswertung des Tapelegeprozesses

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Schliffbildanalyse vorgestellt und hinsichtlich des Imprägnierfortschritts bewertet. Anschließend findet eine statistische Auswertung des Einflusses der Kernprozessparameter auf den Imprägnierfortschritt im Tapelegeprozess statt.

5.3.1 Ergebnisse der Schliffbildanalyse der Tapelegeproben

In Abbildung 5.4 sind alle Ergebnisse der Phasenanalyse der Tapelegeproben dargestellt (sortiert nach der Höhe des ermittelten PVG).

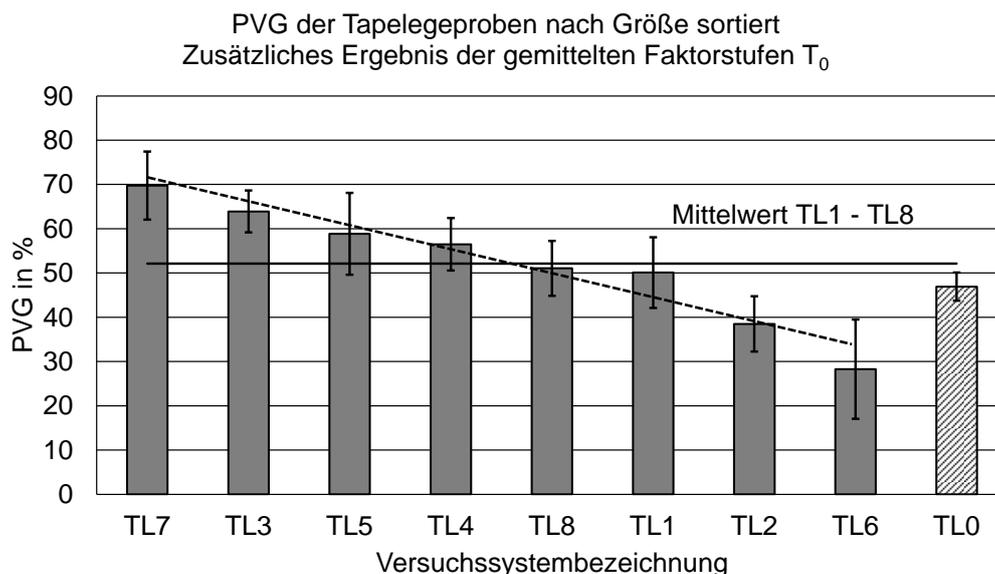


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Phasenanalyse der Schliffproben des Tapelegeprozesses sortiert von höchstem zu kleinstem PVG, ergänzt um TL0

Wie in Abbildung 5.4 ersichtlich, liegen die gemittelten Ergebnisse der Phasenanalyse des PVG annähernd normalverteilt vor, wodurch eine gute Aussagefähigkeit der späteren statistischen Auswertung zu erwarten ist. Entsprechend der Definition werden die Faktoren des Versuchs TL0 als Mittelwert der Versuche TL7 und TL6 gebildet. Diese ergeben sich somit zu einem H_v von 4 NI/min, einer v_w von 4,5 m/min

sowie einem p_k von 4 bar. Das Ergebnis des Versuchs TL0 liegt sehr nahe an dem Gesamtmittelwert der Versuche TL1 bis TL8, wodurch ein lineares Verhalten innerhalb des gewählten Parameterbereichs angenommen werden kann.

Abbildung 5.5 zeigt beispielhaft Fotografien und Schliffbilder der Ergebnisse mit dem höchsten PVG von ca. 70 % (TL7) bis zu dem geringsten PVG von ca. 28 % (TL6).

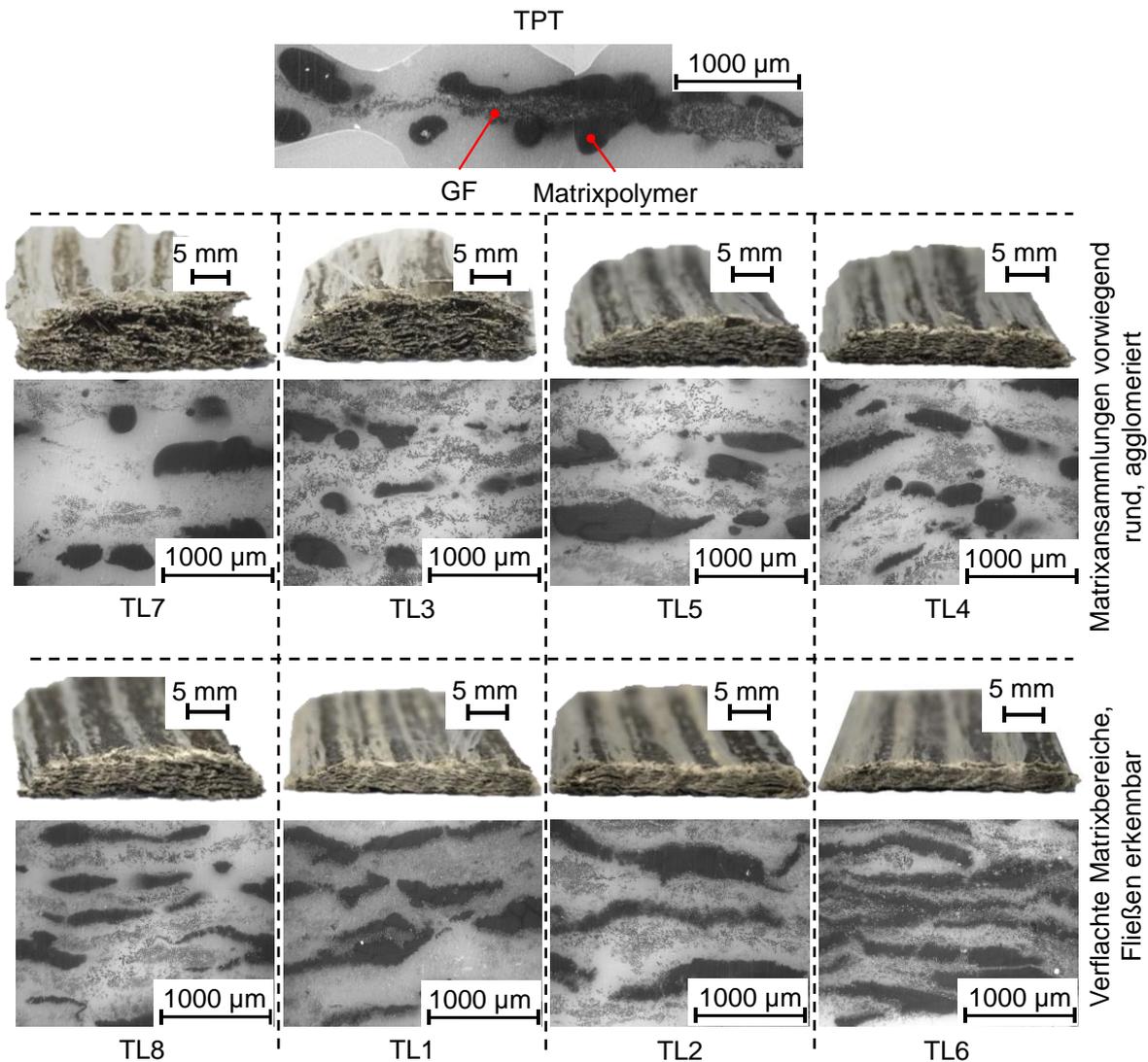


Abbildung 5.5: Fotografien und Lichtmikroskopbilder der Ergebnisse der Tapelegestudie mit höchstem (TL7) bis niedrigstem (TL6) PVG

Die geringe Vorkompaktierung und -imprägnierung von TL7 ist auf der Fotografie deutlich zu sehen, in großen Teilen der Probe ist nur eine sporadische Anhaftung der Einzellagen erkennbar. Das lichtmikroskopische Bild zeigt die poröse Struktur dieser Preform, große Flächen bestehen aus dem Einbettharz bzw. den Poren innerhalb der Preform, wobei eine große Anzahl an Einzelfilamenten lose verteilt im Porenraum

vorliegt. Die Verarbeitungsparameter der Preform TL7 waren eine v_w von 6 m/min, ein p_k von 4 bar sowie ein H_v von 3 NL/min. Die Probe TL6 (Abbildung 5.5) ist hingegen erkennbar stärker vorkompaktiert, was zu einer wesentlich verdichteten und stabileren Preform führt. Das Lichtmikroskopbild zeigt auch, dass der Anteil des Einbettharzes (Poren in der Preform) deutlich geringer ist. Die Verarbeitungsparameter der Preform TL6 waren eine v_w von 3 m/min, ein p_k von 4 bar sowie ein H_v von 5 NL/min.

Ein Vergleich mit dem Ausgangszustand des TPT (oberes Schliffbild in Abbildung 5.5) zeigt, dass mit zunehmender Imprägnierung (Verringerung des PVG) auch eine erkennbare, strukturelle Veränderung der Matrixpolymerbereiche einhergeht. Liegen diese Bereiche bei den ersten vier Proben (TL7, TL3, TL5 und TL4) noch vorwiegend in der im TPT feststellbaren, runden und agglomerierten Form vor, findet bei den Proben TL8, TL1, TL2 und TL6 eine zunehmend starke Verflachung der Matrixbereiche statt. Diese Verflachung lässt auf eine steigende Fließfähigkeit der Matrix im Tapelegeprozess schließen, wobei eine völlige, wenn auch kurzzeitige, Aufschmelzung der Matrixbereiche angenommen werden kann. Durch die zunehmend verflachten Matrixbereiche und der damit einhergehenden Aufschmelzung, kann eine immer größere Zahl an GF-Filamenten mit der Matrix in Oberflächenkontakt treten und an dieser anhaften. So lässt sich auch bei makroskopischer Betrachtung dieser Proben (Fotografien in Abbildung 5.5) eine kompaktere Struktur erkennen, was sich vor allem in den Handlungseigenschaften durch eine hohe Stabilität und starken Zusammenhalt der Preforms bemerkbar macht.

Wie zu Anfang des Kapitels 5 beschrieben, wird ein für den Tapelegeprozess bedingtes, kurzes Prozesszeitfenster (Erwärmung, Ablage und Abkühlung) einer schmelzflüssigen Matrix angenommen. Dieses kurze Prozesszeitfenster kann die überwiegenden Fließvorgänge in der Ebene zwischen den Faserbündeln (Abflachung der zuvor runden Matrixbereiche) erklären. Durch dieses Fließen verteilt sich die Matrix zunächst auf der Oberfläche der Faserbündel, bevor eine Mikroimprägnierung stattfindet. Faserzwischenräume innerhalb der Faserbündel werden dabei nicht infiltriert. Diese Beobachtungen weisen auf die erwartete Makroimprägnierung der Preform hin. Dabei werden weiterhin nahezu geschlossenen (lückenlosen) Matrixphasen erzeugt, sodass im späteren Pressprozess ein vorwiegendes Fließen in Dickenrichtung bei der Verarbeitung dieser Proben angenommen werden kann. Zur

Verdeutlichung dieser Beobachtungen ist in Abbildung 5.6 ein Ausschnitt aus der Lichtmikroskopaufnahme der Preform mit dem geringsten PVG (TL6) dargestellt.

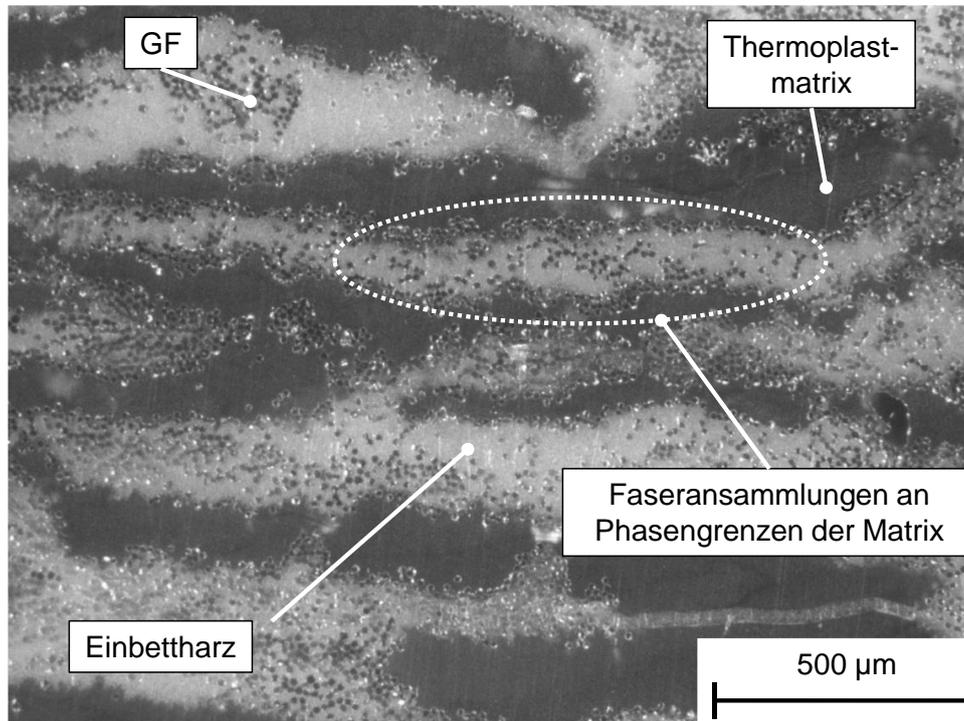


Abbildung 5.6: Lichtmikroskopaufnahme der Preform mit dem geringsten PVG (TL6)

In Abbildung 5.6 sind zunächst die flachen, nahezu geschlossenen Matrixphasen erkennbar. Auffällig ist weiterhin, dass sich die Glasfasern oberflächlich an den Thermoplastbereichen ansammeln, bzw. anhaften, wobei nur sehr wenige Fasern vollständig imprägniert werden, die Thermoplastmatrix also kaum in diese Bereiche vordringt. Diese Tatsache stützt somit nochmals die Annahme, dass innerhalb der untersuchten Parameterbereiche im Tapelegeprozess keine Mikroimprägnierung stattfindet, es jedoch zu einer oberflächlichen Benetzung der Faserbündel mit guter Anhaftung und zu flächigen, nahezu geschlossenen Matrixphasen kommt.

Um diese qualitativen Beobachtungen auf die quantitativen Messwerte zu übertragen, kann ab der Probe TL8 (Abbildung 5.5) von geschlossenen Matrixbereichen (nahezu lückenlose, flache Matrixphasen) ausgegangen werden, was einem PVG von ca. 50 % und weniger entspricht.

5.3.2 Statistische Auswertung des Tapelegeprozesses

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, können aus den Versuchsergebnissen die Haupteffekte sowie die Wechselwirkungseffekte der Faktoren als Differenz der

Ergebnismittelwerte der entsprechenden Faktorstufen errechnet werden. Das Vorzeichen eines Effekts gibt dabei an, in welche Richtung sich das Ergebnis bei Erhöhung des entsprechenden Faktors verändert. Also steigt bei positivem Vorzeichen der PVG von der niedrigen zur hohen Faktorstufe an und fällt bei negativem Vorzeichen ab. Die Konfidenzintervalle wurden ebenso nach der in Kapitel 2.5 vorgestellten Methode auf Basis der Messwerte berechnet.

Alle berechneten Effekte (Haupt- und Wechselwirkungseffekte) und Konfidenzintervalle des Tapelegeprozesses sind zusammengefasst in Abbildung 5.7 dargestellt. Die vollständigen Versuchsergebnisse (Messwerte, Mittelwerte und Einzelvarianzen) sind in Tabelle 10.5 im Anhang aufgelistet.

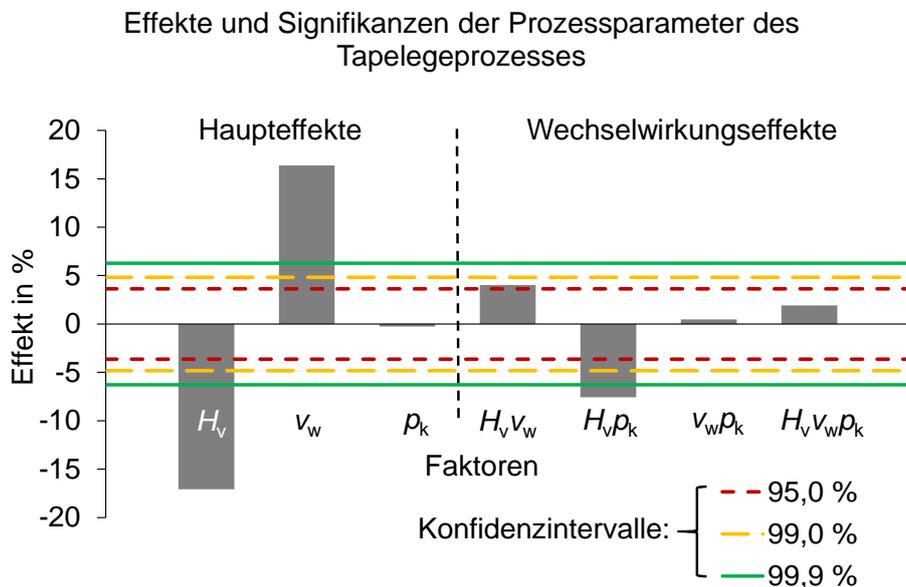


Abbildung 5.7: Ergebnisse (Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte) der statistischen Versuchsauswertung des Tapelegeprozesses

Abbildung 5.7 zeigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit v_w und der Heißgasvolumenstrom H_v hochsignifikante Auswirkungen auf den PVG haben, wobei eine niedrige v_w und hoher H_v einen positiven Effekt aufweisen (Verringerung des PVG). Limitierend für diese Parameter sind dabei die Degradationstemperatur des Polymers und eine wirtschaftlich akzeptable Prozessgeschwindigkeit. Für den Systemdruck der Konsolidierungsrolle ρ_k gibt es keine Hinweise auf einen signifikanten Einfluss. Der ρ_k beeinflusst den PVG nur in Wechselwirkung mit dem H_v (Wechselwirkung $H_v \rho_k$), was eine hochsignifikante Wechselwirkung darstellt. Die

Ergebnisse zu dieser hochsignifikanten Wechselwirkung sind in Abbildung 5.8 gesondert dargestellt.

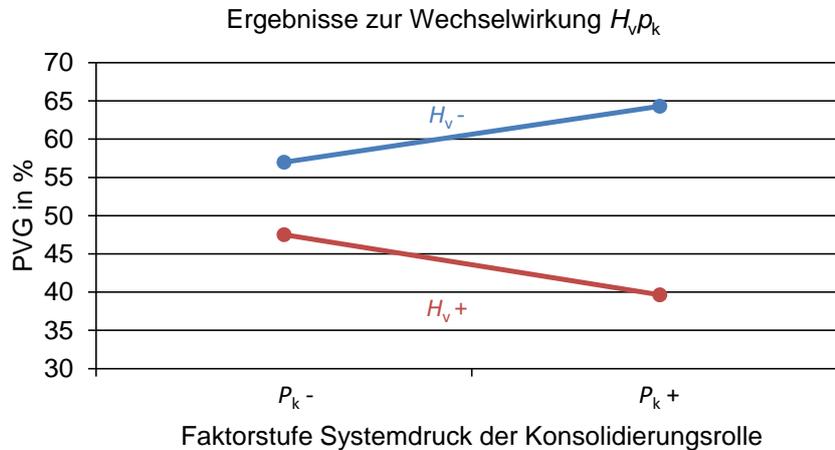


Abbildung 5.8: Darstellung der Ergebnisse zur Wechselwirkung $H_v p_k$

Die Verläufe des Faktors H_v sind in Abbildung 5.8 über den Faktorstufen von p_k aufgetragen, der Wechselwirkungseffekt ist in dieser Darstellung durch die Abweichung der Steigung beider Geraden erkennbar. Der PVG steigt bei der niedrigeren Einstellung für H_v mit zunehmendem p_k an. Im Gegensatz dazu fällt der PVG bei der höheren Stufe von H_v mit zunehmendem p_k ab. Die statistische Auswertung dieser Parameterstudie zeigt somit, dass der Anpressdruck (Systemdruck) der Konsolidierungsrolle den PVG nicht direkt, sondern nur wechselwirkend mit dem Heißgasvolumenstrom beeinflusst. Durch die gegenläufigen Entwicklungen des PVG bei niedrigem und bei hohem Heißgasvolumen, mit nahezu identischer, entgegengesetzter Steigung (vgl. Abbildung 5.8), ergibt sich ein sehr geringer Haupteffekt des Faktors p_k (vgl. Abbildung 5.7), da dieser die Differenz der Mittelwerte aller Stufen von p_k beschreibt.

Die Wechselwirkung $H_v v_w$ führt nur zu einem indifferenten Ergebnis, die übrigen Wechselwirkungen zeigen keinen Hinweis auf einen signifikanten Effekt.

Durch diese berechneten Effekte lassen sich die Ergebnisse mit dem höchsten bzw. geringsten PVG bestätigen (siehe Abbildung 5.5): Für den Faktor H_v leitet sich aus seinem Haupteffekt die höhere Stufe als positiv für einen geringen PVG ab. Aus dem Haupteffekt von v_w lässt sich für diesen Faktor die niedrigere Stufe als günstigere Einstellung identifizieren. Für den Faktor p_k gibt der Haupteffekt jedoch keinen

Aufschluss über eine vorteilhafte Einstellung. Für diesen Faktor muss daher der Effekt der Wechselwirkung $H_v p_k$ herangezogen werden. Da zuvor der Faktor H_v auf dessen höhere Stufe festgelegt wurde, führt die höhere Stufe von p_k zu einer Verringerung des PVG. Durch diesen Wechselwirkungseffekt von $H_v p_k$ lässt sich die Beobachtung erklären, dass sowohl die Messreihe mit dem geringsten PVG (TL6), als auch die Messreihe mit dem höchsten PVG (TL7) eine hohe Stufe von p_k aufweisen. Aus der Wechselwirkung $H_v p_k$, die bei TL7 für die niedrigere Stufe von H_v betrachtet werden muss, folgt für p_k ebenfalls die höhere Faktorstufeneinstellung für einen hohen PVG.

5.4 Einfluss der Werkzeugplattentemperatur auf den Imprägnierfortschritt beim Tapelegen

Ergänzend zu der statistischen Parameterstudie und entgegen der Zielsetzung einer Makroimprägnierung, soll nachfolgend die Möglichkeit und Grenzen der Mikroimprägnierung innerhalb des Tapelegeprozesses untersucht werden. In dieser Studie wird der Einfluss der Werkzeugplattentemperatur T_w auf die Entwicklung des PVG isoliert betrachtet, weshalb alle weiteren Prozessparameter konstant gehalten werden. Diese Parameter werden der Parameterstufe der Hauptversuchsreihe mit minimalem PVG entnommen.

Im Folgenden werden zunächst die Methode und Versuchsplanung zur Temperaturmessung der Einzellagen bei variierter Werkzeugplattentemperatur beschrieben. In einer theoretischen Betrachtung wird anschließend das Prozesszeitfenster zur Aufschmelzung der Thermoplastpartikel im Tapelegeprozess abgeschätzt. Diese Abschätzung dient der Einordnung des ermittelten Prozesszeitfensters der Erwärmungsphase während der Faserablage. Abschließend werden die Versuchsergebnisse dargestellt und bewertet.

5.4.1 Versuchsdurchführung und Methode zur Messung der Einzellagentemperaturen

Durch die Erhöhung der Werkzeugplattentemperatur T_w soll zusätzliche Wärme in die Preform eingebracht werden, wodurch aufgrund einer steigenden Grundtemperatur eine Verringerung der Matrixviskosität und damit eine Verbesserung der Imprägnierung erwartet wird. Die untersuchten Werkzeugplattentemperaturen sind 60 °C, 100 °C, 140 °C, 180 °C und 210 °C.

Analog zu der Versuchsdurchführung und -auswertung in Kapitel 5.2.2 werden Probekörper (Preforms) mit der Faktorstufenkombination TL6 (Vorschubgeschwindigkeit 3 m/min, Systemdruck der Konsolidierungsrolle 4 bar sowie Heißgasvolumenstrom 5 NI/min) hergestellt und analysiert. Die Probekörper jeder Temperaturstufe T_w werden aus 6 Einzellagen mit jeweils 4 parallelen Bahnen TPT hergestellt. Die Auswertung von Schliffbildern mittels Grauwertanalyse soll zunächst Aussagen hinsichtlich der Imprägnierfortschritte in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur T_w ermöglichen.

Zusätzliche Temperaturmessungen zwischen den einzelnen Lagen der Preform sollen Kenntnisse über den Temperaturverlauf in der Preform während des Ablegevorgangs liefern. Mit Hilfe dieser Temperaturmessungen kann ermittelt werden, ob eine mögliche Verbesserung der Imprägnierung durch erneutes Aufschmelzen und Nachimprägnieren bereits abgelegter Lagen erreicht wird. Zur Temperaturmessung wurden Thermoelemente (TE) des Typs K in Kombination mit dem Messverstärker und Datenrekorder *YOKOGAWA GP20* verwendet. Die Thermoelemente werden mit jeder neuen Lage zusammen mit dem abzulegenden TPT der Preform mittig zugeführt, sodass mit Erreichen der 6. Lage insgesamt 6 TE in der Preform vorhanden sind (TE1 zwischen Werkzeugplatte und erster Lage, TE6 zwischen 5. und 6. Lage).

5.4.2 Abschätzung des Prozesszeitfensters zur Aufschmelzung der Thermoplastpartikel

Die notwendige Bedingung für Fließvorgänge der Matrix und damit der Imprägnierung der Towpregs während der Faserablage, ist eine vollständige Erwärmung der thermoplastischen Matrix (Partikel) über deren Schmelztemperatur.

Zur Abschätzung des Prozessfensters der Erwärmung und Aufschmelzung eines TP-Partikels wird eine stark idealisierte Modellrechnung angewandt, bei welcher der TP-Partikel vereinfacht als eine Halbkugel angenommen wird (vgl. Abbildung 5.9).

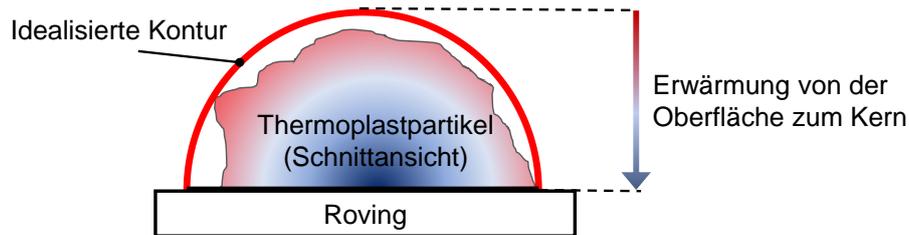


Abbildung 5.9: Vereinfachtes Modell eines halbkugelförmigen Partikels (Schnittansicht) zur Abschätzung der Durchheizzeit eines TP-Partikels

Der Durchmesser der Halbkugel wird nach der Partikelgrößenverteilung in Abbildung 3.1 (Kapitel 3.2) mit $250\ \mu\text{m}$ angenommen. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass im Kern der idealisierten TP-Partikel zu Beginn der Erwärmung ($t = t_0$) die Umgebungstemperatur T_u herrscht und an deren Oberfläche die Degradationstemperatur T_d des Thermoplasts, was den Extremfall der äußeren Erwärmung abbildet. Hat die Kerntemperatur die Schmelztemperatur T_m erreicht, gilt der TP-Partikel in dieser Annahme als vollständig aufgeschmolzen. Dabei wird in einer weiteren, starken Vereinfachung dem TP-Partikel ein lineares, stationäres Wärmeleitungsverhalten zugeordnet, wobei der TP-Partikel nur durch seine Mantelfläche Wärme aufnimmt. Eine kühlende Wirkung, bzw. Erwärmung, des Rovings wird vernachlässigt. Der Wärmestrom \dot{Q} lässt sich nach den getroffenen Vereinfachungen und Voraussetzungen durch Gleichung 5.2 nach [128] berechnen:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A_m \cdot \frac{T_d - T_u}{r} \quad 5.2$$

Dabei ist λ die Wärmeleitfähigkeit des Polymers, r der Radius und A_m die Mantelfläche der Halbkugel (vereinfachter TP-Partikel). T_d ist, wie bereits beschrieben, die Temperatur, die an der Halbkugeloberfläche herrscht (Degradationstemperatur der Matrix) und T_u die Temperatur im Kern des Partikels (Umgebungstemperatur: $21\ \text{°C}$). Die insgesamt bis zum Durchschmelzen des idealisierten Partikels benötigte Änderung der inneren Energie dU kann mit Gleichung 5.3 nach [129] berechnet werden:

$$dU = c_p \cdot m \cdot (T_m - T_u) \quad 5.3$$

Mit der Wärmekapazität c_p und der Masse m des TP-Partikels kann der Zeitraum dt zum Erwärmen eines TP-Partikels mittels Gleichung 5.4 [129] abgeschätzt werden:

$$dt = \frac{dU}{\dot{Q}} \quad 5.4$$

Bei Einsetzen der Werkstoffdaten aus Tabelle 3.2 in die Formeln 5.2 und 5.3, sowie deren Zusammenführung in Formel 5.4, ergibt sich ein Erwärmungszeitraum dt von 0,035 s. Aufgrund der getroffenen, starken Vereinfachungen ist dieser Erwärmungszeitraum als absolutes Minimum einzustufen, im realen Prozess werden längere Erwärmungszeiten erwartet. Diese Berechnung dient somit der Abschätzung eines minimalen Zeitraums, bei Unterschreitung wird ein vollständiges Durchschmelzen der Thermoplastpartikel ausgeschlossen.

5.4.3 Auswertung und Ergebnisse zum Imprägnierfortschritt bei hohen Werkzeugplattentemperaturen

In Abbildung 5.10 sind die aus 9 Einzelmessungen gemittelten PVG der Preforms in Abhängigkeit der eingestellten T_w dargestellt. Die Versuche mit einer T_w von 210 °C konnten nicht durchgeführt, bzw. ausgewertet werden. Bei dieser Versuchsreihe war eine Verfestigung der Matrix nicht gegeben, sodass aufgrund mangelnder Anhaftung der Einzellagen eine Zerstörung der Preform während der Ablage auftrat.

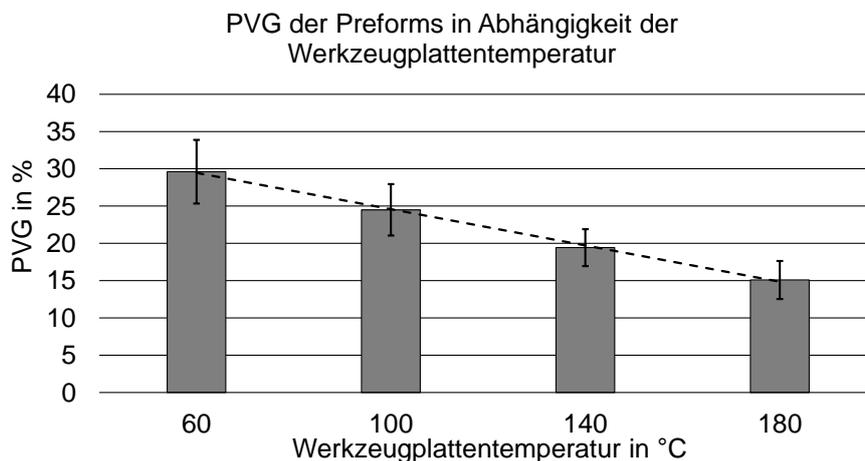


Abbildung 5.10: PVG der Preforms in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur von 60 °C bis 180 °C

Die Grauwertanalyse der Probekörper zeigt eine lineare Reduzierung des PVG der hergestellten Preforms mit der Erhöhung der T_w im untersuchten Parameterbereich. Mit einer Reduzierung des PVG von 29,62 % ($T_w = 60$ °C) auf 15,10 % ($T_w = 180$ °C) konnte der PVG der Preforms halbiert werden.

Die Lichtmikroskopaufnahmen der Probenquerschnitte (Abbildung 5.11) machen den mit steigender T_w verbesserten Imprägnierfortschritt und der damit einhergehenden strukturellen Änderung der Preforms deutlich. Die Einbetttharzbereiche (Poren) werden mit steigender T_w erkennbar kleiner, wobei sich die dunklen Thermoplastbereiche stärker zusammenschließen.

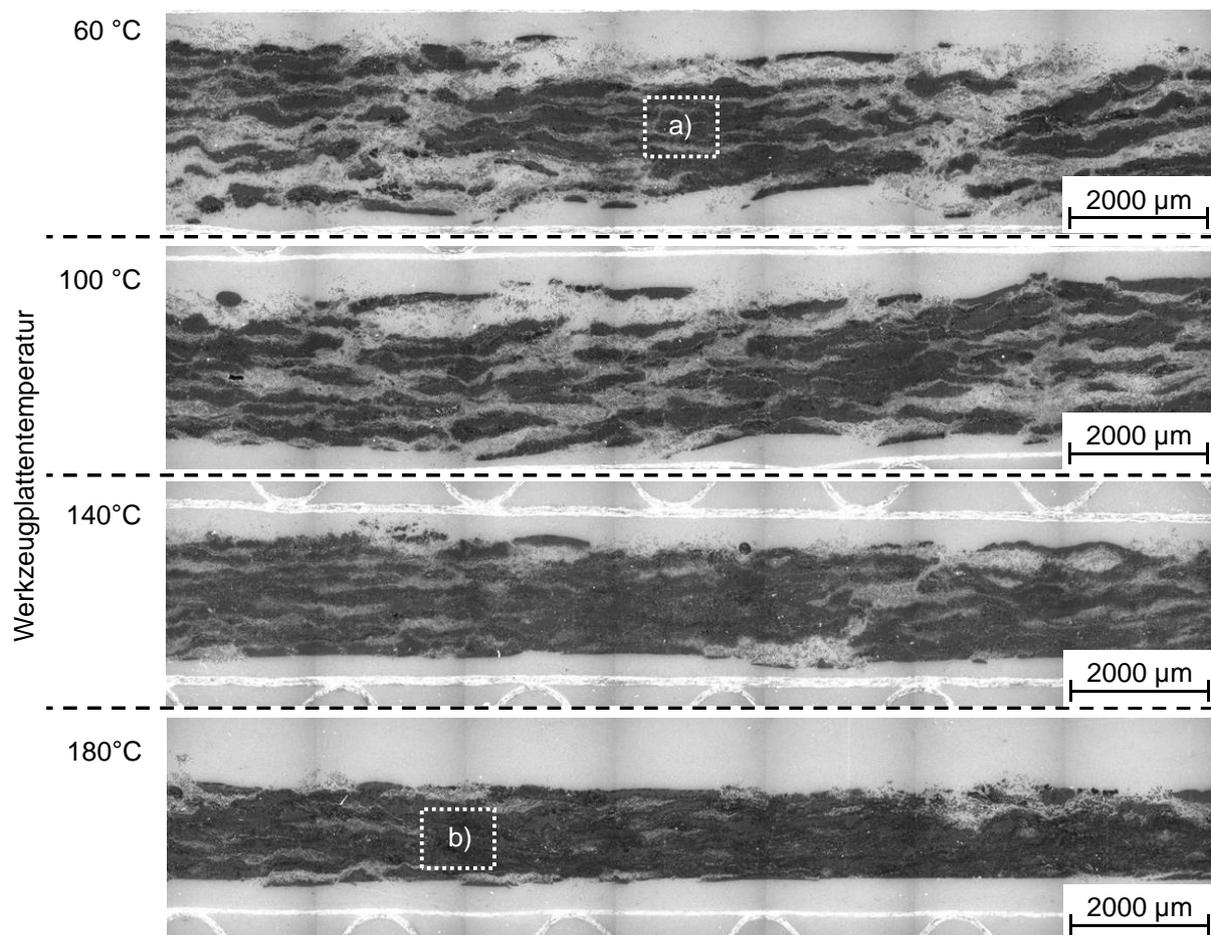


Abbildung 5.11: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Preformquerschnitte hergestellt mit T_w von 60 °C bis 180 °C

Zur Bewertung der Imprägnierqualität hinsichtlich einer Mikroimprägnierung der Faserbündel werden die in Abbildung 5.11 markierten Bereiche a) ($T_w = 60 \text{ °C}$) und b) ($T_w = 180 \text{ °C}$) als Extremwerte dieser Versuchsreihe in Abbildung 5.12 vergrößert dargestellt.

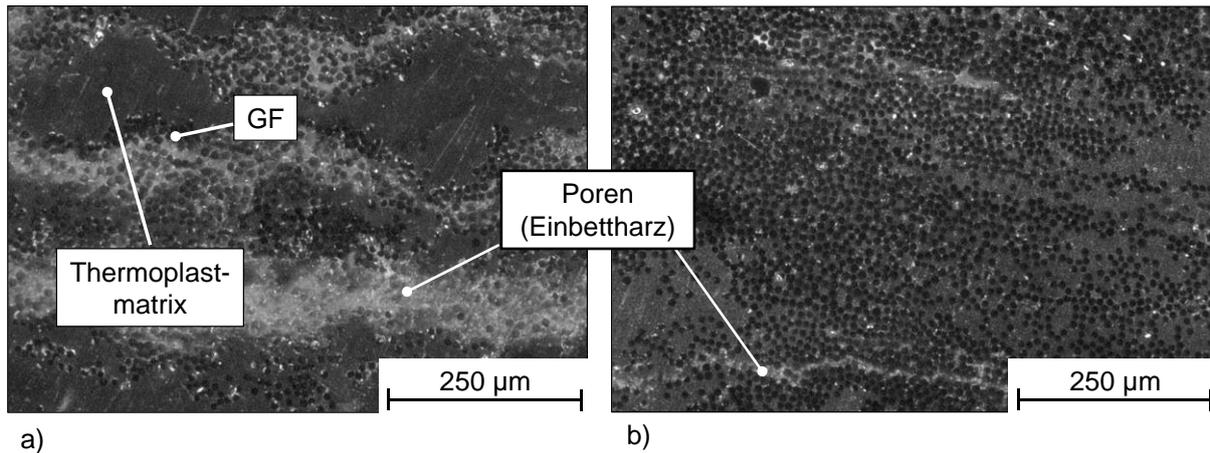


Abbildung 5.12: Vergrößerte Bereiche der Mikroskopafnahmen aus Abbildung 4.9 a) (links) und b) (rechts) der Proben mit einer T_w von 60 °C bzw. 180 °C

Wie in Abbildung 5.12 erkennbar, konnte die Erhöhung der T_w die Mikroimprägnierung des Rovings, bzw. der faserreichen Bereiche, verbessern. In Abbildung 5.12 a) sind, wie in Kapitel 5.3.1 bereits festgestellt, die Fasern noch weitgehend an den Rändern der Polymerbereiche (dunkle Bereiche) angesammelt, wobei nur vereinzelt Filamente vollkommen benetzt vorliegen. In Abbildung 5.12 b) sind hingegen großflächige, mikroimprägnierte Bereiche mit vollständiger Benetzung der Einzelfilamente erkennbar.

Zur Bewertung eines erneuten Aufschmelzens der thermoplastischen Matrix in bereits abgelegten Lagen, bei der Ablage einer neuen Lage, werden die in den Versuchen aufgezeichneten Temperaturdaten herangezogen. Abbildung 5.13 stellt exemplarisch den Temperaturverlauf in den verschiedenen Lagen der Preform beim Ablegevorgang der 6. Lage dar. Der Ablegevorgang ist hierbei in einzelne zeitliche Bereiche, hinsichtlich der Temperatureinwirkung auf TE6 (TE im Ablagebereich), unterteilt. Die Daten stammen aus dem Versuch mit einer T_w von 180 °C. Die Temperaturkurve des TE6 im Bereich b), welches sich auf Lage 5 und damit beim Ablegen in direktem Kontakt mit dem Heißgas befand, ist aufgrund beobachteter, starker Messwertabweichungen innerhalb der Versuchsreihen in diesem Bereich, nur für qualitative und nicht für quantitative Aussagen verwendbar.

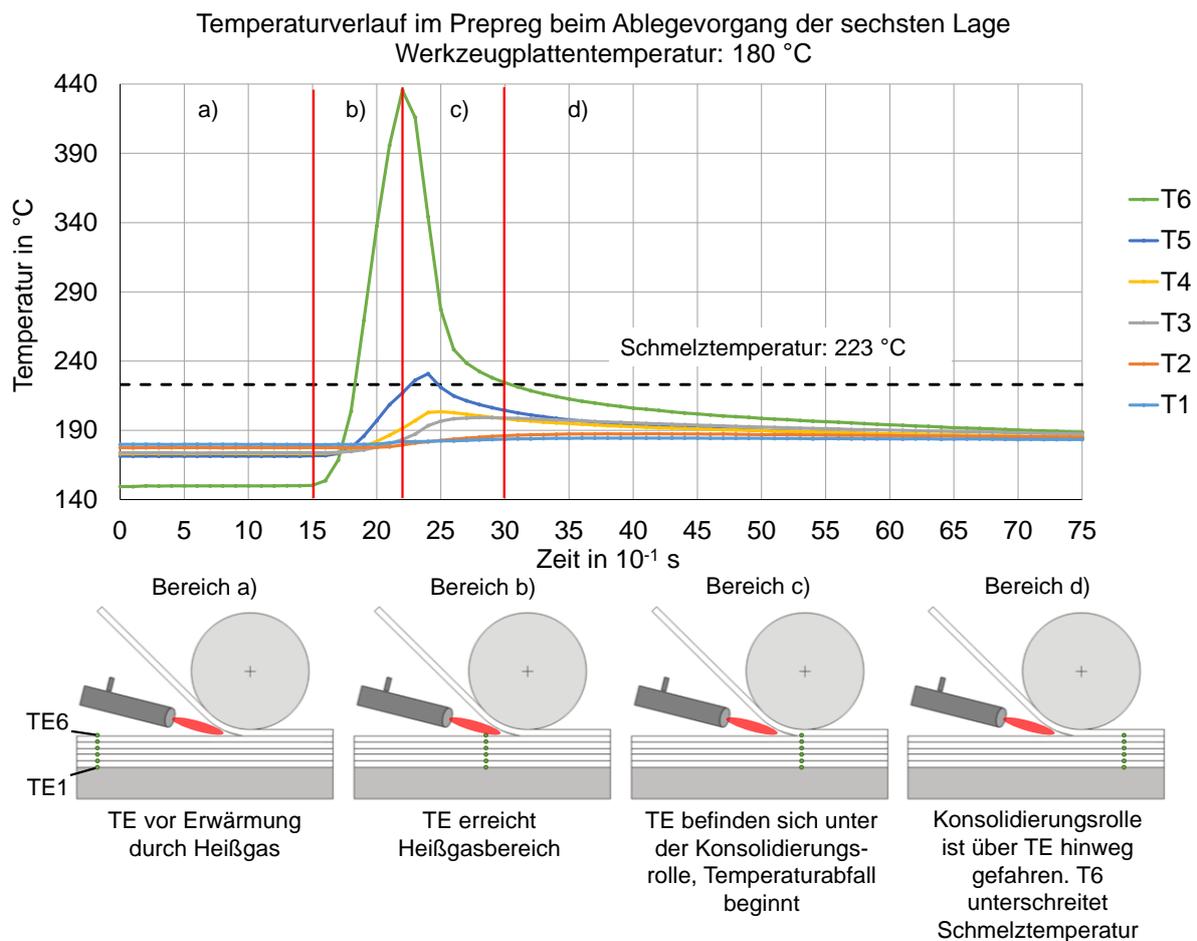


Abbildung 5.13: Beispielhafte Darstellung und Unterteilung der Temperaturverläufe in den Einzellagen der Preform bei Ablage der 6. Lage, $T_w = 180$ °C

Zunächst ist anhand der Breite des Bereiches b) in Abbildung 5.13 absehbar, dass der Zeitraum, in dem sich das TE und damit das TPT im Bereich der Heißgasflamme befindet, ca. 0,7 s beträgt. Dieses Zeitfenster liegt deutlich über der in Kapitel 5.4.2 getroffenen Abschätzung der minimal notwendigen Zeit zum Durchheizen eines betrachteten Polymerpartikels von 0,035 s. Es wird somit davon ausgegangen, dass das Polymer während der Ablage vollständig in den schmelzflüssigen Zustand überführt wird, auch wenn zur Berechnung dieses Zeitraums stark vereinfachte Annahmen getroffen wurden. Aufgrund der konstanten Prozessgeschwindigkeit konnte bei allen Ablagen ein Zeitraum von ca. 0,7 s ermittelt werden.

Weiterhin ist an der Breite des Bereichs c) in Abbildung 5.13 zu erkennen, dass das Polymer, nachdem die Konsolidierungsrolle es passiert, im gezeigten Beispiel noch bis zu 0,9 s oberhalb der Schmelztemperatur verbleibt. Eine Auswertung und Betrachtung des Zeitraums einer schmelzflüssigen Matrix ab dem Überschreiten der

Schmelztemperatur im Bereich b) bis zum Ende des Bereichs c) ist aufgrund der erwähnten, starken Messwertabweichungen in Bereich b) nicht zielführend. Die Mittelwerte der betrachteten Zeitfenster, der jeweiligen Bereiche c) jeder abgelegten Lage ab der zweiten Lage (TE2 bis TE6), sind in Abbildung 5.14 in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur dargestellt.

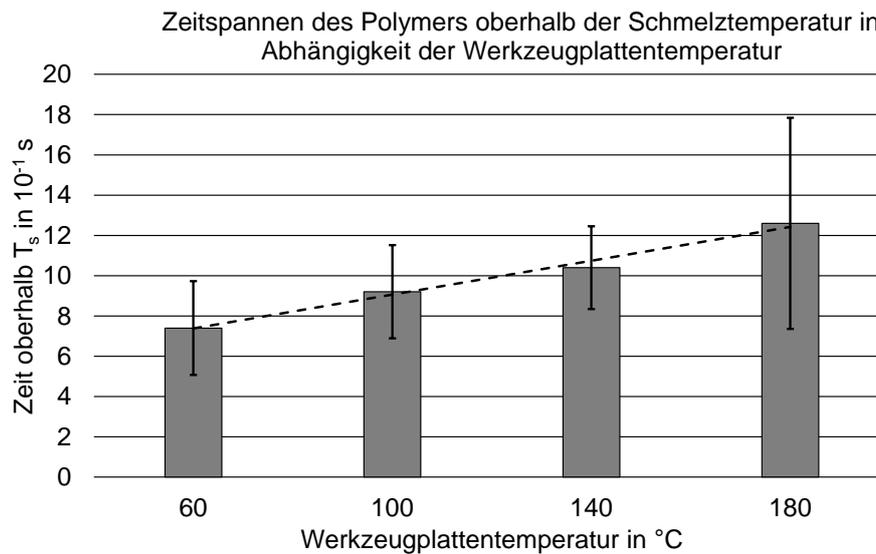


Abbildung 5.14: Gemittelte Zeitfenster der thermoplastischen Matrix oberhalb der Schmelztemperatur nach Überfahren der Konsolidierungsrolle in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur

Wie in Abbildung 5.14 ersichtlich, besteht im untersuchten Parameterbereich ein nahezu linearer Zusammenhang der Zeitfenster oberhalb der Schmelztemperatur des Polymers und der Werkzeugplattentemperatur. Ein vergleichbarer linearer Zusammenhang mit der Werkzeugplattentemperatur konnte auch bei der Messung des PVG erkannt werden (siehe Abbildung 5.10).

Zur Überprüfung, ob eine mögliche Verbesserung der Imprägnierung, neben einem verlängerten Prozesszeitfenster einer schmelzflüssigen Matrix, auch durch erneutes Aufschmelzen und Nachimprägnieren bereits abgelegter Lagen erreicht wird, werden die Temperaturverläufe unterhalb der oberen Lage (TE1 bis TE5) bei Ablage dieser oberen Lage in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur analysiert. In Abbildung 5.15 sind dazu die maximal gemessenen Temperaturen in den Preformlagen unterhalb des Ablegepunkts (TE1 bis TE5), zum Zeitpunkt des Ablegens der 6. Lage, für jede Werkzeugplattentemperatur dargestellt.

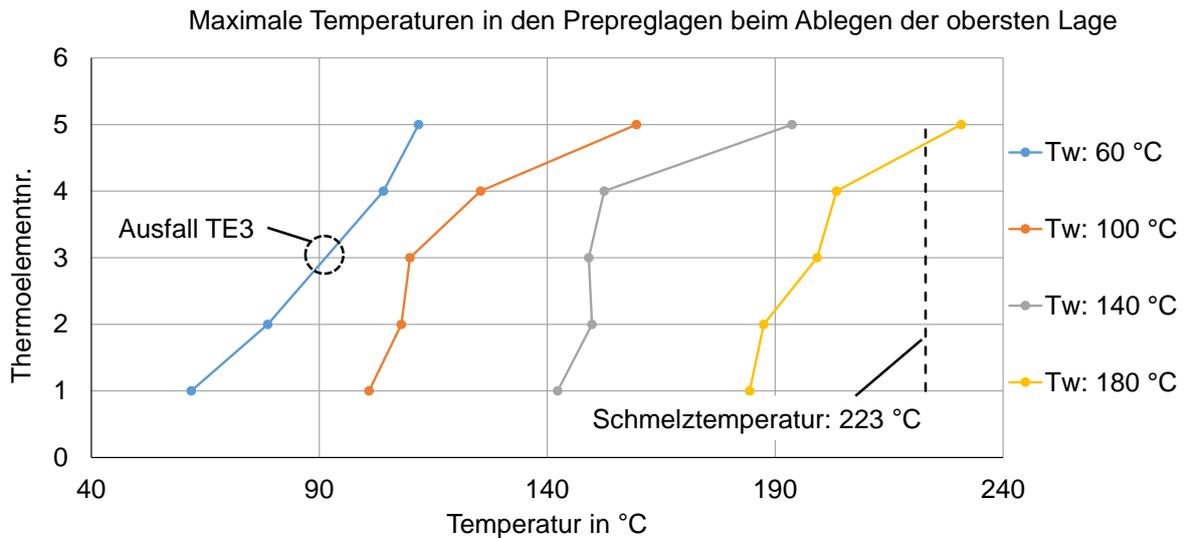


Abbildung 5.15: Maximale gemessene Temperaturen in den Preformlagen (TE1 bis TE5) beim Ablegen der obersten Lage in Abhängigkeit der Werkzeugplattentemperatur

In Abbildung 5.15 wird deutlich, dass nur bei einer T_w von 180 °C von einer hinreichenden Erwärmung der Preform ausgegangen werden kann, sodass ein erneutes Aufschmelzen der Lage unterhalb der abgelegten Lage (TE5) erreicht wird. Bei geringeren T_w , bzw. größeren Abständen zur abgelegten Lage, verbleiben die gemessenen, maximalen Temperaturen deutlich unterhalb der Schmelztemperatur der Matrix. Diese Feststellung schließt ein Nachimprägnieren und -konsolidieren der Preform durch erneutes Aufschmelzen bereits abgelegter Lagen bei Überfahren des Tapelegekopfes, bis auf eine T_w von 180 °C, aus. Da bei der T_w von 180 °C keine deutliche Reduzierung des PVG beobachtet werden konnte (vgl. Abbildung 5.10), wird dem Überschreiten der Schmelztemperatur unterhalb der abgelegten Lage auch bei der hohen T_w keine signifikante Bedeutung für eine Nachimprägnierung beigemessen.

Die Verbesserung der Imprägnierung und das Erreichen einer Mikroimprägnierung innerhalb der Faserstränge, bei Erhöhung der Werkzeugplattentemperatur, wird somit auf eine Verlängerung des Prozesszeitfensters und die damit einhergehende höhere, mittlere Temperatur, bzw. die Herabsetzung der Matrixviskosität, im direkten Bereich der Ablage zurückgeführt.

6 Untersuchung des Imprägnierfortschritts im Pressprozess

In diesem Kapitel wird der dritte Prozessschritt der Prozesskette, der Pressprozess zur vollständigen Imprägnierung der vorimprägnierten Preforms (Tapelegeprozess, Kapitel 5), untersucht. Zunächst erfolgt eine Übersicht der verwendeten Anlagentechnologien, anschließend die Versuchsplanung und Methode des Pressprozesses und abschließend die Auswertung und Einordnung der Ergebnisse.

6.1 Versuchsaufbau: Pressprozess

Die zur Durchführung der Versuchsreihen verwendeten Anlagen und Werkzeuge werden im Folgenden dargestellt. Weiterhin wird eine Übersicht über den durchgeführten Direktimprägnierungsprozess und den damit verbundenen Prozessphasen gegeben.

6.1.1 Laborpresse

Zur experimentellen Untersuchung der Imprägnierung und Konsolidierung der im Tapelegeverfahren hergestellten TPT-Preforms wurde eine an der *IVW GmbH* entwickelte Laborheißpresse eingesetzt (siehe Abbildung 6.1).

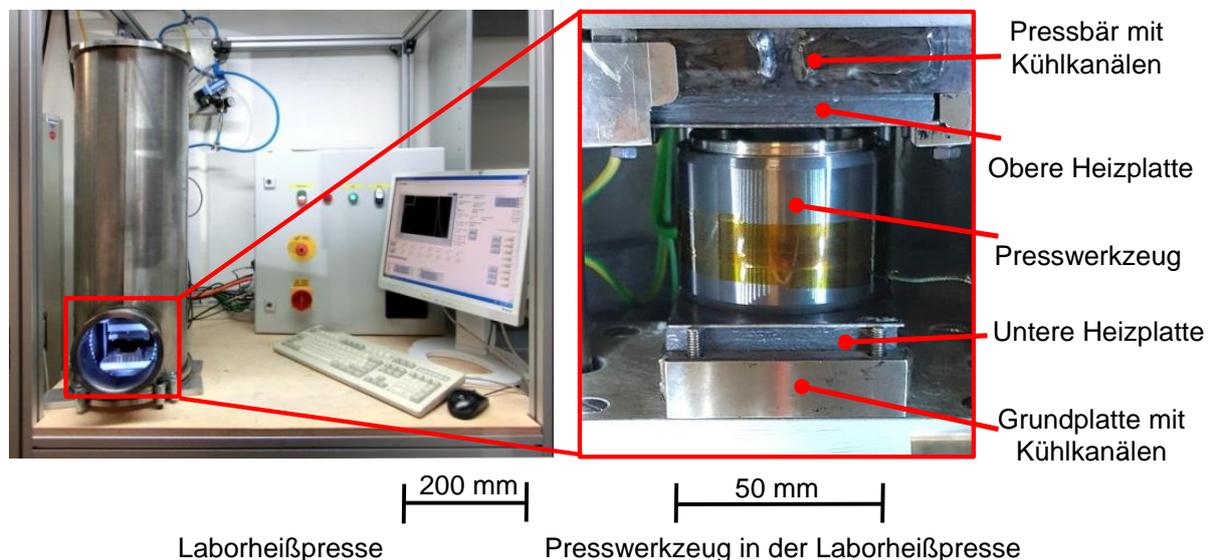


Abbildung 6.1: Laborheißpresse mit Presswerkzeug zur experimentellen Imprägnierung und Konsolidierung der TPT-Preforms

Die Laborheißpresse besteht aus zwei elektrisch beheizten, keramischen Heizplatten (Heizleistung jeweils ca. 2200 W) und einem Pressbären, der die Presskraft auf das

darunter befindliche Presswerkzeug überträgt. Die Kühlung des Bauteils, bzw. des Presswerkzeugs, erfolgt durch eine Wasserkühlung der oberen und unteren Heizplatte. Die Heizplatten stehen dabei während des Pressprozesses in direktem Kontakt mit dem oberen und unteren Presskörper des Presswerkzeuges und ermöglichen somit eine direkte Wärmeübertragung auf das Werkzeug. Die Presskraft wird über einen Schrittmotor mit Spindeltrieb bereitgestellt und gelangt über die Presskörper direkt auf das zu imprägnierende Bauteil (Preform). Die speicherprogrammierbare Steuerung der Laborheißpresse ermöglicht die Einstellung eines definierten Temperatur- und Druckprofils, wobei eine maximale Temperatur von 800 °C und eine maximale Kraft von 5 kN (dies entspricht bei dem verwendeten Versuchswerkzeug einem Werkzeuginnendruck von 25,4 bar) eingestellt werden kann. Die maximale Heizrate der keramischen Platten liegt bei 10 K/s, die Kühlrate bei maximal 5 K/s. Die Laborheißpresse verfügt über interne Thermoelemente an den Heizplatten, um deren Temperatur zu messen. Zur Temperaturmessung von Bauteilen oder Werkzeugen stehen weitere Thermoelemente zur Verfügung. Die Presskraft wird von einer Kraftmessdose gemessen, der Verfahrensweg der Presse in Höhenrichtung wird durch ein laserbasiertes Abstandsmesssystem erfasst. Die Steuerungssoftware speichert die Messwerte der Temperaturen, des Verfahrenswegs und der Presskraft einmal pro Sekunde (Messfrequenz 1 Hz) zur späteren, externen Auswertung.

Zusammenfassend ermöglicht die computerunterstützte Regelung der Laborpresse die Wahl und automatische Einstellung folgender Parameter:

- Die Temperatur der Heiz- und Kühlplatten T_p ,
- die Schließkraft der Presse F_s ,
- und die entsprechenden Zeitintervalle zwischen den Änderungen der ersten beiden Parameter t_z .

6.1.2 Presswerkzeug

Das im Rahmen dieser Untersuchung verwendete Presswerkzeug ist als Tauchkantenwerkzeug ausgelegt und besteht aus zwei identischen Presskörpern und einem äußeren Werkzeugring (siehe Abbildung 6.2).

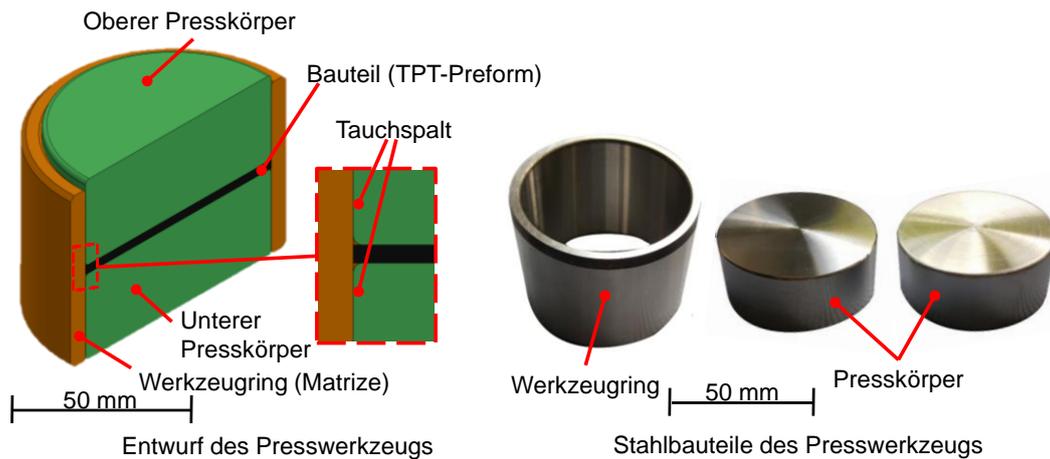


Abbildung 6.2: Entwurf und Stahlbauteile des Presswerkzeugs zur Durchführung der Pressversuche

Der Außenring bildet die Matrize des Presswerkzeuges und dient als Führung der Pressstempel. Die Teile des Werkzeugs sind aus Stahl (Werkzeugring und Presskörper) gefertigt, die Werkzeugkavität hat einen Durchmesser von 50 mm und das Werkzeug eine Gesamthöhe von 40 mm. Im geschlossenen Zustand des Werkzeuges entsteht zwischen den Presskörpern und der Matrize der Tauchspalt. Dieser Tauchspalt wurde konstruktiv in Anlehnung an Literaturangaben [130] auf ein Maß von maximal 0,05 mm begrenzt.

6.1.3 Direktimprägnierung im variothermen Pressprozess

Das Prinzip des variothermen Pressprozesses, welches durch die Laborheißpresse und das Presswerkzeug ermöglicht wird, durchläuft mehrere Prozessschritte, die bereits in Kapitel 2.2.1, dargestellt wurden. Abbildung 6.3 visualisiert einen qualitativen Temperatur- und Druckverlauf, der zur Umsetzung des Direktimprägnierungsprozesses auf ein Prepreg einwirken sollte.

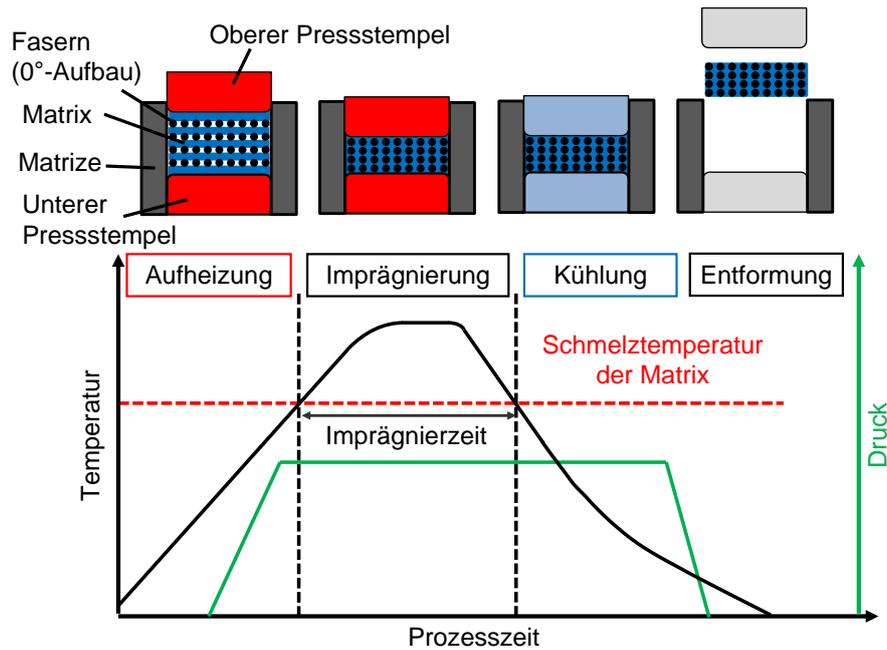


Abbildung 6.3: Beispielhaftes Temperatur- und Druckprofil beim Direktimprägnierungsprozess

Nach der Beladung mit dem Prepreg wird das Werkzeug geschlossen und im folgenden Aufheizvorgang möglichst gleichmäßig und schnell aufgeheizt. Dadurch wird die eingebrachte Wärme auf die Matrix des Prepregs übertragen, sodass der Imprägnierungsvorgang mit Erreichen der Schmelztemperatur beginnen kann. Während der Imprägnierungsphase muss ein Prozessdruck auf das Prepreg wirken, um eine vollständige Imprägnierung zu erreichen (vgl. Kapitel 2.4.2). Nachdem der Imprägnier- und Konsolidierungsprozess unter konstanter Druck- und Temperaturwirkung abgeschlossen wurde, wird die Temperatur des Bauteils (bzw. der Matrix) durch eine Werkzeugkühlung herabgesetzt. Hierbei muss der Prozessdruck aufrechterhalten werden, bis die Solidifikation der Matrix vollständig abgeschlossen ist. Anschließend kann das fertige Bauteil entformt werden.

6.1.4 Überprüfung der Werkzeugtemperatur

Die direkte Bauteiltemperaturmessung ist aufgrund des geschlossenen Werkzeugaufbaus (siehe Abbildung 6.2) nicht möglich, sodass näherungsweise als Messgröße die Temperatur der Werkzeugoberfläche in der Mitte des Werkzeugs für die nachfolgenden Versuche herangezogen wurde. Zur Messung der Werkzeugtemperatur wurde ein Thermoelement der Laborheißpresse in der Werkzeugmitte (auf Höhe des zu verpressenden Bauteils) mit temperaturbeständigem

Klebeband befestigt. Die gemessene Oberflächentemperatur wird also stellvertretend für die Bauteiltemperatur bewertet, wobei aufgrund von Konvektion an der Oberfläche eine höhere Innentemperatur des Werkzeugs angenommen werden kann.

In Vorversuchen zur Temperaturmessung mit Thermoelement zeigten sich unterschiedliche Aufheizraten bei verschiedenen untersuchten Plattentemperaturen. So wurde beispielsweise eine Aufheizrate des Werkzeugs von 1,5 K/s bei einer Plattentemperatur von 325 °C erreicht, eine Plattentemperatur von 270 °C ergab hingegen eine Aufheizrate von ca. 1 K/s. Die Abkühlrate betrug unabhängig von der Ausgangstemperatur durchschnittlich 0,6 K/s. Aufgrund der ungleichmäßigen Heizraten wurde ergänzend die Wärmeverteilung auf der Werkzeugoberfläche optisch untersucht. Dazu wurde die Wärmebildkamera *TIM 160* des Herstellers *Micro-Epsilon* genutzt. In Abbildung 6.4 sind drei verschiedene Momentaufnahmen dieser Versuchsreihe dargestellt.

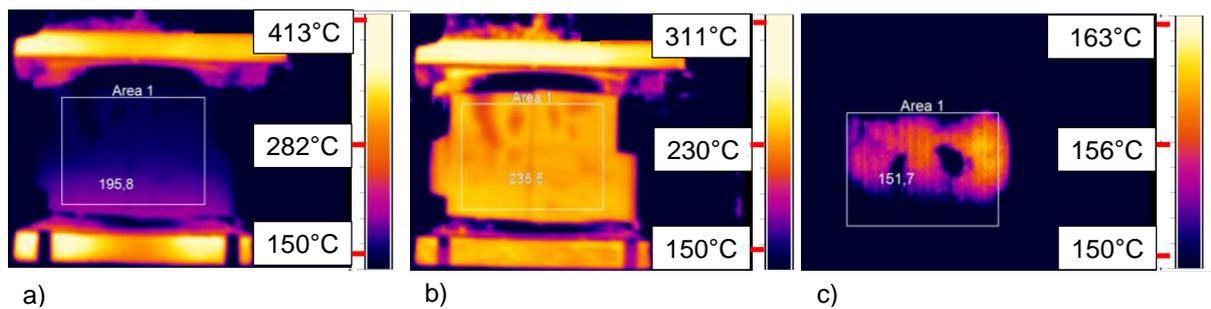


Abbildung 6.4: Wärmebildaufnahmen des Presswerkzeugs und der Heizplatten der Laborheißpresse im Rahmen der Vorversuche

Abbildung 6.4 a) zeigt den Beginn der Aufheizung bei der zunächst der untere Teil des Werkzeugs eine erhöhte Temperatur aufweist, wobei die maximale Differenz 40 K beträgt. Wie in Abbildung 6.4 b) zu sehen, stellt sich nach dem Aufheizvorgang eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Werkzeug ein, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine anfänglich ungleichmäßige Temperaturverteilung keinen Einfluss auf die Pressergebnisse hat. Abbildung 6.4 c) zeigt eine gleichmäßige und homogene Abkühlung des Werkzeugs.

Durch die Vorversuche zeigt sich somit eine gleichmäßige Temperaturverteilung am Presswerkzeug nach dem Aufheizprozess und während der Abkühlung. Aufgrund der ungleichmäßigen Temperaturen in der Aufheizphase des Werkzeugs wird für die Hauptversuche der Parameterstudie gefordert, dass das Thermoelement immer an der

gleichen Messstelle angebracht werden muss, um vergleichbare Temperaturverläufe zu ermitteln.

6.2 Versuchsplanung und Methode zur Untersuchung des Pressprozesses

Wie schon bei der Untersuchung des Tapelegeprozesses in Kapitel 5, war es Ziel dieser Untersuchung, die Wirkung und Signifikanz der Verarbeitungsparameter (Kernparameter) für eine Minimierung des PVG mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung der Ergebnisse des Pressprozesses, systematisch zu identifizieren und einzuordnen. Auch für die Bewertung des Imprägnierfortschritts im Pressprozess wurde der PVG als Zielgröße festgelegt und untersucht, indem Schliffbilder der Probenquerschnitte mit Hilfe eines Lichtmikroskops erstellt und analysiert wurden. Die Pressversuche werden an Probekörpern durchgeführt, welche durch die Ablage von TPT im vorangegangenen Prozessschritt erzeugt wurden. Die Prozessparameter des Ablageprozesses entsprechen der Faktorstufenkombination TL6, welche zu den geringsten PVG in der Preform führten (vgl. Kapitel 5.3.1).

6.2.1 Statistische Versuchsplanung des Pressprozesses

Auch bei dem Pressprozess werden die Kernprozessparameter als Faktoren statistisch untersucht. Im variothermen Pressprozess sind dies die Werkzeugtemperatur T_{wz} , der Werkzeuginnendruck p_w und die Imprägnierzeit t_i .

Die für die statistische Versuchsplanung ermittelten Parameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Übersicht der Prozessparameter des Pressprozesses (Faktoren für die statistische Versuchsplanung)

	Parameter	Niedrige Stufe (-)	Hohe Stufe (+)
Faktoren (variable Prozessparameter)	Werkzeugtemperatur T_{wz}	230 °C	270 °C
	Werkzeuginnendruck p_w	15 bar	20 bar
	Imprägnierzeit t_i	120 s	240 s

Die Wahl der Faktorstufen wird auch hier durch prozess- und anlagenspezifische Randbedingungen beschränkt, die im Folgenden erläutert werden.

- Für die Imprägnierzeit wird definiert, dass die Imprägnierung eines Pressversuchs mit dem Erreichen der Schmelztemperatur des verwendeten

Polymers von 223 °C [121] startet, und endet, wenn diese Temperatur beim Abkühlen wiederum unterschritten wird. Somit entsteht die erste Randbedingung, bei der gefordert wird, dass in der Mitte des Werkzeugaußenrings eine Temperatur von mindestens 223 °C gemessen werden muss. Die untere Faktorstufe der Werkzeugtemperatur T_{wz} wird dieser Forderung entsprechend auf 230 °C festgelegt. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass eine minimale Haltezeit der Werkzeugtemperatur bei einer Zieltemperatur von 230 °C von 120 s erreicht werden kann (inklusive Aufheiz- und Abkühlzeit von 220 °C ausgehend). Die untere Stufe der Imprägnierzeit t_i wird folglich auf 120 s festgelegt.

- Um eine möglichst hohe Werkzeugtemperatur bei der kurzen Imprägnierzeit von 120 s zu erzielen, wird die Plattentemperatur der Laborpresse auf 340 °C gestellt (Degradationstemperatur der verwendeten Matrix 380 °C [121]). Hierbei wird innerhalb von zwei Minuten (Aufheizung und Abkühlung) eine Werkzeugtemperatur von maximal 270 °C erreicht, welche somit als obere Faktorstufe gilt. Weiterhin wurde in Voruntersuchungen festgestellt, dass bei einer Imprägnierzeit von 240 s noch keine vollständige Imprägnierung erreicht wird, sodass der Effekt der anderen Prozessparameter bei dieser hohen Stufe der Imprägnierzeit bewertet werden kann.
- Die Presskraft der Laborpresse (mögliche Presskraft max. 5 kN) wurde auf 3 kN (untere Stufe) und 4 kN (obere Stufe) festgelegt, was bei einem Werkzeugdurchmesser von 50 mm einem Werkzeuginnendruck von ca. 15 bar (15,28 bar), bzw. 20 bar (20,37 bar) entspricht.

Da die erreichbare Werkzeugtemperatur in direkter Abhängigkeit zu der Imprägnierzeit und der Plattentemperatur der Laborpresse steht, wurden für die verschiedenen Parameterkombinationen unterschiedliche Plattentemperaturen gewählt. Tabelle 10.4 im Anhang fasst alle aus den Vorversuchen hervorgegangenen, erforderlichen Plattentemperatureinstellung für die jeweilige Werkzeugtemperatur und Imprägnierzeit zusammen.

Die drei Faktoren T_{wz} , p_w und t_i des Pressprozesses werden, wie schon die Faktoren des Tapelegeprozesses, in einem vollfaktoriellen 2^3 -Versuchsplan mit

8 Faktorstufenkombinationen kombiniert. Der vollständige Versuchsplan ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Volfaktorieller 2^3 -Versuchsplan für den Pressprozess mit den festgelegten Parametereinstellungen

Syst. Nr.	T_{wz} in °C		p_w in bar		t in s		Ergebnis (PVG in %)
P1	230	-	15	-	120	-	y1
P2	270	+	15	-	120	-	y2
P3	230	-	20	+	120	-	y3
P4	270	+	20	+	120	-	y4
P5	230	-	15	-	240	+	y5
P6	270	+	15	-	240	+	y6
P7	230	-	20	+	24s	+	y7
P8	270	+	20	+	240	+	y8
P0	250		17,5		180		y9

Die acht Faktorstufenkombinationen (P1 bis P8) bilden einen Versuchsblock, welcher insgesamt dreimal wiederholt wird, um ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis (Mittelwert der PVG) zu erhalten. Um die Imprägnierung mit Erreichen der Schmelztemperatur der Matrix zu gewährleisten und Einflüsse unterschiedlicher Starttemperaturen zu vermeiden, wurde der Prozessdruck bei jedem Versuch im Pressprozess vor dem Erreichen der Schmelztemperatur bei einer Werkzeugtemperatur von ca. 150 °C auf den Wert der entsprechenden Faktorstufe erhöht.

Wie bei dem Tapelegeprozess wird auch beim Pressprozess ergänzend zu den in Tabelle 6.2 dargestellten Faktorstufenkombinationen eine weitere Faktorstufenkombination mit der Bezeichnung P0 definiert und untersucht. Analog zu der Definition im Tapelegeprozess (vgl. Kapitel 5.2.1) wird diese Faktorstufenkombination als Mittelwert der entsprechenden Faktoren der Faktorstufenkombinationen, welche zu dem höchsten und niedrigsten Ergebnis (PVG) führen, definiert (Festlegung der Faktorstufenkombinationen nach der Auswertung in Kapitel 6.3.1, Werte wurde in der Tabelle 6.2 bereits übernommen). Durch einen Vergleich des Gesamtmittelwerts aller Ergebnisse und dem Ergebnis der gemittelten Faktorstufenkombination P0 kann abgeschätzt werden, ob lineare Zusammenhänge

innerhalb des gewählten Parameterbereichs bestehen, oder eventuelle Extremwerte übergangen wurden.

6.2.2 Schliffbildanalyse und -auswertung der Pressproben

Zur optischen Analyse und der Ermittlung des PVG, wurde aus der Mitte der gepressten Proben ein ca. 20 mm breites Stück quer zur Faser herausgetrennt und in ein transparentes Einbettharz (Harz *EpoFix Resin* und Härter *EpoFix Hardener* der Firma *Struers*) gebettet. Eine Einbettung unter Vakuum, wie bei den Proben des Tapelegeprozesses, ist nicht erforderlich, da die Proben ausreichend gut imprägniert sind und die Stabilität der Probekörper (Fixierung der Einzelfilamente) gegeben ist.

Für jede Faktorstufenkombination (Versuchssystem) wurden insgesamt 30 PVG mittels Grauwertanalyse ermittelt, indem je Faktorstufenkombination drei Pressproben hergestellt und nach der Einbettung jeweils an 10 Stellen analysiert wurden. Bei jedem Einzelbild handelt es sich um eine Lichtmikroskopaufnahme (Mikroskop der Firma *Leica*), wie in Abbildung 4.9 beispielhaft dargestellt. Porenbereiche, die weder Matrix noch Glasfasern enthalten, zeigen sich hier als schwarze Flächen (vgl. Abbildung 6.5, links). Zur automatischen Erkennung dieser Bereiche durch die Grauwertanalyse, wurde zunächst manuell definiert, welche Grauwertbereiche als Poren erkannt werden sollen. Anschließend wurden diese Bereiche durch eine Software (*Leica Application 4.5*) für jedes Einzelbild, wie in Abbildung 6.5 (rechts) zu sehen, markiert.

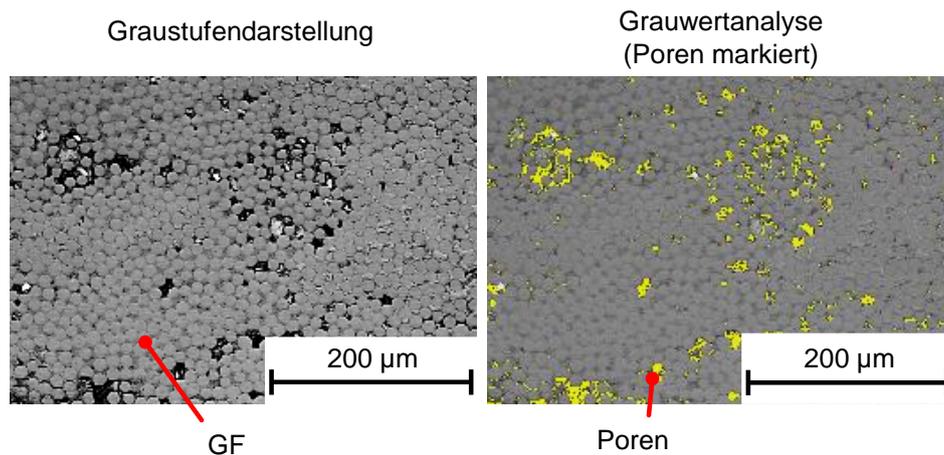


Abbildung 6.5: Lichtmikroskopaufnahme eines Schlifffbildes mit Imprägnierungsfehlern (Poren) ohne farbige Markierung (links) und mit markierten Poren (rechts)

Der Flächenanteil der markierten Bereiche wird anschließend erfasst und ein Mittelwert aus den Flächenanteilen aller 10 Einzelbilder je Probe gebildet.

6.3 Ergebnisse und Auswertung des Pressprozesses

Die gemessenen Temperatur- und Druckprofile der untersuchten Faktorstufenkombinationen sind auszugsweise in Abbildung 10.3 im Anhang dargestellt. Da die Presskraft keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf hat, beschränkt sich die Darstellung auf vier Faktorstufenkombinationen, jeweils bei einem Druck von 15 bar. In Abbildung 6.6 ist eine Übersicht der erreichten, mittleren Imprägnierzeiten und Werkzeugtemperaturen dargestellt.

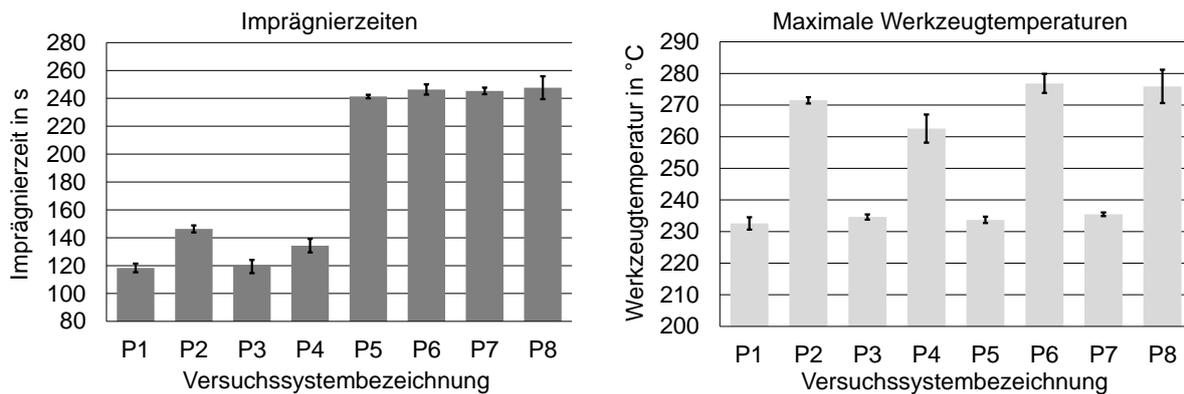


Abbildung 6.6: Durchschnittliche Imprägnierzeit (links) und durchschnittliche, maximale Werkzeugtemperatur (rechts) aller durchgeführten Pressversuche

Bis auf das Versuchssystem P2 wurde die geplante Imprägnierzeit mit nur geringen Abweichungen erreicht. Hierbei wird angenommen, dass die festgestellten Abweichungen, auch die des Versuchs P2, keine Verfälschung des vollfaktoriellen Versuchsplanes bewirken, da trotz Abweichungen ein deutlicher Unterschied zwischen der Faktorstufe mit niedriger Imprägnierzeit (120 s) und hoher Imprägnierzeit (240 s) besteht. Hinsichtlich der Werkzeugtemperatur zeigt sich, dass die maximale Werkzeugtemperatur von 270 °C bei gleichzeitig kurzer Imprägnierzeit (Versuchssystem P2 und P4) erreicht werden konnte, auch wenn bei Versuchssystem P4 eine merkliche Abweichung erkennbar ist. Da der Temperaturverlauf sich dem Maximum in kurzen Zeiträumen nur annähert und somit nicht exakt bei einer Temperatur gehalten werden kann, können sich somit Abweichungen bei den erreichten Maximaltemperaturen ergeben. Für die erreichten Werkzeugtemperaturen und gemessenen Schwankungen wird jedoch keine Verfälschung der statistischen Versuchsauswertung erwartet, da die Unterschiede der zu vergleichenden Mittelwerte deutlich ausgeprägt sind.

6.3.1 Ergebnisse der Schlibbildanalyse der Pressproben

Die Mittelwerte des PVG jeder Faktorstufenkombination sind sortiert nach der Höhe des PVG in Abbildung 6.7 dargestellt.

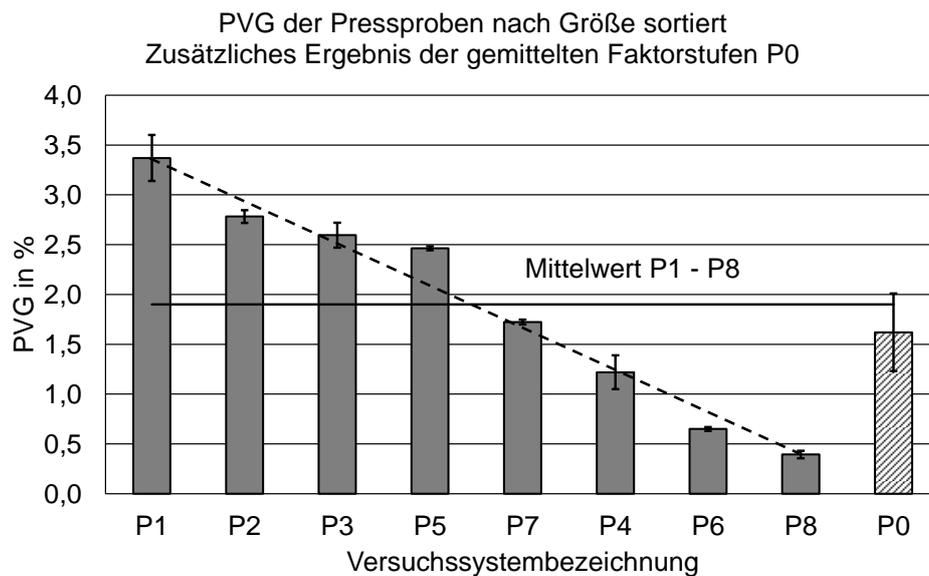


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Phasenanalyse der Schliffproben des Pressprozesses sortiert von höchstem zu kleinstem PVG

Wie schon bei den Ergebnissen des Tapelegeprozesses, liegen auch die gemittelten Ergebnisse der Phasenanalyse des Pressprozesses annähernd normalverteilt vor (siehe Abbildung 6.7), wodurch auch für den Pressprozess eine gute Aussagefähigkeit der späteren statistischen Auswertung zu erwarten ist.

Analog zu dem Vorgehen bei der Auswertung des Tapelegeprozesses und entsprechend der Definition in Kapitel 6.2.1 werden die Faktoren des Versuchs P0 als Mittelwert der Versuche P1 und P8 gebildet. Diese ergeben sich somit zu einer T_{wz} von 250 °C, einem p_w von 17,5 bar sowie einer t_i von 180 s. Das Ergebnis des Versuchs P0 liegt mit den Messwertschwankungen noch nahe an dem Gesamtmittelwert der Versuche P1 bis P8, wodurch auch für den Pressprozess ein lineares Verhalten innerhalb des gewählten Parameterbereichs vorausgesetzt werden kann.

Die Messwerte zeigen weiterhin, dass der höchste PVG mit durchschnittlich 3,37 %, bei allen Faktoren auf niedriger Stufe erreicht wurde (P1). Dagegen wurde der geringste PVG von 0,39 % bei der Faktorstufenkombination erzielt, bei der alle Faktoren auf der hohen Stufe standen (P8).

Abbildung 6.8 zeigt Lichtmikroskopaufnahmen einer Probe des Versuchssystems P1 mit einem PVG von 3,37 % (links) und einer Probe des Versuchssystems P8 mit einem PVG von 0,39 %.

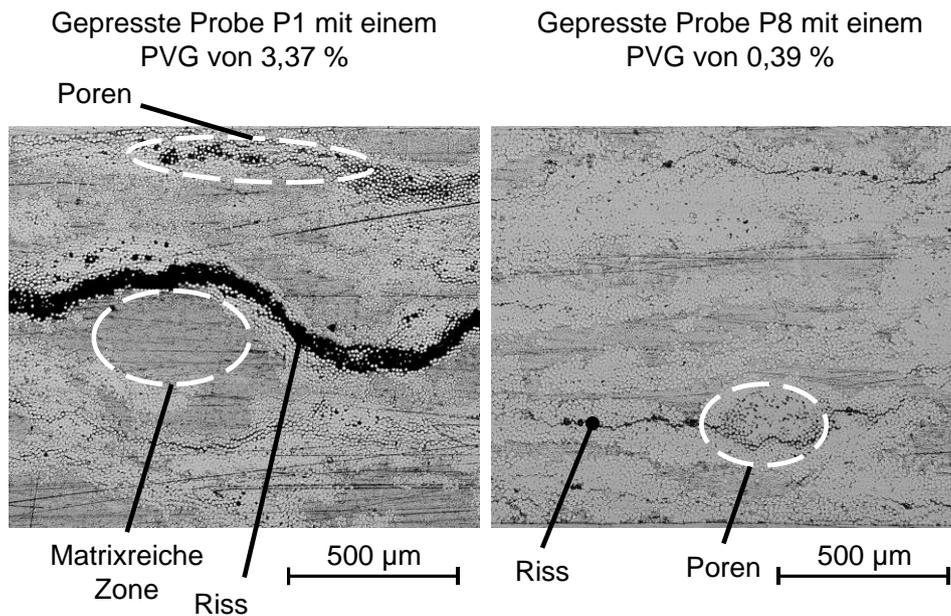


Abbildung 6.8: Lichtmikroskopaufnahmen von Pressproben mit dem höchsten PVG (links) und dem niedrigsten PVG (rechts)

Die linke Aufnahme in Abbildung 6.8 (P1) zeigt im Vergleich zu der rechten Aufnahme (P8) große, matrixreiche Zonen und Porenansammlungen in den Kernbereichen der Faserbündel. Dies weist auf einen nicht vollständig abgeschlossenen Imprägnierungsvorgang dieser Pressprobe hin. Die Probe des Versuchssystems P8 zeigt eine deutlich homogenere Verteilung der Faser- und Matrixbereiche sowie eine geringere Porenkonzentration in den Kernen der Faserbündel. Neben unterschiedlich hohen Porenanteilen unterscheiden sich diese beiden Proben durch erkennbare Risse. Die Rissgröße und -häufigkeit ist dabei besonders bei Proben mit einem hohen PVG verstärkt ausgeprägt. Die Rissbildung ist möglicherweise auf thermische Dehnung und Schrumpf während des Aufheiz- bzw. Abkühlvorgangs des Werkzeuges zurückzuführen. Dabei können innerhalb des Bauteils Druckspannungen und Scherkräfte zwischen den Fasern und der Matrix entstehen, die besonders in Bereichen mit geringem Imprägnierungsfortschritt und einer schlechten Faser-Matrix-Anhaftung, wie in den Kernbereichen der Faserbündel, zur Rissbildung im Verbund führen können. In diesen Bereichen treffen weiterhin die Fließfronten bei der Mikroimprägnierung aufeinander, sodass bei unzureichender Prozessdauer und -temperatur Nahtstellen entstehen können, die als mechanische Schwachstellen einzuordnen sind.

6.3.2 Statistische Auswertung des Pressprozesses

Auch für den Pressprozess wurden die Haupteffekte der Werkzeugtemperatur T_{wz} , der Imprägnierzeit t_i und des Werkzeuginnendrucks p_w , sowie deren Wechselwirkungseffekte berechnet und bewertet. Zur Bewertung und zur Bestimmung der Signifikanz der Effekte wurden, entsprechend der Formeln in Kapitel 2.5 und der Beschreibung in Kapitel 5.3.2, die drei Konfidenzintervalle berechnet. Die Haupt- und Wechselwirkungseffekte, sowie die Konfidenzintervalle des Pressprozesses sind als Übersicht in Abbildung 6.9 dargestellt. Die vollständigen Versuchsergebnisse (Messwerte, Mittelwerte und Einzelvarianzen) sind in Tabelle 10.6 im Anhang aufgelistet.

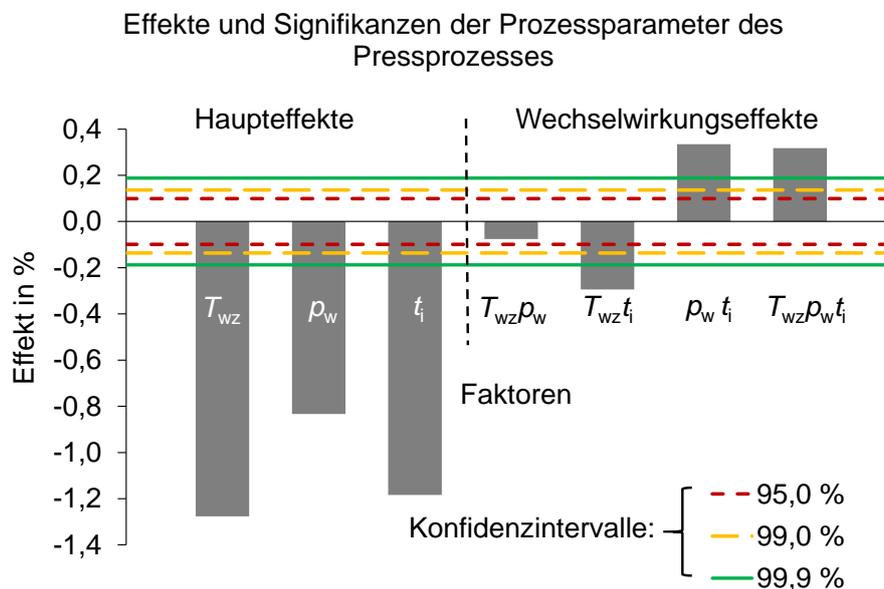


Abbildung 6.9: Ergebnisse (Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte) der statistischen Versuchsauswertung des Pressprozesses

Wie in Abbildung 6.9 ersichtlich, überragen alle Werte der Haupteffekte das 99,9 % Vertrauensintervall und zeigen somit eine hohe Signifikanz bezüglich der Verringerung des PVG (ein negativer Effekt bedeutet auch für den Pressprozess eine Reduzierung des PVG). Den stärksten Effekt auf eine verringerte Porenbildung zeigt eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur T_{wz} von 230 °C auf 270 °C. Dabei wurde der PVG um durchschnittlich 1,28 Prozentpunkte (Pp) reduziert. Auch eine Erhöhung der Imprägnierzeit t_i von 120 s auf 240 s zeigte einen starken Effekt mit einer durchschnittlichen Reduzierung des PVG um 1,18 Pp. Den geringsten, dennoch

signifikanten, Effekt bewirkte eine Erhöhung des Werkzeuginnendrucks p_w von 15 bar auf 20 bar mit einer Verringerung des PVG um durchschnittlich 0,83 Pp.

Der Wechselwirkungseffekt der Werkzeugtemperatur und der Imprägnierzeit $T_{wz}t_i$ zeigt, dass die Erhöhung der T_{wz} in Kombination mit einer erhöhten t_i eine hochsignifikante Verstärkung der Reduzierung des PVG bewirkt (-0,29 Pp).

Die Wechselwirkung zwischen dem Werkzeuginnendruck und der Imprägnierzeit $p_w t_i$ verursachte hingegen einen hochsignifikanten, positiven Effekt (0,34 Pp). Die gemeinsame Erhöhung beider Prozessparameter führt somit zu einer Abschwächung des Effektes der Verringerung des PVG, auch wenn die separate Betrachtung beider Parameter jeweils zu einer hochsignifikanten Reduzierung des PVG führen. Dabei sei angemerkt, dass es sich bei einer solchen statistischen Betrachtung nicht um absolute Werte, sondern um Tendenzen handelt. So bewirkt eine Erhöhung beider Faktoren eine Reduzierung des PVG, jedoch nicht in der Größenordnung, wie es die Effekte der Einzelfaktoren vermuten lassen.

Auch bei der dreifachen Wechselwirkung aller Parameter $T_{wz}p_w t_i$ ist der Effekt mit 0,32 Pp positiv und hochsignifikant. Bei gleichzeitiger Erhöhung aller drei Parameter wird somit, entgegen der Erwartung ausgehend von den Haupteffekten, ein abgeschwächter Effekt bewirkt.

Der Wechselwirkungseffekt zwischen der Werkzeugtemperatur und des Werkzeuginnendrucks $T_{wz}p_w$ ist negativ (- 0,08 Pp), lag jedoch innerhalb des 95 % Vertrauensintervalls und galt damit als unabhängig. Dies bedeutet, dass sich die Haupteffekte der Temperatur und des Drucks nicht gegenseitig beeinflussen, wenn diese Faktoren gleichzeitig erhöht werden.

Der geringste PVG (0,39 %) und damit höchste Imprägnierfortschritt resultierte aus der Faktorstufenkombination, bei der alle Faktoren auf der hohen Stufe standen (Versuchssystem P8). Die statistische Versuchsauswertung zeigte, dass jede Stufenerhöhung der Werkzeugtemperatur, des Werkzeuginnendrucks und der Imprägnierzeit hochsignifikante Effekte einer verringerten Porenbildung bewirken, wobei die Werkzeugtemperatur und die Imprägnierzeit die stärksten Effekte verursachen und sich gegenseitig in ihrem Effekt verstärken, wenn sie gleichzeitig erhöht werden.

7 Einfluss der Vorimprägnierung im Preformingprozess (Tapelegen) auf die Imprägnierung im Pressprozess

Wie die Untersuchungen in Kapitel 5 ergeben haben, führt die Verarbeitung der TPT im Tapelegeprozess im untersuchten Parameterbereich zu stark unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich des PVG (Imprägnierfortschritt). Die Ergebnisse erstrecken sich dabei von ca. 70 % PVG (TL7) bis zu ca. 28 % PVG (TL6).

In dieser abschließenden Studie soll die Auswirkung dieser deutlich unterschiedlichen Stufen der Vorimprägnierung und der damit verbundenen unterschiedlichen Preformstruktur auf das finale Imprägnierergebnis nach dem Pressprozess untersucht werden. Somit wird die Querverbeeinflussung des Prozesses Tapelegen auf den Prozess Pressen identifiziert und bewertet.

Zunächst erfolgt die Versuchsplanung zur Untersuchung der Querverbeeinflussung des Tapelegeprozesses auf den Pressprozess, anschließend die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse.

7.1 Versuchsplanung zur Untersuchung der Querverbeeinflussung des Preformingprozesses auf den Pressprozess

Innerhalb der Versuchsreihe sollen unterschiedlich vorimprägnierte Preforms mit unterschiedlichen Pressparametern in Form von drei Faktorstufenkombinationen je Prozess (Tapelegen und Pressen) verarbeitet und analysiert werden. Die Faktorstufenkombinationen der Einzelprozesse sollen denjenigen entsprechen, welche in den jeweiligen Prozessen den höchsten und niedrigsten PVG hervorgebracht haben (Kombination der Extremwerte). Zusätzlich soll der Mittelwert beider Extremwerte als dritte Faktorstufenkombination untersucht werden. So können Preforms mit einem hohen, mittleren und niedrigen PVG jeweils mit hohen, mittleren und niedrigen Pressparametern (entsprechend ihrer signifikanten Wirkung auf den PVG) verarbeitet und der Imprägnierfortschritt im Pressprozess in Abhängigkeit der Vorimprägnierung bewertet werden.

7.1.1 Parameter Tapelegeprozess

Die Faktoreinstellungen des Tapelegeprozesses sind übersichtlich in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1: Bezeichnungen und Faktorstufen des Tapelegeprozesses

Bezeichnung	Heißgasvolumenstrom H_v	Vorschubgeschwindigkeit v_w	Systemdruck Konsolidierungsrolle p_k	Temperatur Konsolidierungsrolle T_k	Temperatur Werkzeugplatte T_w
T-	3 NI/min	6 m/min	4 bar	40 C	60 °C
T₀	4 NI/min	4,5 m/min	4 bar	40 C	60 °C
T+	5 NI/min	3 m/min	4 bar	40 C	60 °C

Die neu definierte Faktorstufenkombination T- entspricht nach Kapitel 5.3.1 der Faktoreinstellung des Tapelegeprozesses bei höchstem gemessenem PVG (TL7), T₊ bezeichnet entsprechend die Faktoreinstellung mit geringstem PVG (TL6). T₀ entspricht den gemittelten Faktorstufen TL0. Parameter Pressprozess

7.1.2 Parameter Pressprozess

Die Faktoreinstellungen des Pressprozesses sind als Übersicht in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Bezeichnungen und Faktorstufen des Pressprozesses

Bezeichnung	Werkzeugtemperatur T_{wz}	Werkzeuginnendruck p_w	Imprägnierzeit t_i
P-	230 °C	15 bar	120 s
P₀	250 °C	17,5 bar	180 s
P+	270 °C	20 bar	240 s

Entsprechend der Vorgehensweise bei der Parameterauswahl des Tapelegeprozesses wurde auch beim Pressprozess auf die Faktoreinstellungen mit höchstem und geringstem Ergebnis (PVG) zurückgegriffen (siehe Kapitel 6.3.1). Dabei entspricht P- der Faktoreinstellung P1 und P₊ der Faktoreinstellung P8. P₀ bezeichnet hierbei die gemittelten Faktorstufen P0.

Die drei Faktorstufenkombinationen des Tapelegeprozesses werden vollständig mit den drei Faktorstufenkombinationen des Pressprozesses zu der in Tabelle 7.3 dargestellten 3x3 Versuchsmatrix kombiniert.

Tabelle 7.3: Versuchsmatrix der untersuchten Parameterkombinationen

	T-	T ₀	T ₊
P-	T-P-	T ₀ P-	T ₊ P-
P ₀	T-P ₀	T ₀ P ₀	T ₊ P ₀
P ₊	T-P ₊	T ₀ P ₊	T ₊ P ₊

Da die Untersuchung des Pressprozesses in Kapitel 6 mit Preforms der Parameterkombination TL6 (T₊) durchgeführt wurde, entspricht die Spalte T₊ den Ergebnissen P1 (T₊P₋), P0 (T₊P₀) und P8 (T₊P₊) aus Kapitel 6.3.1.

7.2 Ergebnisse und Bewertung der Querverbeeinflussung des Preformingprozesses auf den Pressprozess

Die Versuchsdurchführung und Auswertung der Pressproben mittels Schlibbildanalyse fand analog zu dem Vorgehen in Kapitel 6.2.2 statt und wird an dieser Stelle nicht weiter beschrieben. Die durchschnittlichen PVG der verwendeten Preforms entsprechen den Ergebnissen der Versuche TL7 (T-), TL0 (T₀) und TL6 (T₊) aus Kapitel 5.3.1, welche in Abbildung 7.1 nochmals zusammenfassend dargestellt sind.

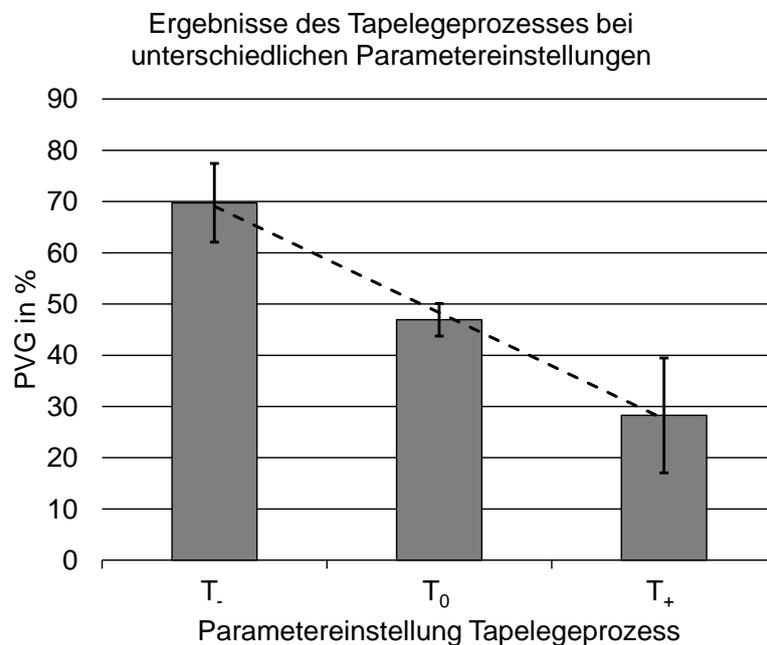


Abbildung 7.1: Durchschnittlicher PVG der Preforms T-, T₀, und T₊ hergestellt im Tapelegeprozess

Die gemittelten Ergebnisse der Schlibbildanalyse der nach der Versuchsmatrix (Tabelle 7.3) hergestellten Pressproben sind in Abbildung 7.2 dargestellt, wobei die

Ergebnisse nach den Parameterstufen des Tapelegeprozesses gruppiert sind (jeder Block bildet eine Spalte der Versuchsmatrix in Tabelle 7.3 ab).

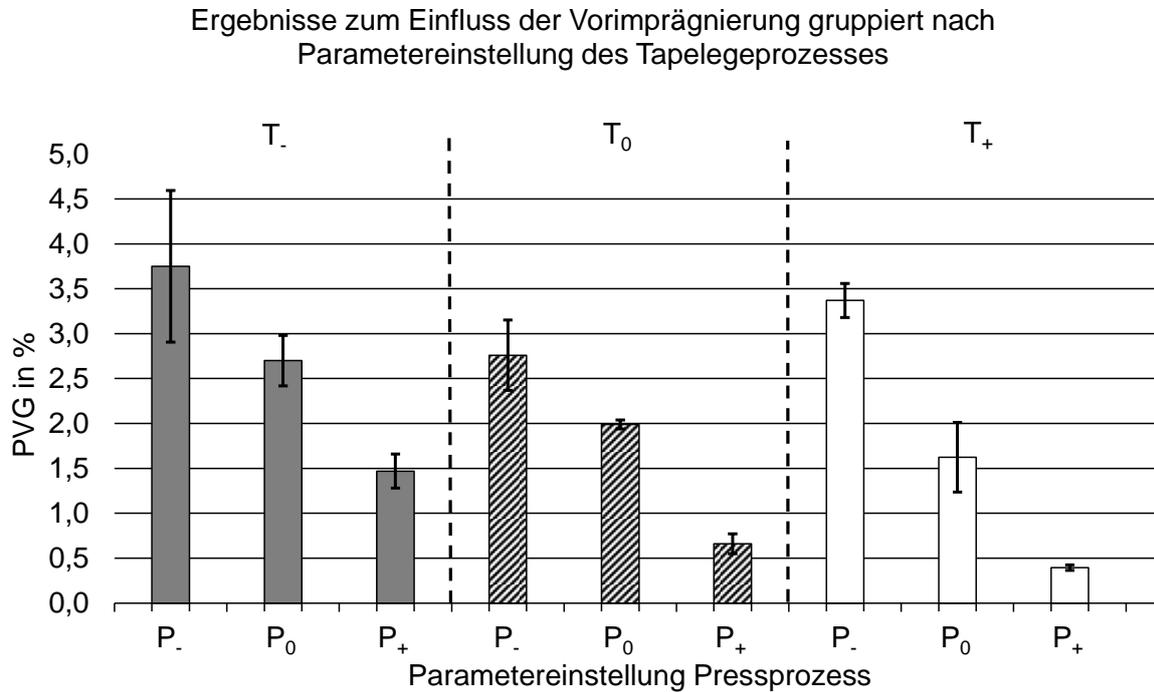


Abbildung 7.2: Gemittelte Ergebnisse (PVG) der Pressproben, gruppiert nach der Parametereinstellung des Tapelegeprozesses

Den Ergebnissen in Abbildung 7.2 ist zunächst der starke, bereits in Kapitel 5.3.2 festgestellte Einfluss der Pressparameterwahl auf das Imprägnierergebnis (geringer PVG) zu entnehmen. Weiterhin ist ein tendenzieller Rückgang der PVG von Block T₋ bis Block T₊ erkennbar. Generell ist eine klare Dominanz des Pressprozesses auf die Imprägnierung feststellbar, die Vorimprägnierung durch den Tapelegeprozess scheint sich in deutlich schwächerer Form auf das Imprägnierergebnis auszuwirken. Eine Ausnahme bildet dabei das Ergebnis P₋ im Block T₀, welches einen überdurchschnittlich geringen PVG aufweist. Da die Stufen P₀ und P₊ über die Blöcke T₋ bis T₊ hinweg eine stetige Abnahme des PVG erkennen lassen, wird hier von einem Mess- oder Auswertungsfehler ausgegangen. Zur weiteren Betrachtung wird das Ergebnis T₀P₋ somit nicht berücksichtigt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Vorimprägnierung im Tapelegeprozess zu erreichen, wurden die Messwerte aus Abbildung 7.2 nach den Faktorstufen des Tapelegeprozesses und des Pressprozesses sortiert und je Faktorstufe ein Mittelwert gebildet. Für die Faktorstufen

des Tapelegeprozesses bedeutet dies, dass ein Mittelwert aus den Ergebnissen jeder Spalte der Versuchsmatrix in Tabelle 7.3 gebildet wurde. Aufgrund des vermuteten Fehlers (T_0P_-) werden die Stufen mit P- von der Mittelwertbildung ausgenommen. Analog dazu wurde für die Faktorstufen des Pressprozesses ein Mittelwert aus den Ergebnissen jeder Zeile der Versuchsmatrix berechnet. Weiterhin wurden die Mittelwerte auf den jeweils höchsten Wert des PVG (Parametereinstellung -) normiert. Somit ist ein direkter, relativer Vergleich beider Ansätze möglich, wobei nicht die absoluten Werte, sondern die prozentuale Abweichung vom Ausgangszustand (100 % des normierten Mittelwerts des PVG) in Betracht gezogen wird. Dieser Vergleich der normierten Mittelwerte ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

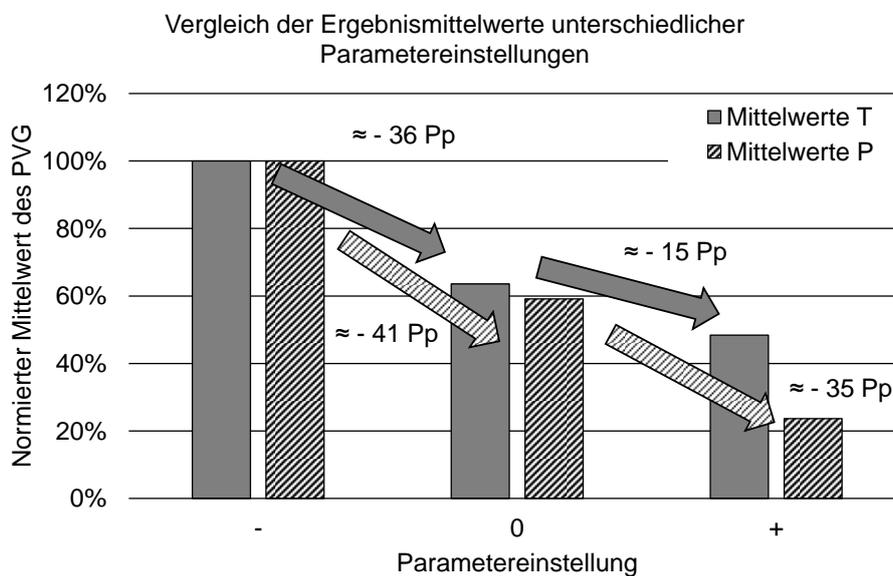


Abbildung 7.3: Vergleich der normierten Mittelwerte der Ergebnisse unterschiedlicher Parametereinstellungen für den Tapelege- und Pressprozess

Wie in Abbildung 7.3 ersichtlich, führt die Erhöhung der Parametereinstellung des Pressprozesses von P- auf P₀ und P₊ zu einer nahezu linearen Reduzierung des mittleren, normierten PVG um - 41 Prozentpunkte (Pp) bzw. - 35 Pp. Die Erhöhung der Tapelegeparameter von T- auf T₀ bewirkt zunächst einen ähnlich großen Effekt mit einer Verringerung des mittleren, normierten PVG um - 36 Pp, die Erhöhung der Tapelegeparameter von T₀ auf T₊ hat jedoch mit einer Verringerung um - 15 Pp einen deutlich schwächeren Einfluss auf eine weitere Reduzierung des PVG.

Unter Berücksichtigung der mittleren PVG der verwendeten Preforms, dargestellt in Abbildung 7.1, tritt diese starke Abschwächung des Preformeinflusses ab dem Unterschreiten des PVG von ca. 50 % auf. Dieser Wert entspricht auch der in Kapitel 5.3.1 qualitativ definierten Grenze, bei deren Unterschreitung ein Zusammenschluss der agglomerierten Matrixbereiche und damit eine als hinreichend definierte Makroimprägnierung stattfinden. Dies stützt somit die in Kapitel 5 gemachte Beobachtung, wonach im Tapelegeprozess eine Makroimprägnierung, jedoch keine signifikante Mikroimprägnierung erreicht wird. Bei einer Zusammenführung der Beobachtungen in Kapitel 5 und Kapitel 7 kann weiterhin gefolgert werden, dass eine fortschreitende Makroimprägnierung im Tapelegeprozess auch eine deutliche Verbesserung der Imprägnierung im Pressprozess bewirkt, da hier weniger Imprägnierleistung auf die Makroimprägnierung verwendet werden muss. Ist jedoch die Makroimprägnierung im Tapelegeprozess weitgehend abgeschlossen, so verbleibt im Pressprozess maßgeblich die Mikroimprägnierung, was zu einer deutlich abgeschwächten Wirkung der Preformkonfiguration auf das Imprägnierergebnis nach dem Pressprozess führt. Resultierend kann somit festgestellt werden, dass eine Imprägnierung in Tapelegeprozess bis zu einem PVG von ca. 50 % zu einer deutlichen Verbesserung des Imprägnierergebnisses im nachfolgenden Pressprozess führt und somit angestrebt werden soll. Eine weitere Vorimprägnierung im Tapelegeprozess führt im Sinne eines möglichst schlanken Gesamtprozesses jedoch nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Imprägnierqualität.

8 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die sequenzielle Imprägnierung von thermoplastischen Pulver-Towpregs innerhalb einer neuen, kombinierten Prozesskette zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste methodisch zu untersuchen und ein Prozessverständnis der Einzelprozessschritte hinsichtlich des Imprägnierfortschritts aufzubauen. Die Prozesskette umfasst die Verarbeitung von trockenen Rovings und von Polymerpulver zu Pulver-Towpregs, deren anschließende automatisierte Ablage im Tapelegeprozess zu vorimprägnierten Preforms und schließlich eine vollständige Imprägnierung im variothermen Pressprozess.

Zur Zielerreichung und Umsetzung der Prozesskette wurde eine Methode zur Herstellung von TPT im Labormaßstab auf Basis von GF Multi-End Rovings (2400 tex) und pulverförmigem PC/PBT konzeptioniert und untersucht. Eine neu entwickelte Pulverappliziereinheit ermöglichte dabei die Herstellung von beidseitig bepulverten TPT unter stabilen Prozessbedingungen, wobei der festgelegte theoretische FVG von 50 % (FTV von 1:1) mit einer Genauigkeit von ± 2 % erreicht werden konnte.

Zur Untersuchung und Bewertung der Prozessschritte des Tapelegens der TPT und des variothermen Pressens der so hergestellten Preforms bezüglich der Einflüsse der Kernprozessparameter auf den Imprägnierfortschritt im jeweiligen Prozess, wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung angewandt. Ausgehend von der Zielsetzung eines grundlegenden Prozessverständnisses hinsichtlich des Imprägnierfortschritts innerhalb der Einzelprozesse, wurde keine absolute Prozessoptimierung durchgeführt. Zur Bewertung des Imprägnierfortschritts wurde der PVG als Zielgröße der statistischen Versuchsplanung, sowohl für den Tapelege- als auch für den Pressprozess, definiert und geeignete Faktorstufen der Kernprozessparameter (Tapelegeprozess: Heißgasvolumenstrom, Vorschubgeschwindigkeit und Systemdruck Konsolidierungsrolle; Pressprozess: Werkzeugtemperatur, Werkzeuginnendruck und Imprägnierzeit) festgelegt.

Vor dem Hintergrund des Strebens nach hohen Ablegeraten im Tapelegeprozess wurde für diesen Prozessschritt vorrangig eine Makroimprägnierung (Imprägnierung der Grobstruktur der Verstärkungsfasern) zum Ziel gesetzt, die, verglichen mit der Mikroimprägnierung (Infiltration der Faserbündel und Benetzung der Einzelfilamente),

ein deutlich kürzeres Prozesszeitfenster benötigt. Die Verarbeitung der hergestellten TPT an einem Labortapeleger mit Halbzeugerwärmung durch eine Heißgasdüse zeigte zunächst, dass das thermoplastische Pulver die Funktion eines Bindermaterials (vergleichbar mit dem Binder innerhalb des DFP) übernehmen kann. Durch das Tapelegen der TPT konnten stabile und kompakte Preforms hergestellt werden, wobei die statistische Auswertung des Tapelegeprozesses eine hohe Signifikanz der Parameter Vorschubgeschwindigkeit (Ablegegeschwindigkeit) und Heißgasvolumenstrom hinsichtlich einer Verringerung des PVG zeigte (eine geringe Vorschubgeschwindigkeit und ein hoher Heißgasvolumenstrom wirkten sich positiv auf die Reduzierung des PVG aus). Die Preform mit dem geringsten PVG von ca. 28 % konnte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min, einem Systemdruck der Kompaktierungsrolle von 4 bar sowie einem Heißgasvolumenstrom von 5 NI/min hergestellt werden. Ein Vergleich mit dem Ausgangszustand des TPT zeigte, dass mit zunehmender Imprägnierung (Verringerung des PVG) auch eine erkennbare, strukturelle Veränderung der Matrixpolymerbereiche einhergeht. Liegen diese Bereiche bei den Proben mit hohem PVG noch vorwiegend in der im TPT feststellbaren, runden und agglomerierten Form vor, findet bei den Proben mit sinkendem PVG eine zunehmend starke Verflachung der Matrixbereiche statt. Diese Beobachtungen weisen auf die erwartete Makroimprägnierung der Preform im Tapelegeprozess und den damit verbundenen Fließvorgängen der Matrix in die Zwischenräume der Faserbündel hin. Dabei wurden ab einem FVG von ca. 50 % und weniger nahezu geschlossene (lückenlose) Matrixphasen beobachtet, sodass im späteren Pressprozess ein vorwiegendes Fließen in Dickenrichtung bei der Verarbeitung dieser Probekörper (Preforms) angenommen werden kann.

Ergänzend zu der statistischen Parameterstudie und entgegen der Zielsetzung einer vorwiegenden Makroimprägnierung, wurde weiterhin die Möglichkeit und Grenzen der Mikroimprägnierung innerhalb des Tapelegeprozesses untersucht. Dabei wurde der Einfluss der Werkzeugplattentemperatur T_w (60 °C bis 210 °C) auf den PVG der Preform isoliert betrachtet (alle weiteren Prozessparameter wurden konstant gehalten). Die Ergebnisse dieser ergänzenden Versuchsreihe zeigten eine lineare Reduzierung des PVG der hergestellten Preforms mit der Erhöhung der T_w im untersuchten Parameterbereich bis 180 °C (Versuche mit einer T_w von 210 °C konnten nicht durchgeführt, bzw. ausgewertet werden, da eine Verfestigung der Matrix nicht

gegeben war). Der PVG der Preforms konnte dabei von 29,62 % ($T_w = 60 \text{ °C}$) auf 15,10 % ($T_w = 180 \text{ °C}$) halbiert werden. Die Auswertung der Schlibfbilder zeigte, dass mit der Erhöhung der T_w und der erreichten Verringerung des PVG auch die Mikroimprägnierung des Rovings, bzw. der faserreichen Bereiche, verbessert wurde. Zusätzliche Temperaturmessungen zwischen den einzelnen Lagen der Preform lieferten Kenntnisse über den Temperaturverlauf in der Preform während des Ablegevorgangs. Im untersuchten Parameterbereich konnte dabei ein nahezu linearer Zusammenhang der Länge des Zeitfensters eines schmelzflüssigen Polymers und der T_w festgestellt werden (eine erhöhte T_w bewirkt eine Verlängerung des Zeitfensters). Eine Verbesserung der Imprägnierung wurde dabei nicht durch erneutes Aufschmelzen und Nachimprägnieren bereits abgelegter Lagen erreicht, da sich die gemessenen, maximalen Temperaturen in den Lagen der bereits abgelegten Preform unter der Konsolidierungsrolle deutlich unterhalb der Schmelztemperatur der Matrix befanden. Diese Feststellung schließt ein Nachimprägnieren und -konsolidieren der Preform, durch erneutes Aufschmelzen bereits abgelegter Lagen bei Überfahren des Tapelegekopfes, aus. Die Verbesserung der Imprägnierung und das Erreichen einer Mikroimprägnierung wird somit auf eine Verlängerung des Prozesszeitfensters und die damit einhergehende höhere, mittlere Temperatur, bzw. die Herabsetzung der Matrixviskosität, im direkten Bereich der Ablage zurückgeführt.

Die Studie zur Untersuchung der Verarbeitung und Imprägnierung der Preforms im Pressprozess wurde mit Preforms durchgeführt, die mit den Parametereinstellungen des geringsten PVG der statistischen Parameterstudie des Tapelegens von ca. 28 % hergestellt wurden. Die statistische Versuchsauswertung zeigte, dass jede Stufenerhöhung der Werkzeugtemperatur, des Werkzeuginnendrucks und der Imprägnierzeit hochsignifikante Effekte einer verringerten Porenbildung und damit eine gute Imprägnierung bewirken, wobei die Werkzeugtemperatur und die Imprägnierzeit die stärksten Effekte verursachen und sich gegenseitig in ihrem Effekt verstärken, wenn sie gleichzeitig erhöht werden. Das beste Ergebnis mit einem PVG von 0,39 % wurde dabei mit einer Werkzeugtemperatur von 270 °C, einem Druck von 20 bar und einer Imprägnierungszeit von 4 min erreicht.

In einer abschließenden Studie wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Stufen der Vorimprägnierung und der damit verbundenen unterschiedlichen

Preformstruktur nach dem Tapelegen auf das finale Imprägnierergebnis nach dem Pressprozess untersucht und bewertet. Dazu wurden unterschiedlich vorimprägnierte Preforms mit unterschiedlichen Pressparametern in Form von drei Faktorstufenkombinationen je Prozess (Tapelegen und Pressen) verarbeitet und analysiert. Die Faktorstufenkombinationen der Einzelprozesse entsprachen denjenigen, welche in den jeweiligen Prozessen den höchsten, mittleren und niedrigsten PVG hervorgebracht haben (Kombination der Extrem- und Mittelwerte). Die Erhöhung der Parametereinstellung des Pressprozesses (von der niedrigen, über die mittlere zur hohen Parametereinstellung) führt dabei zu einer nahezu linearen Reduzierung des mittleren, normierten PVG. Die Erhöhung der Tapelegeparameter von der niedrigen auf die mittlere Parametereinstellung bewirkt zunächst einen ähnlich großen Effekt der Verringerung des mittleren, normierten PVG nach dem Pressprozess. Eine weitere Erhöhung der Tapelegeparameter von der mittleren auf die hohe Parametereinstellung hat jedoch einen deutlich schwächeren Einfluss auf eine Reduzierung des PVG. Diese starke Abschwächung des Preformeinflusses tritt bei den Versuchen unterhalb eines PVG von ca. 50 % auf, was auch der im Tapelegeprozess qualitativ definierten Grenze, bei deren Unterschreitung ein Zusammenschluss der agglomerierten Matrixbereiche und damit eine als hinreichend definierte Makroimprägnierung stattfinden, entspricht. Bei Zusammenführung dieser Beobachtungen kann geschlossen werden, dass eine fortschreitende Makroimprägnierung im Tapelegeprozess auch eine deutliche Verbesserung der Imprägnierung im Pressprozess bewirkt, da hier weniger Imprägnierleistung auf die Makroimprägnierung verwendet werden muss. Ist jedoch die Makroimprägnierung im Tapelegeprozess weitgehend abgeschlossen, so verbleibt im Pressprozess vorwiegend die Mikroimprägnierung, was zu einer deutlich abgeschwächten Wirkung der Preformkonfiguration auf das Imprägnierergebnis nach dem Pressprozess führt.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der neuen, kombinierten Prozesskette ermöglichen ein grundlegendes Prozessverständnis der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der Imprägniermechanismen und –fortschritte, von der TPT-Herstellung über deren Ablage im Tapelegeprozess bis zur vollständigen Imprägnierung im variothermen Pressprozess.

9 Literatur

- [1] E. Witten, V. Mathes und Sauer, Michael, Kühnel, Michael, „Composites Marktbericht 2018: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., 2018.
- [2] E. Witten und A. Schuster, „Der Markt für Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) 2019: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., 2019.
- [3] R. Lässig *et al.*, „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau“, 2012.
- [4] C. Cherif, Hg., *Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen: Bindematerialien - Textile Preforms - Verbundbauteile ; Buch zum DFG-AiF-Clustervorhaben - Leichtbau und Textilien*. Dresden: Verl. Wissenschaftliche Skripten, 2013.
- [5] M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, Hg., *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [6] A. R. Offringa, „Thermoplastic composites—rapid processing applications“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 27, Nr. 4, S. 329–336, 1996.
- [7] M. Kropka, K. Selvaraj, T. Neumeyer und V. Altstädt, „Vom UD-Tape zum thermoplastischen Faserverbundprodukt“, *Lightweight Des*, Jg. 10, Nr. 3, S. 14–19, 2017.
- [8] C. Baley *et al.*, „Flax/PP manufacture by automated fibre placement (AFP)“, *Materials & Design*, Jg. 94, S. 207–213, 2016.
- [9] K. Friedrich und A. A. Almajid, „Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications“, *Appl Compos Mater*, Jg. 20, Nr. 2, S. 107–128, 2013.
- [10] D. J. Nestler, *Beitrag zum Thema Verbundwerkstoffe - Werkstoffverbunde: Status quo und Forschungsansätze*. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Habil.-Schr., 2013. Chemnitz, Münster: Univ.-Verl.; mv Monsenstein und Vannerdat, 2014.

- [11] A. Franck, *Kunststoff-Kompendium: Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste*, 6. Aufl. Würzburg: Vogel, 2006.
- [12] AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [13] M. Kropka, M. Muehlbacher, T. Neumeyer und V. Altstaedt, „From UD-tape to Final Part – A Comprehensive Approach Towards Thermoplastic Composites“, *Procedia CIRP*, Jg. 66, S. 96–100, 2017.
- [14] R. Schledjewski, „Thermoplastic tape placement process – in situ consolidation is reachable“, *Plastics, Rubber and Composites*, Jg. 38, 9-10, S. 379–386, 2013.
- [15] J. Mack und P. Mitschang, „Efficient and Flexible Technology for Binder Roving Manufacturing“, *KMUTNB: IJAST*, S. 1–8, 2015.
- [16] F. Kühn, J. Rehra, D. May, S. Schmeer und P. Mitschang, „Dry fiber placement of carbon/steel fiber hybrid preforms for multifunctional composites“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 117, S. 1–13, 2019.
- [17] F. Kühn, D. May, P. Mitschang, „Manufacturing of fiber reinforced thermoplastics via automated powder-towpreg placement and direct impregnation“. ITHEC 4th International Conference & Exhibition on Thermoplastic Composites, Bremen, 30 - 31 October, 2018.
- [18] P. Mitschang, M. Blinzler und A. Wöginger, „Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends“, *Composites Science and Technology*, Jg. 63, Nr. 14, S. 2099–2110, 2003.
- [19] F. Henning und E. Moeller, *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Hanser, 2011.
- [20] M. A. Khan, *Experimental and simulative description of the thermoplastic tape placement process with online consolidation*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2010.
- [21] G. Marsh, „Automating aerospace composites production with fibre placement“, *Reinforced Plastics*, Jg. 55, Nr. 3, S. 32–37, 2011.

- [22] R. Bezerra, „Fiber Placement Center - Joint Expertise for the Breakthrough of Fiber Placement Technologies in Large-Scale Production“. 4th International Composites Congress (ICC), Stuttgart, November 2018.
- [23] CompositesWorld, *Overview of AFP and ATL*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/knowledgecenter/AFP-ATL-Software/Overview-of-AFP-and-ATL>. Zugriff am: 09. Aug. 2019.
- [24] A. B. Hulcher, J. M. Marchello, J. A. Hinkley, N. J. Johnston, M. A. Lamontia, „Dry Ribbon for Heated Head Automated Fiber Placement“, *Science of Advanced Materials and Process Engineering Series*, Vol. 44, 1999.
- [25] F. HENNE, „Thermoplastic in situ fiber placement for future solid rocket motor casings manufacturing“. Research Campus Garching, September 11th - 12th 2014.
- [26] G. Beresheim, *Thermoplast-Tapelegen: Ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2002.
- [27] H. Janssen, T. Peters und C. Brecher, „Efficient Production of Tailored Structural Thermoplastic Composite Parts by Combining Tape Placement and 3d Printing“, *Procedia CIRP*, Jg. 66, S. 91–95, 2017.
- [28] R. Holschuh, *Lokal lastgerecht verstärkte Multimaterialsysteme auf Basis von Polypropylen-Polypropylen-Hybriden*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2014.
- [29] K. K. Chawla, *Composite materials: Science and engineering*, 3. Aufl. New York, NY: Springer, 2013.
- [30] O. Rimmel, D. Becker und P. Mitschang, „Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 2, 3-4, S. 93–102, 2016.
- [31] K. Völtzer, B. Denkena und L. Overmeyer, *Online-Prozessüberwachung von Automated Fiber Placement Prozessen auf Basis der Thermografie*. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover; TEWISS - Technik und Wissen GmbH, 2018.
- [32] R. H. Rizzolo und D. F. Walczyk, „Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 29, Nr. 11, S. 1480–1497, 2016.

- [33] *Fraunhofer IPT and Conbility to collaborate in advancing fiber and tape-placement systems - Fraunhofer IPT*. [Online] Verfügbar unter: https://www.ipt.fraunhofer.de/en/Press/Pressreleases/20180228_fraunhofer-ipt-and-conbility-to-collaborate-in-advancing-fiber-and-tape-placement-systems.html. Zugriff am: 27. Nov. 2019.
- [34] M. A. Khan, P. Mitschang und R. Schledjewski, „Tracing the Void Content Development and Identification of its Effecting Parameters during in Situ Consolidation of Thermoplastic Tape Material“, *Polymers and Polymer Composites*, Jg. 18, Nr. 1, S. 1–15, 2010.
- [35] T. Orth, „A review of radiative heating in automated layup and its modelling“, *Zeitschrift Kunststofftechnik*, Jg. 2, S. 91–125, 2017.
- [36] M. Lamontia *et al.*, „Manufacturing flat and cylindrical laminates and built up structure using automated thermoplastic tape laying, fiber placement, and filament winding“, *Sampe Journal*, Jg. 39, S. 30–38, 2003.
- [37] M. Lamontia und M. B. Gruber, „Remaining developments required for commercializing in situ thermoplastic atp“. International SAMPE Symposium and Exhibition, 2007.
- [38] F. Henne *et al.*, „THERMOPLASTIC IN SITU FIBER PLACEMENT FOR FUTURESOLID ROCKET MOTOR CASINGS MANUFACTURING“. SAMPE Europe, Tampere, 10-11 Sept. 2014.
- [39] F. Birte und Martin Regnet, „Automatisiertes Legen von faserverstärkten Thermoplasten in der Luft- und Raumfahrt“. 2. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium, Augsburg, 15. Mai, 2013.
- [40] S. G. Advani und E. M. Sozer, *Process modeling in composites manufacturing*, 2. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2011.
- [41] F. O. Sonmez und M. Akbulut, „Process optimization of tape placement for thermoplastic composites“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 38, Nr. 9, S. 2013–2023, 2007.
- [42] C. M. Stokes-Griffin und P. Compston, „The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon fibre–PEEK manufactured using a laser tape placement process“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 78, S. 274–283, 2015.

- [43] Z. Qureshi, T. Swait, R. Scaife und H. M. El-Dessouky, „In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities“, *Composites Part B: Engineering*, Jg. 66, S. 255–267, 2014.
- [44] Michael Kropka, Johann Reichstein, Thomas Neumeyer, Volker Altstaedt, „Effect of the pre-consolidation process on quality and mechanical properties of mono- and multi-material laminates based on thermoplastic UD-tapes“. 21st International Conference on Composite Materials (ICCM-21), Xi'an, 20 - 25 August, 2017.
- [45] Kühnel M., Schuster A., Buchheim A., Kießig T., Gerngross M., Kupke M., „Automatisiertes endkonturnahes Preforming Carbonfaser-Verstärker Thermoplaste mittels robotischer Halbzeugablage“. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Augsburg, 2014.
- [46] J. Mack, *Entwicklung eines adaptiven Online-Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2015.
- [47] B. Schrick, „Variable unidirectional material production in minimum space“, *Carbon Composites Magazin: die Mitgliederzeitschrift des CCEV*, Nr. 2, S. 58, 2014.
- [48] M. Belhaj *et al.*, „Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms“, *Composites Part B: Engineering*, Jg. 50, S. 107–111, 2013.
- [49] O. Rimmel, J. Mack, D. Becker und P. Mitschang, „Automated Direct Fibre Placement with Online Binder Application“, *Lightweight des worldw*, Jg. 10, Nr. 2, S. 48–53, 2017.
- [50] G. Gardiner, *Dry fiber placement: Surpassing limits*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/articles/dry-fiber-placement-surpassing-limits>. Zugriff am: 08. Aug. 2019.
- [51] G. Gardiner, *Resin-infused MS-21 wings and wingbox*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/articles/resin-infused-ms-21-wings-and-wingbox>. Zugriff am: 07. Aug. 2019.
- [52] A. Kolbe *et al.*, „Automated manufacturing of stiffened composite shells using dry fibre material“, *JEC Composites Magazine*, Jg. 54, S. 31–34, 2017.
- [53] M. Marquart, S. Stanglmaier, S. Bickerton, H.-P. Lang, C., „Development of an innovative preforming process for the high-volume automotive sector“. 12th

- International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM), Enschede, 14–16 July, 2014.
- [54] U. P. Breuer, *Commercial aircraft composite technology*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [55] B. Hannemann, *Multifunctional metal-carbon-fibre composites for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2017.
- [56] C. Mildner, *Numerische und experimentelle Untersuchungen des Crashverhaltens von FVK-verstärkten Metallstrukturbauteilen*. Dissertation, 1. Aufl. München: Dr. Hut, 2014.
- [57] Y. Swolfs, P. de Cuyper, M. G. Callens, I. Verpoest und L. Gorbatikh, „Hybridisation of two ductile materials – Steel fibre and self-reinforced polypropylene composites“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 100, S. 48–54, 2017.
- [58] B. Hannemann *et al.*, „Hybridisation of CFRP by the use of continuous metal fibres (MCFRP) for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures“, *Composite Structures*, Jg. 172, S. 374–382, 2017.
- [59] B. Hannemann, S. Backe, S. Schmeer, F. Balle und U. P. Breuer, „Metal fiber incorporation in carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for improved electrical conductivity“, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, Jg. 47, Nr. 11, S. 1015–1023, 2016.
- [60] U. P. Breuer, S. Schmeer und U. Eberth, „Carbon and Metal Fibre Reinforced Airframe Structures - a New Approach to Composite Multifunctionality“. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart, December 2013.
- [61] A. Wöginger, *Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2004.
- [62] P. Mitschang und K. Grebel, „Zykluszeitverkürzung bei der Verarbeitung von FKV durch den Einsatz variothermer Werkzeuge“. Carbon Composites Fachtagung, Augsburg, 2012.
- [63] F. Kühn *et al.*, „Ceramic pressing tool for variothermal processing of thermoplastic fiber composites“. ECCM 17, München, 26-30 June, 2016.
- [64] X. Wang, C. Mayer und M. Neitzel, „Some issues on impregnation in manufacturing of thermoplastic composites by using a double belt press“, *Polym. Compos.*, Jg. 18, Nr. 6, S. 701–710, 1997.

- [65] C. Mayer, *Prozeßanalyse und Modellbildung zur Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2000.
- [66] C. Mayer, X. Wang und M. Neitzel, „Macro- and micro-impregnation phenomena in continuous manufacturing of fabric reinforced thermoplastic composites“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 29, Nr. 7, S. 783–793, 1998.
- [67] U. I. Thomann, *Direct stamp forming of non-consolidated carbon/thermoplastic fibre commingled yarns*. Dissertation. Zürich: ETH Zurich, 2003.
- [68] U. I. Thomann und P. Ermanni, „The Influence of Yarn Structure and Processing Conditions on the Laminate Quality of Stampformed Carbon and Thermoplastic Polymer Fiber Commingled Yarns“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 17, Nr. 3, S. 259–283, 2004.
- [69] I. Y. Chang und J. K. Lees, „Recent Development in Thermoplastic Composites: A Review of Matrix Systems and Processing Methods“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 1, Nr. 3, S. 277–296, 2016.
- [70] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [71] J. P. Nunes, F. W. J. van Hattum, C. A. Bernardo, A. M. Brito, A. S. Pouzada, J. F. Silva und A. T. Marques, „Production of Thermoplastic Towpregs and Towpreg- Based Composites“ in *Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale*, K. Friedrich, S. Fakirov und Z. Zhang, Hg., Boston, MA: Springer Science+Business Media Inc, 2005, S. 190–213.
- [72] R. E. Allred, S. P. Wesson und D. A. Babow, „POWDER IMPREGNATION STUDIES FOR HIGH TEMPERATURE TOWPREGS“, *Sampe Journal Vol. 40, Part 6*, Nr. 40, 2004.
- [73] K. Friedrich, S. Fakirov und Z. Zhang, Hg., *Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale*. Boston, MA: Springer Science+Business Media Inc, 2005.
- [74] G. W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*, 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006.
- [75] A. P. D. Weustink, *Development of a rapid thermoplastic impregnation device*. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- [76] K. E. Goodman und A. C. Loos, „Thermoplastic Prepreg Manufacture“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 3, Nr. 1, S. 34–40, 2016.

- [77] F. H. Henninger, *Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2005.
- [78] S. R. IYER und L. T. DRZAL, „Manufacture of Powder-Impregnated Thermoplastic Composites“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 3, Nr. 4, S. 325–355, 2016.
- [79] K. Ramani, D. E. Woolard und M. S. Duvall, „An electrostatic powder spray process for manufacturing thermoplastic composites“, *Polym. Compos.*, Jg. 16, Nr. 6, S. 459–469, 1995.
- [80] K. K. C. Ho *et al.*, „Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing“, *Plastics, Rubber and Composites*, Jg. 40, Nr. 2, S. 100–107, 2013.
- [81] A. M. Vodermyer, J. C. Kaerger und G. Hinrichsen, „Manufacture of high performance fibre-reinforced thermoplastics by aqueous powder impregnation“, *Composites Manufacturing*, Jg. 4, Nr. 3, S. 123–132, 1993.
- [82] A. L. Ogden, M. W. Hyer, G. L. Wilkes und A. C. Loos, „The Development of an Alternative Thermoplastic Powder Prepregging Technique“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 5, Nr. 1, S. 14–31, 2016.
- [83] J. Pietschmann, *Industrielle Pulverbeschichtung: Grundlagen, Verfahren, Praxiseinsatz*, 4. Aufl. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [84] M. Rath, S. Kreuzberger und G. Hinrichsen, „Manufacture of aramid fibre reinforced nylon-12 by dry powder impregnation process“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 29, Nr. 8, S. 933–938, 1998.
- [85] J. F. Silva, J. P. Nunes, J. C. Velosa, C. A. Bernardo und A. T. Marques, „Thermoplastic matrix towpreg production“, *Adv. Polym. Technol.*, Jg. 29, Nr. 2, S. 80–85, 2010.
- [86] R. F. Silva, J. F. Silva, J. P. Nunes, C. A. Bernardo und A. T. Marques, „New Powder Coating Equipment to Produce Continuous Fibre Thermoplastic Matrix Towpregs“, *MSF*, 587-588, S. 246–250, 2008.
- [87] J. C. Velosa, J. P. Nunes, J. F. Silva, C. A. Bernardo und A. T. Marques, „Production of Thermoplastic Towpregs“, *MSF*, 636-637, S. 220–225, 2010.
- [88] Z. Han, Y. Fu, Y. Ma und H. Fu, „Modeling and analysis of heat transfer in fiber placement process of thermoplastic composites“. 3rd International Conference

- on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization (ICSEM), Chengdu, China, 20-21 Oct, 2012.
- [89] S. Tumkor, N. Turkmen, C. Chassapis und S. Manoochehri, „Modeling of heat transfer in thermoplastic composite tape lay-up manufacturing“, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Jg. 28, Nr. 1, S. 49–58, 2001.
- [90] M. Christmann, *Optimierung der Organoblechherstellung durch 2D-Imprägnierung*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2014.
- [91] R. Gennaro *et al.*, „Experimental measurement of transversal micro- and macro permeability during compression molding of PP/Glass composites“, *Polym. Compos.*, Jg. 35, Nr. 1, S. 105–112, 2014.
- [92] R. Gennaro, A. Greco und A. Maffezzoli, „Micro- and macro-impregnation of fabrics using thermoplastic matrices“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 26, Nr. 4, S. 527–543, 2012.
- [93] W. Krenkel, Hg., *Verbundwerkstoffe: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde ; [1. bis 3. April 2009 an der Universität Bayreuth]*, 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [94] V. MICHAUD und J.-A. E. MÅN SON, „Impregnation of Compressible Fiber Mats with a Thermoplastic Resin. Part I: Theory“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 35, Nr. 13, S. 1150–1173, 2001.
- [95] V. MICHAUD, R. TÖRNQVIST und J.-A. E. MÅN SON, „Impregnation of Compressible Fiber Mats with a Thermoplastic Resin. Part II: Experiments“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 35, Nr. 13, S. 1174–1200, 2001.
- [96] J.S.U. Schell, M. Deleglise, C. Binetruy, P. Krawczak und P. Ermanni, „Numerical prediction and experimental characterisation of meso-scale-voids in liquid composite moulding“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 38, Nr. 12, S. 2460–2470, 2007.
- [97] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Libraire des Corps Imperiaux des Ponts et Chaussées et des Mines, 1856.
- [98] P. J. Bates, D. Taylor und M. F. Cunningham, „Compaction and Transverse Permeability of Glass Rovings“, *Appl Compos Mater*, Jg. 8, Nr. 3, S. 163–178, 2001.

- [99] P. Nygard und C.-G. Gustafson, „Continuous Glass Fiber–Polypropylene Composites Made by Melt Impregnation: Influence of Processing Method“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 17, Nr. 2, S. 167–184, 2004.
- [100] K. Hildebrandt, *Material- und prozessspezifische Einflüsse auf Oberflächeneigenschaften von endlosfaserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2015.
- [101] L. Ye, V. Klinkmuller und K. Friedrich, „Impregnation and Consolidation in Composites Made of GF/PP Powder Impregnated Bundles“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 5, Nr. 1, S. 32–48, 1992.
- [102] B. R. Gebart, „Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 26, Nr. 8, S. 1100–1133, 1992.
- [103] D. Becker, *Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde*. Dissertation. Kaiserslautern: IVW GmbH, 2015.
- [104] T. G. Gutowski *et al.*, „Consolidation Experiments for Laminate Composites“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 21, Nr. 7, S. 650–669, 1987.
- [105] S. T. Jespersen, M. D. Wakeman, V. MICHAUD, D. Cramer und J.-A.E. Månson, „Film stacking impregnation model for a novel net shape thermoplastic composite preforming process“, *Composites Science and Technology*, Jg. 68, 7-8, S. 1822–1830, 2008.
- [106] R. Schledjewski und M. Latrille, „Processing of unidirectional fiber reinforced tapes—fundamentals on the way to a process simulation tool (ProSimFRT)“, *Composites Science and Technology*, Jg. 63, Nr. 14, S. 2111–2118, 2003.
- [107] J. A. Barnes und F. N. Cogswell, „Transverse flow processes in continuous fibre-reinforced thermoplastic composites“, *Composites*, Jg. 20, Nr. 1, S. 38–42, 1989.
- [108] S. Ranganathan, S. G. Advani und M. A. Lamontia, „A Non-Isothermal Process Model for Consolidation and Void Reduction during In-Situ Tow Placement of Thermoplastic Composites“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 29, Nr. 8, S. 1040–1062, 1995.
- [109] T. G. Rogers, „Squeezing flow of fibre-reinforced viscous fluids“, *Journal of Engineering Mathematics*, Jg. 23, Nr. 1, S. 81–89, 1989.

- [110] R. Balasubramanyam, R. S. Jones und A. B. Wheeler, „Modelling transverse flows of reinforced thermoplastic materials“, *Composites*, Jg. 20, Nr. 1, S. 33–37, 1989.
- [111] L. Ye, Z.-R. Chen, M. Lu und M. Hou, „De-consolidation and re-consolidation in CF/PPS thermoplastic matrix composites“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 36, Nr. 7, S. 915–922, 2005.
- [112] M. Connor, S. Toll, J.-A. E. MÅNSON und A. G. Gibson, „A Model for the Consolidation of Aligned Thermoplastic Powder Impregnated Composites“, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Jg. 8, Nr. 2, S. 138–162, 1995.
- [113] M. T. Connor, *Consolidation mechanisms and interfacial phenomena in thermoplastic powder impregnated composites*. Lausanne, EPFL.
- [114] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 9. Aufl. München, Wien: Hanser, 2016.
- [115] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: Springer, 2010.
- [116] T. Schäfer, *Statistik II: Inferenzstatistik*, 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [117] *Glasroving VETROTEX P185-EC14-2400 tex: Technische Daten*. [Online] Verfügbar unter: <https://shop1.r-g.de/art/205110>. Zugriff am: 21. Okt. 2019.
- [118] M. Flemming und S. Roth, *Faserverbundbauweisen Eigenschaften: Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [119] *Faserverstärkungen aus Glasfaser: Roving*. [Online] Verfügbar unter: https://www.lange-ritter.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Produkte/Glasfaser/Faserverstaerkungen_Glasfaser_Roving_19.pdf. Zugriff am: 21. Nov. 2019.
- [120] M. Christmann, L. Medina und S. Giehl, „BMBF-Forschungsvorhaben MultiKab (Förderkennzeichen 03X3036): Abschlussbericht : Berichtszeitraum: 01.05.2012-31.10.2015“, 2015.
- [121] *Makroblend® KU2-7912/4: Technisches Datenblatt*. [Online] Verfügbar unter: https://solutions.covestro.com/de/products/makroblend/makroblend-ku2-79124_56971932-00000504?SelectedCountry=DE. Zugriff am: 21. Okt. 2019.

- [122] H. Warth und D. Wittmann, „Polymerblends“, *Kunststoffe Plast Europe*, Jg. 89, S. 39–40, 1999.
- [123] N. P. Cheremisinoff, Hg. *Handbook of polymer science and technology*. New York: Dekker, 1989.
- [124] *Makroblend® KU2-7912/4: Sicherheitsdatenblatt*. [Online] Verfügbar unter: https://solutions.covestro.com/de/products/makroblend/makroblend-ku2-79124_56971932-00000504?SelectedCountry=DE. Zugriff am: 24. Okt. 2019.
- [125] Covestro Deutschland AG, *Datenblatt Makroblend® KU2-7912/4*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Makroblend%C2%AE+KU2-79124/Covestro+Deutschland+AG/22/5750ce4d>. Zugriff am: 06. Dez. 2019.
- [126] Elstein-Werk - www.elstein.com, *Keramischer Infrarotstrahler HSR Technische Daten - Elstein-Werk: Datenblatt*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.elstein.com/de/elstein-produkte/flaechenstrahler/fsr-serie/technische-daten/>. Zugriff am: 23. Okt. 2019.
- [127] *MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG: thermoIMAGER TIM // Kompakte Wärmebildkameras, Datenblatt*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/search/?q=tim+160&cat=download>. Zugriff am: 24. Okt. 2019.
- [128] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [129] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [130] G. Mennig und H. Bogensperger, *Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung: Bauarten, Herstellung, Betrieb*, 4. Aufl. München: Hanser, 1995.

10 Anhang

Tabelle 10.1: t-Werte zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche nach [114, 116]

Freiheits- grad f	t-Werte für Vertrauensbereich		
	95 %	99 %	99,9 %
1	12,71	63,66	636,62
2	4,303	9,925	31,60
3	3,182	5,841	12,92
4	2,776	4,604	8,610
5	2,571	4,032	6,869
6	2,447	3,707	5,959
7	2,365	3,499	5,408
8	2,306	3,355	5,041
9	2,262	3,250	4,781
10	2,228	3,169	4,587
12	2,179	3,055	4,318
15	2,131	2,947	4,073
20	2,086	2,845	3,850
30	2,042	2,750	3,646
40	2,021	2,704	3,551
50	2,009	2,678	3,496
70	1,994	2,648	3,435
100	1,984	2,626	3,390
1000	1,962	2,581	3,300
∞	1,960	2,576	3,291

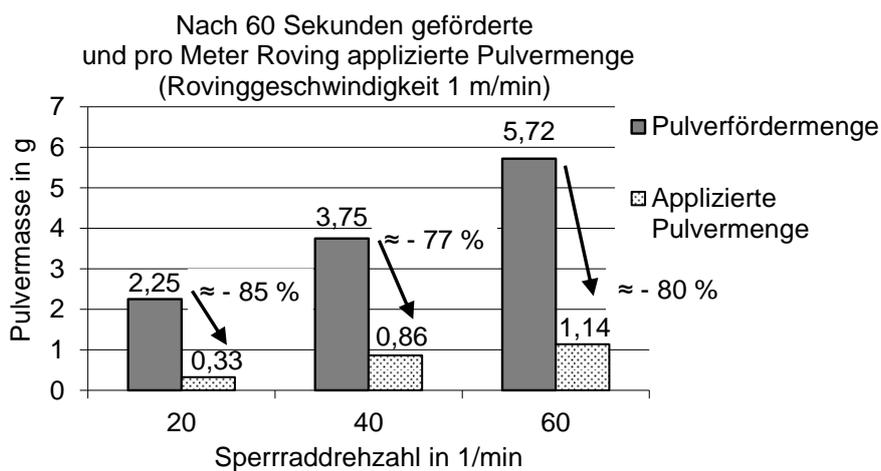


Abbildung 10.1: Vergleich der geförderten und applizierten Pulvermenge bei unterschiedlichen Sperrradrehzahlen der Pulverdosiereinheit

Tabelle 10.2: Glasfasermasse pro Meter

	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
Abschnitt	Glasfasermasse in g/m	Glasfasermasse in g/m	Glasfasermasse in g/m
1	2,34	2,33	2,34
2	2,35	2,33	2,33
3	2,35	2,37	2,35
4	2,35	2,35	2,35
5	2,34	2,34	2,36
Mittelwert	2,35	2,34	2,35

Tabelle 10.3: Ergebnisse der Messreihe zur Kraft F_K , die die Konsolidierungsrolle in Abhängigkeit des Systemdrucks auf die Werkzeugplatte ausübt

Systemdruck in bar	Kraft der Konsolidierungsrolle in N					
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert
0,5	33,305	33,354	28,694	28,694	34,237	31,657
1	52,974	54,053	53,072	51,355	49,982	52,287
2	98,738	98,002	103,299	98,836	102,465	100,268
3	152,644	144,109	152,840	152,447	151,515	150,711
4	189,824	186,930	202,037	194,238	196,592	193,924
5	237,794	237,304	250,646	245,937	243,975	243,131
6	300,480	298,715	298,322	300,186	298,715	299,283

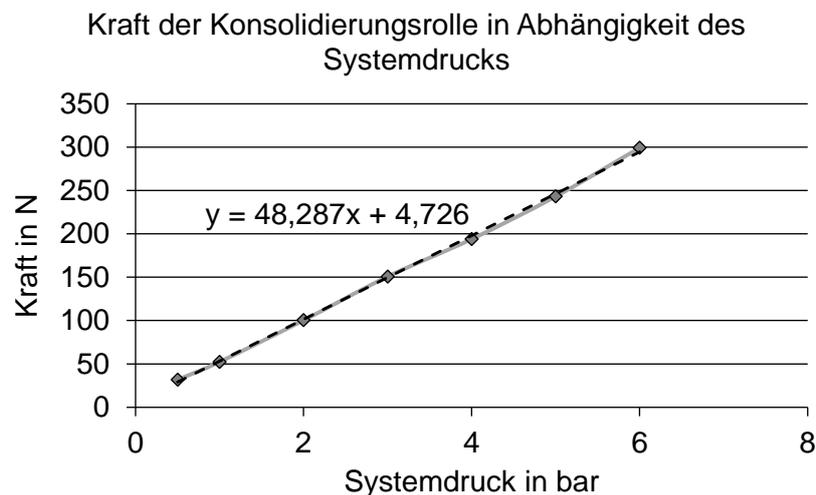


Abbildung 10.2: Lineare Näherung und Berechnung der Kraft der Konsolidierungsrolle in Abhängigkeit des Systemdrucks

Tabelle 10.4: Erforderliche Plattentemperatureinstellung der Laborpresse für die jeweilige Werkzeugtemperatur und Imprägnierzeit

Plattentemperatur in °C	Imprägnierzeit in s	Werkzeugtemperatur in °C
260	120	230
340	120	270
250	240	230
310	240	270

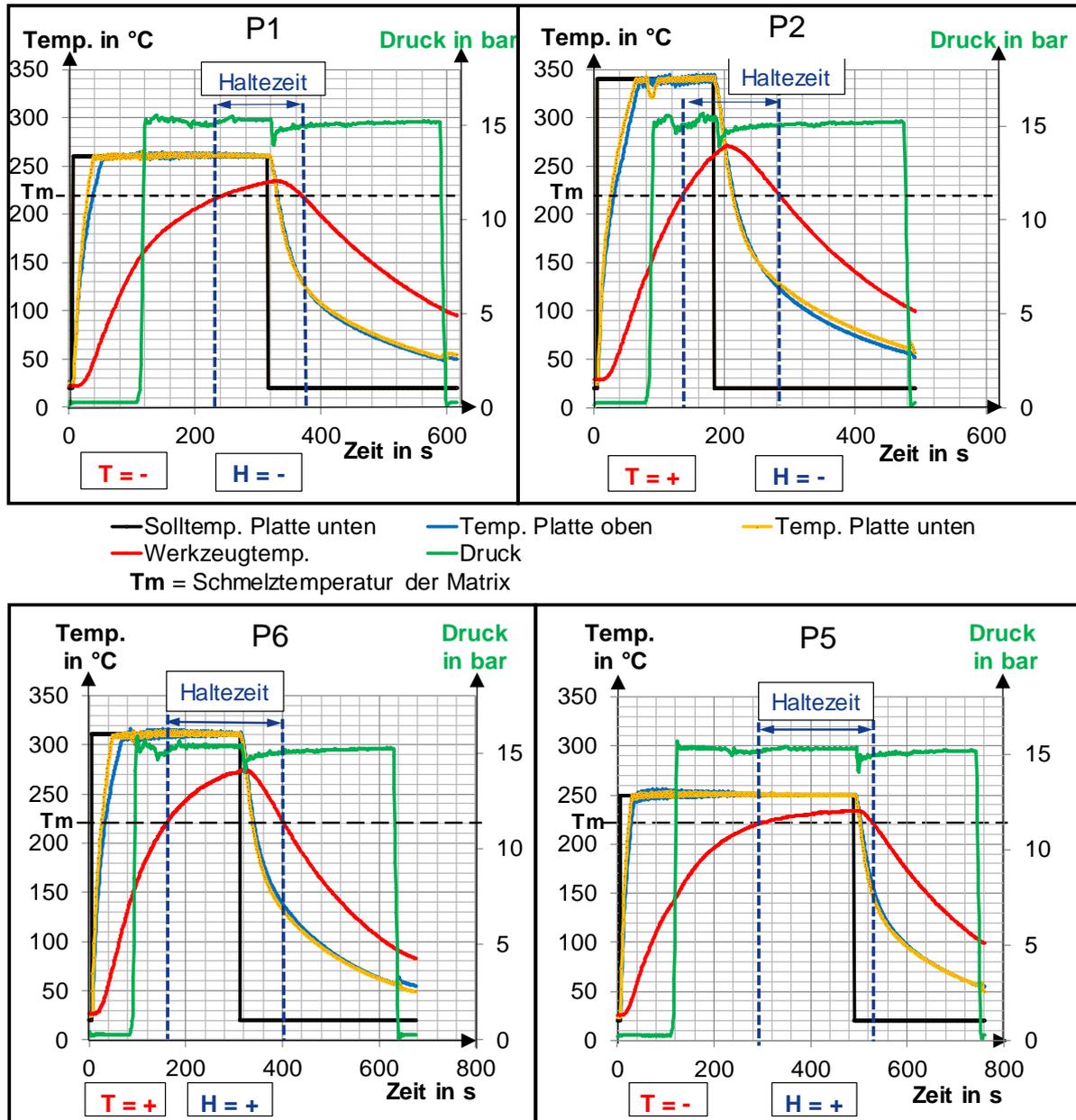


Abbildung 10.3: Temperatur- und Druckverläufe der Faktorstufenkombinationen P1, P2, P5 und P6

Tabelle 10.5: Versuchsergebnisse des Tapelegeprozesses

Syst. Nr.	Ergebnisse der Einzelmessungen, PVG in %									MW PVG in %	Varianz s_i^2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
TL1	63,16	50,18	35,93	54,65	57,14	45,61	51,75	43,42	49,04	50,1	63,78
TL2	42,81	37,79	44,13	45,5	30,31	28,69	33,57	41,03	42,71	38,5	38,94
TL3	62,11	64,39	63,25	65,58	53,99	66,67	67,54	60,89	70,59	63,89	22,45
TL4	63,57	49,58	54,08	55,57	50,6	52,5	62,27	54,41	65,85	56,49	35,06
TL5	71,37	51,42	66,71	47,14	56,16	69,36	64,95	51,8	50,71	58,85	85,22
TL6	41,71	33,34	49,33	21,29	22,56	14,32	22,94	27,77	21,1	28,26	125,73
TL7	67,14	64,67		67,27	69,26	60,68	66,55	84,43	77,99	69,75	59,27
TL8	63,31	55,51	47,59	54,87	46,18	48,08	42,24	50,72	51	51,06	38,38

Tabelle 10.6: Versuchsergebnisse des Pressprozesses

Syst. Nr.	Ergebnisse der Einzelmessungen (Messblöcke), PVG in %			MW PVG in %	Varianz s_i^2
	1	2	3		
P1	3,1476	3,6098	3,3520	3,3698	0,0536
P2	2,8071	2,8303	2,7099	2,7824	0,0041
P3	2,5703	2,7312	2,4853	2,5956	0,0156
P4	1,2020	1,2417	1,2146	1,2194	0,0004
P5	2,4841	2,4691	2,4371	2,4634	0,0006
P6	0,4538	0,7453	0,7530	0,6507	0,0291
P7	1,7045	1,7227	1,7428	1,7233	0,0004
P8	0,4200	0,4120	0,3511	0,3944	0,0014

Betreute studentische Arbeiten

Böhm, Christian: Prozessoptimale Textilparameter bei der Verarbeitung von Kohlenstofffasergelegen beim Preforming. IVW-Bericht 16-053, 2016

Oswald, Nils: Prozessoptimale Textilparameter bei der Verarbeitung von Kohlenstofffasergelegen im Preform-LCM Verfahren. IVW-Bericht 16-082, 2016

Meeß, Joachim: Kompaktierungsverhalten von bebinderten Kohlenstofffasergelegen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen. IVW-Bericht 17-019, 2017

Märker, Colin: Verarbeitung von Stahlfaserverovings im Offline-Bebinderungsprozess zur Herstellung hybrider Faserverbundbauteile. IVW-Bericht 17-054, 2017

Paas, Manuel: Einfluss von Stahlfasern auf das Tränkungsverhalten hybrider textiler Halbzeuge. IVW-Bericht 17-060, 2017

Masireddy, Mounika: Prozessentwicklung zur Herstellung von Thermoplast-Prepreg-Rovings für die Verarbeitung im Tapelegeprozess. IVW-Bericht 18-016, 2018

Steuer, Daniel: Experimentelle Untersuchung der Verarbeitung von Thermoplast-Prepregs im Tapelegeprozess und im variothermen Pressprozess. IVW-Bericht 18-051, 2018

Saar, Daniel: Experimentelle Untersuchung zur Herstellung und Verarbeitung von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplast-Preforms im variothermen Imprägnierprozess. IVW-Bericht 18-069, 2018

Buchalik-Bopp, Stefan: Experimentelle Untersuchung zur Herstellung von FKV-Beschlagteilen im angepassten Preforming- und Imprägnierprozess. IVW-Bericht 18-072, 2018

Adam, Laura-Sophie: Experimentelle Herstellung und mechanische Prüfung von hybriden SF verstärkten Thermoplasten. IVW-Bericht 19-019, 2019

Ackermann, Adrian: Studie zur vergleichenden Charakterisierung des Kompaktierungsverhaltens von textilen Verstärkungsmaterialien und Optimierung der Versuchsmethodik. IVW-Bericht 19-029, 2019

Peters, Steven: Untersuchung zum Einfluss der Werkzeugtemperatur auf den Imprägnierfortschritt beim Tapelegen von Thermoplast-Pulverprepregs. IVW-Bericht 19-030, 2019

Cakmak, Dikran: Einfluss der Vorimprägnierung auf den variothermen Pressprozess von Thermoplast-Pulvertowpregs. IVW-Bericht 19-034, 2019

Publikationen

Journals und Paper

Kühn, F.; Rehra, J.; May, D.; Schmeer, S.; Mitschang, P.: Dry fiber placement of carbon/steel fiber hybrid preforms for multifunctional composites, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Volume 5:1 (2019), S. 37–49

May, D.; Kühn, F.; Etchells, M.; Fauster, E.; Endruweit, A.; Lira, C.: A reference specimen for compaction tests of fiber reinforcements, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Volume 5:4 (2019), S. 230–233

Kühn, F.: Neues variothermes Presswerkzeug beschleunigt Bearbeitung von Thermoplasten, *CCeV Magazin*, Ausgabe 3, 2016, S. 46

Kühn, F.: Hybridisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Stahlfasern zur Verbesserung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften, *CCeV Online*, 2018

Symposien- und Konferenzbeiträge (Proceedings)

Kühn, F.; Medina, L.; Becker, D.; Zwick, M.; Knoch, M.; Romahn, B.; Mitschang, P.: Ceramic Pressing Tool for Variothermal Processing of Thermoplastic Fiber Composites, 2016, *Proceedings ECCM17*

Kühn, F.; Rehra, J.; May, D.; Schmeer, S.; Hausmann, J.; Mitschang, P.: Manufacturing of Preforms for Multifunctional Steel / CFRP Composites by Optimized Dry Fiber Placement Process, 2017, *Proceedings SAMPE Europe Conference*

Kühn, F.; May, D.; Mitschang, P.: Manufacturing of fiber reinforced thermoplastics via automated powder towpreg placement and direct impregnation, 2018, *Proceedings ITHEC 2018*

Kühn, F.; May, D.; Mitschang, P.: AUTOMATED FIBER PLACEMENT AND VARIO THERMAL PRESSING OF THERMOPLASTIC TOWPREGS, 2019, *Proceedings ICCM 22*

Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)

Kühn, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Bedeutung der Werkzeugtechnologie für die Verarbeitung thermoplastischer FKV, 2015, *CCeV AG Thermoplaste*

Kühn, F.; Medina, L.; Mitschang, P.: Project "CompoMold": Ceramic pressing tool for variothermal processing of thermoplastic fiber composites – opportunities and restrictions, 2015, 9. Aachen Dresden International Textile Conference

Kühn, F.; Medina, L.; Becker, D.; Zwick, M.; Knoch, M.; Romahn, B.; Mitschang, P.: Ceramic Pressing Tool for Variothermal Processing of Thermoplastic Fiber Composites, 2016, ECCM17

Kühn, F.; Rehra, J.; May, D.; Schmeer, S.; Hausmann, J.; Mitschang, P.: Manufacturing of Preforms for Multifunctional Steel / CFRP Composites by Optimized Dry Fiber Placement Process, 2017, SAMPE Europe Conference

Kühn, F.; May, D.; Mitschang, P.: Manufacturing of fiber reinforced thermoplastics via automated powder towpreg placement and direct impregnation, 2018, ITHEC 2018

Poster

Rehra, J.; Kühn, F., Schmeer, S.; May, D.; Mitschang, P.; Hausmann, J.: FUTURE – Funktionale Textilien Und Reproduzierbare Prozesse, 2017

Kühn, F.; May, D.; Mitschang, P.: Production of Fiber Reinforced Thermoplastic Composites by Powder-Towpreg Placement and Direct Impregnation in a Variothermal Pressing Process, 2019, 22. Symposium Verbundwerkstoffe

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Florian Kühn
Geburtstag, -ort:
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Beruf

01/2020 – heute PFW Aerospace GmbH, Speyer
Prozessentwickler
07/2014 – 06/2019 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich
Verarbeitungstechnik
08/2013 – 06/2014 Tobies Kran- und Förderanlagen GmbH, Speyer
Konstruktions- und Entwicklungsingenieur

Studium

10/2005 – 02/2014 Technische Universität Kaiserslautern
Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Vertiefungsrichtung
Konstruktionstechnik und Werkstofftechnik
Abschluss: Dipl.-Ing.

Zivildienst

09/2004 – 05/2005 Dürkheimer Werkstätten der Lebenshilfe e. V.

Schulbildung

1991 – 2004 Freie Waldorfschule Frankenthal
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Sonstige Tätigkeiten

12/2011 – 12/2012 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH in Kaiserslautern
Wissenschaftliche Hilfskraft im Bereich
Werkstoffwissenschaften

