

IVW - Schriftenreihe Band 115

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Jens Mack

**Entwicklung eines adaptiven
Bebinderungsprozesses
für die Preformherstellung**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

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

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

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2015

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 978-3-944440-11-8

Entwicklung eines adaptiven Online- Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jens Mack

aus Grünstadt

Tag der mündlichen Prüfung:	23. April 2015
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Ing. Ralf Schledjewski

D386

Für meine Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2015 während meiner Beschäftigung an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) in Kaiserslautern. Innerhalb dieser Zeit war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik angestellt.

Besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater und Erstbegutachter, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang, welcher mich innerhalb der letzten Jahre stets bei meinen Vorhaben unterstützt, gefördert und mir die hierzu notwendigen Freiheiten eingeräumt hat. Herrn Professor Dr.-Ing. Ralf Schledjewski gilt ebenso mein Dank für die Zweitbegutachtung und die Betreuung als Gruppenleiter zu Beginn meiner Promotionszeit. Des Weiteren danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verbundwerkstoffe spreche ich meinen Dank aus für die Hilfsbereitschaft und die Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen. Den Kollegen aus Abteilung III (Verarbeitungstechnik) und vor allem aus der „Roving und Tapeverarbeitung“ (insbesondere Steven Brogdon, Torsten Weick und Michael Päßler) gilt hierbei ein besonderer Dank. Speziell erwähnen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Marcel Christmann und Herrn Matthias Domm. Herr Dr. Christmann war über vier Jahre mein Bürokollege und stand mir sowohl bei beruflichen als auch privaten Angelegenheiten jederzeit zur Seite. Aufgrund der Verschiedenheit unserer beiden Themenfelder war zu jeder Zeit die Betrachtung durch einen anderen Blickwinkel gewährleistet, was neuen Input ermöglichte und so die Forschung vorantrieb. Herrn Matthias Domm möchte ich danken für die sowohl berufliche Unterstützung als auch private Freundschaft und die tolle Fortführung der Kollegialität innerhalb unseres Büros. Frau Andrea Hauck gebührt ein ganz besonderer Dank dafür, dass sie nicht nur in organisatorischen Angelegenheiten, sondern insbesondere auch menschlich immer für die Kollegen da ist, wodurch diese Arbeit nie mit negativen sondern mit positiven Aspekten behaftet war und sein wird. Zusammenfassend war das Arbeiten am IVW aufgrund der Mitarbeiter nie ein Zwang, sondern immer eine Freude, welche ich vermissen werde.

Für die Unterstützung bei der täglichen Projektarbeit möchte ich einen besonderen Dank an meine hilfswissenschaftlichen Mitarbeiter (Fr. Olesja Bekker, Hr. Arne Bütt-

ner, Hr. Stefan Weidmann) richten, welche durch ihr Engagement und den ungetrübten Blick aus dem Studium heraus das Arbeiten sehr erleichtert haben. Ebenso dankbar bin ich sämtlichen Studenten, welche eine wissenschaftliche Arbeit unter meiner Betreuung durchgeführt haben. Diese haben einen wichtigen Beitrag zur Realisierung der im Rahmen von vielen Projekten als auch in meiner Dissertation gezeigten Ergebnisse geleistet.

Für die Förderung des Projektes „Entwicklung eines Online-Bebinderungs- und Ablegeverfahrens zur automatisierten Herstellung lastoptimierter Preforms“, in welchem die Ergebnisse dieser Dissertation entstanden sind, möchte ich der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation danken.

Ganz besonders möchte ich meinen Eltern für die langjährige Unterstützung zu meinem Karriereziel danken, ohne sie wäre dies nicht möglich gewesen. Meiner Frau möchte ich für ihren Rückhalt und ihre Sicherheit danken, durch welche ich stets mit einem klaren Blick das Ende der Dissertation im Blick halten konnte. Meiner Tochter Maja möchte ich ebenso danken. Durch Ihre Geburt (2012) ist mir das „Wesentliche im Leben“ deutlich vor Augen geführt worden. Auch innerhalb der heißen Phase des Zusammenfassens dieser Arbeit und den langen Samstagen am IVW war mir ihre Liebe am Abend sicher. Durch ihr besonderes Wesen ist es sehr einfach, nach der Arbeit abzuschalten um sich der Familie zu widmen.

Thalmassing, im Mai 2015

Jens Mack

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	VI
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	X
Kurzfassung	XIII
Abstract	XIV
1. Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2. Stand der Technik	7
2.1 Fertigungsverfahren zur Herstellung von Preforms für LCM - Prozesse	8
2.1.1 Sequentielle Preformherstellung mittels Konfektionstechnologie.....	9
2.1.2 Sequentielle Preformherstellung mittels Bindertechnologie	10
2.1.3 Direkte Preformherstellung (3D-Prozesse)	13
2.2 Methoden des Faserspreizens	18
2.2.1 Faserspreizung durch Umlenkung	19
2.2.2 Radiusspreizer	19
2.2.3 Fukui-Effekt.....	21
2.2.4 Venturi-Effekt	22
2.3 Tapelegetechnologie	23
2.4 Permeabilität der Preform.....	26
2.5 LCM - Prozesstechnologien	28
2.5.1 VARI – Vacuum Assisted Resin Infusion	29
2.5.2 RTM - Resin Transfer Molding.....	30
2.5.3 ARTM - Advanced Resin Transfer Molding.....	31
2.6 Prozessbasierende Grundlagen einer Kostenrechnung	33

3. Materialien	35
3.1 Verstärkungsfasern	35
3.2 Bindersysteme.....	36
3.3 Vergleichsmaterial – Binderroving.....	38
3.4 Matrixsystem zur Infiltration.....	38
4. Entwicklung einer Methode zur Applizierung von Bindermaterial auf Rovings.....	40
4.1 Prozessbeschreibung „Roving Vorbereitung“	41
4.1.1 Führungsgatter.....	42
4.1.2 Entwicklung einer Rovingspreizung inkl. Zwischenlagenablegeeinheit.	43
4.1.3 Transferspule	45
4.2 Prozessbeschreibung „Binder-Roving-Prüfstand“.....	45
4.2.1 Spreiz- und Breiteneinstellungseinheit.....	46
4.2.2 Binder-Applizier-Modul.....	50
4.2.3 Qualitätsüberwachungssysteme	68
5. Herstellung und Analyse von offline bebinderten Preforms.....	72
5.1 Herstellung von offline bebinderten Preforms.....	72
5.2 Analyse der Binderpreforms in Abhängigkeit des Bindergehaltes / -typs	82
5.2.1 Analyse der trockenen Preform / Kompaktierungstests	83
5.2.2 Preforminfiltrationsversuche.....	86
5.2.3 Bestimmung der Verbundwerkstoffeigenschaften.....	91
6. Prozessbeschreibung Online-Bebinderung	100
7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	108
7.1 Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	108
7.2 Vergleich der Preformingverfahren.....	110
7.3 Analyse der Herstellungskosten	113

8. Zusammenfassung	117
9. Literatur	119
10. Anhang.....	132

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
°	Winkelangabe
°C	Temperaturangabe in Grad Celsius
µm	Mikrometer
3 Pkt. Biegung	3 Punkt Biegung
a	lateinisch für „Jahr“
AFL	Automatic Fiber Laying
AFP	Automatic Fiber Placement
ARTM	Advanced Resin Transfer Molding
B-A-M	Binder-Applizier-Modul
bar	Einheit für den Druck
B-F-M	Binder-Förder-Modul
B-S-S-M	Binder-Start-Stopp-Modul
B-R-P	Binder-Roving-Prüfstand
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CF	Kohlenstofffaser
CF-High Modulus	Kohlenstofffaser hochsteif
CF-High Tenacity	Kohlenstofffaser hochfest
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
CRTM	Compression RTM
d. h.	das heißt
DFP	Dry-Fiber-Placement
EP	Epoxid
et al.	lateinisch für „und andere“
etc.	lateinisch für „und die Übrigen“
EVO	Evolution bzw. Entwicklungsstufe

FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
FPP	Fiber-Patch-Preforming
FS	Fasersprühen
FVG	Faservolumengehalt
Gew.- %	auf das Gewicht bezogener Anteil
GF	Glasfaser
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPa	Gigapascal
HGD	Heißgasdüse
kHz	Kilohertz
HLF	Heißluftfön
Hz	Einheit Hertz (Vorgänge pro Sekunde)
HZ	Halbzeug
i	Übersetzungsverhältnis
ILSS	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit
in-situ	lateinisch für direkt, ohne weitere Prozesse
IVW	Abkürzung für Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
k	Abkürzung für den Einheitenvorsatz Kilo (1000)
l/min	Liter pro Minute
LCM	Liquid Composite Molding
m	Meter
mbar	Millibar
mg	Milligramm
min	Minute/n
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
mm	Millimeter
mm/min	Millimeter pro Minute
mm ³	Kubikmillimeter
MPa	Megapascal
mPa*s	Millipascal sekunde

N	Newton
N ₂	molekularer Stickstoff
Net-Shape	Geometrie entspricht der finalen Bauteilgeometrie (wenig bzw. keine Abfälle)
NiCr-Ni	Nickel-Chrom-Nickel
Nip-Point	Berührungspunkt zwischen zwei rotierenden oder einem rotierenden und einem stationären Element
NI/min	Normliter pro Minute
Nm	Newtonmeter
Ø	Durchmesser
O ₂	molekularer Sauerstoff
OoA	Out of Autoclave
P4-Verfahren	Programmable Powdered Preform Process
PA	Pascale
PMMA	Polymethylmetacrylat
Preform	Aus trockenen Verstärkungsfasern aufgebautes Bauteil, welches anschließend mit Matrix infiltriert werden kann
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Molding
s	Sekunde/n
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Molding Process
Stk.	Stück
T	Temperatur
tex	Längenbezogene Gewichtseinheit (g/1000 m)
T _{g1}	Glasübergangstemperatur 1. Aufheizen
T _{g2}	Glasübergangstemperatur 2. Aufheizen
T _{g3}	Glasübergangstemperatur 3. Aufheizen
TFP	Tailored-Fiber-Placement
TLK	Tape Lege Kopf für das Ablegen von thermoplastischen, duroplastischen oder binderförmigen Halbzeugen bzw. Rovings
TS	Temperatursensor

u. a.	unter anderem
UD	Unidirektional
VAP	Vacuum Assisted Process
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VARTM	Vacuum Assisted RTM
vBEE	variable Breiten-Einstellungs-Einheit
vgl.	vergleiche
VP	Verarbeitungsprozess
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
a_k	mm^2	Kontaktfläche (Hertzsche Pressung)
α	$^\circ$	Winkel
A_j	m^2	Benötigte Produktionsfläche für Produktionsanlage j
AS_j	€	Abschreibungen der Produktionsanlage j (jährlich, linear)
AW_j	€	Anschaffungswert der Produktionsanlage j
A_{PK}	Stück	Anzahl des benötigten Personals
b	mm	Breite
$b_{Online;Roving}$	mm	Breite des abgelegten Verstärkungsrovings (Online-Bebinderung)
$b_{TFP;Roving}$	mm	Breite des Verstärkungsrovings (TFP)
d_k	mm	Kopfkreisdurchmesser (Zahnrad)
E	MPa	Elastizitätsmodul
E'	MPa	Speichermodul (elastischer Anteil)
E''	MPa	Verlustmodul (plastischer Anteil)
EK	€	Energiekosten
ε	m^2	Dehnung
F	N	Kraft
FL_{Online}	m	Faserlänge der Verstärkungsfaser für die Online-Bebinderung (In-Situ Dry-Fiber-Placement Prozess)
$FL_{TFP;fix;o}$	cm	Länge des Nähfadens beim TFP Prozess, welcher das Verstärkungsmaterial oberhalb der Grundstruktur fixiert
$FL_{TFP;fix;u}$	cm	Länge des Unterfadens beim TFP Prozess
$Gew_{\cdot Roving;Online}$	g	Masse der Verstärkungsfaser pro Meter
$Gew. \%_{Binder}$	%	Gewichtsprozent des Bindermaterials für die Preformherstellung
h	mm	Höhe
h_s	mm	Abstand zwischen Zahnrad und Schieber
$h_{TFP;Roving}$	mm	Höhe des zu fixierenden Verstärkungsrovings (TFP)

i	%	Kalkulatorischer Zinssatz
$K1$	m^2	höchste Permeabilität in der Ebene
$K2$	m^2	geringste Permeabilität in der Ebene
$K3$	m^2	Permeabilität in Dickenrichtung
k_E	€	Energiekosten
K_f	€	Fixe Kosten des Herstellungsprozesses
K_{Ges}	€	Gesamtkosten des Herstellungsprozesses
k_M	€	Materialkosten
k_{PE}	€	Personalkosten
k_{Pr}	€	Produktionskosten
k_S	€	Sonstige Kosten
K_v	€	Variable Kosten des Herstellungsprozesses
l	m	Länge
Δl	m	Längendifferenz
$L_{Naht;TFP}$	m	Länge der Ablegenaht (= Anzahl der Ablegelänge des Verstärkungsroving)
MK_{Fasern}	€	Materialpreis für die Verstärkungsfaser (TFP, Online-Bebinderung)
MK_{Garn}	€	Materialpreis für das Nähgarn
MK_m	€	Materialpreis für ein Produkt m
η	Pa*s	Viskosität
ν	-	Querkontraktionszahl
$n *$	Stück	Anzahl der Zähne am Zahnrad
n_j	Jahre	Nutzungsdauer der Produktionsanlage j
m	Mm	Modul (Zahnrad)
m_{Abf}	%	Materialabfall
m_{eff}	%	Effektiv genutzte Materialmenge
p	Bar	Druck
Δp	bar	Druckdifferenz
$\vec{\nabla} p$	bar	Druckgradient
PS_j	€	Raumkosten der Produktionsanlage j (jährlich)
PK	€	Personalkostensatz
P_R	N	Maximalkraft bei Versagen
P_{VARI}	bar	Druck beim VARI Prozess

ρ	g/cm ³	Dichte eines Stoffes
Q	m ³ /s	Volumenstrom
r	mm	Radius
ra	mm	Außenradius des Sperrrades
rk	€	Kosten für eine Produktionsfläche
RW_j	€	Restwert der Produktionsanlage j
rz	mm	Radius eines Zahnrades
SK	€	Sonstige Kosten
$St_{Anz.}$	Stück	Anzahl der Stiche pro Meter
T	°C	Temperatur
$T_{Schmelz}$	°C	Schmelztemperatur eines Stoffes
$\tan(\delta)$		Verlustfaktor (Verhältnis Speicher- / Verlustmodul)
τ	MPa	Schubspannung
V	mm/min	Geschwindigkeit
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
VB_{HZ}	mm	Verstärkungslänge eines Bauteils bei der Konfektionstechnologie
VB_{Online}	mm	Verstärkungsbreite eines Rovings bei der Online-Bebinderung
VB_{TFP}	mm	Verstärkungsbreite eines Rovings beim TFP
VL_{HZ}	m	Verstärkungslänge eines Bauteils bei der Konfektionstechnologie
$VL_{Online;l}$	m	Verstärkungslänge eines Bauteiles bei der Online-Bebinderung
VL_{TFP}	m	Verstärkungslänge eines Bauteils beim TFP
$\dot{V}_{U/min}$	cm ³ /min	geometrisches Verdrängungsvolumen
W_{VP}	kWh	Energieverbrauch des Verarbeitungsprozesses
Za	mm	Zahnradseite a
Zb	mm	Zahnradseite b
Zc	mm	Zahnradseite c
$z_{eff;k}$	s	Effektive Zykluszeit für Produktionsschritt k
ZK_j	€	Zinskosten für das gebundene Kapital
σ	N	mechanische Spannung

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, für den innerhalb der Faserkunststoffverbunde etablierten Liquid Composite Molding (LCM) Herstellungsprozess, eine optimierte Preformherstellung aus unidirektionalen (UD) Verstärkungsfasern zu entwickeln. Dies beinhaltet auch das lokale Verstärken einer textilen Preform. Der ausschlaggebende Prozess ist hierbei der Preform-Prozess, da dieser Kostentreiber innerhalb der LCM-Prozesskette ist, in welchem die Verstärkungsfasern zu einem trockenen, transportfähigen und meist flächigen Faserrohling verbunden werden.

Innerhalb des hier entwickelten Preformingprozesses werden Kohlenstofffasern, sogenannte Heavy Tows mit einem pulverförmigen Bindersystem eingebracht, erhitzt und mittels Endeffektor beim Ablegen konsolidiert. Die für den Prozess benötigten Module und Systeme wurden vor der Online-Bebinderung zuerst an einem separaten Offlinebebindungsprüfstand montiert. Mittels dieses Offlinebebindungsprüfstandes war die Optimierung und Analyse der einzelnen Module und Systeme durch die Herstellung eines kontinuierlich bebinderten Rovings (Halbzeug) außerhalb der diskontinuierlichen Online-Bebinderung möglich. Zugleich wurden mit dem Offlineprüfstand Halbzeuge mit unterschiedlichem Bindergehalt und unterschiedlichem Bindertyp hergestellt um einen Einfluss des Bindergehaltes als auch des Bindertyps auf die Eigenschaften der Preform und des infiltrierten Bauteiles zu analysieren. Die Analyse der Versuche zeigte deutlich, dass die Wahl des Bindertyps bei gleichbleibender Infiltrationsmatrix einen signifikanten Einfluss auf die Performance des Bauteils hat, wohingegen die Bindermenge tendenziell einen untergeordneten Einfluss zeigt. Nach der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Module wurden diese an ein robotergestütztes Ablegesystem zur Online-Bebinderung installiert. Die Applizierung der Binderpartikel innerhalb der Online-Bebinderung erfolgt temporär während des Ablegeprozesses. Zur Demonstration der Funktionsfähigkeit wurde eine quasiisotrope Glasfaserpreform lokal mit den Kohlenstofffasern verstärkt. Die hergestellte ebene Preform wurde im Anschluss erwärmt, kompaktiert und in eine 3 dimensionale Preform umgeformt.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des entwickelten Prozesses im Vergleich zu zwei „State of the Art“ Preformherstellungsprozessen. Hierbei konnte gezeigt werden dass die Kosten des gesamten Bauteiles um 3,7 % sinken unter Anwendung des neu entwickelten Verfahrens der Online-Bebinderung.

Abstract

Target of this thesis was the optimization of the preform manufacturing for the production of fiber reinforced plastics by established Liquid Composite Molding (LCM) manufacturing processes. Since the preform is the main cost driver within the LCM process chain particular attention needed to be paid to the preform process in which the reinforced fibers are combined to a dry, transportable and mostly planar fiber preform.

After analyzing current preform manufacturing processes all required process techniques are described in the "State of the Art" section. This is the basis for the development of all essential units within the new established preforming manufacturing chain. During the developed preforming process carbon fibers - so-called heavy tows with 50,000 fibers - are applied with a powdered binder system, heated up and consolidated with an end effector during the fiber placement. Prior the establishment of the online binding process the different modules and systems required for the process (manufacturing) were developed, build-up, and installed on a separate offline binding test rig. To optimize and analyze the individual modules a continuous bindered roving (semi-finished product) was produced by the use of this offline binding test rig. As the most critical challenge the Binder-Conveying-Unit (B-C-U), which supplies the powder binder particles in an air flow from where they are applied to the roving, was proved. Depending on the process speed which was set to 15 m/min, the B-C-U was designed to achieve a binder content from 1 to 10 mass %. The B-C-U is based on a gear-conveying system which is driven by a stepper motor with gear reduction and controlled by a CNC-based software. Furthermore, a vibration generator (air vibrator) causes the complete B-C-U to vibrate. The oscillation frequency and force can be adjusted by changing the air pressure. This prevents an agglomeration of the powder binder inside the binder storage hopper and supports the binder particles separation. Depending on the rotation speed of the gear and the adjustable distance between the gear and the wall (slide bar) the binder output is variable. The distance between the wall and the slide bar is fixed to 0.2 mm for all tests. Tests with different binder materials showed a linear output behavior depending on the rotation speed.

During the offline binding process the binder particles were applied to the roving inside a Binder-Application-Unit (B-A-U). The binder particles were heated over the melting point with a hot air stream supported from an electric air heater to increase the adherence of the particles on a roving (semi-finished product). Similar semi-finished parts were produced with different contents and types of binder by this offline binding test rig. They were used to analyze the influence of the binder content and the binder type on the properties of the preform and the infiltrated component.

For the binder roving placement a robot assisted placement system with an optimized placement head was used. For the above mentioned analysis different preform geometries with variation of the lay-up configuration were manufactured. Tests with the dry preforms were carried out regarding the stiffness (dynamic mechanical analysis), the compaction behavior and the infiltration (permeability tests in-plane and out-of-plane). A part of the particular preforms were infiltrated with resin for mechanical characterization. A Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) process was used as LCM-Process. With the infused preforms ILSS and 3 point bending test series were carried out. The analysis of the tests clearly showed that the choice of binder types has a significant impact on the performance of the infused component, whereas the binder content tends to have a minor influence. The K3 permeability (through-the-thickness) is also influenced from the binder content. The results show a decreasing of the permeability depending on higher binder content.

After ensuring the functionality of all components and after the manufacturing of the semi-finished material, the required modules were installed on a robot-assisted placement system. The application of binder particles within the online binding is selectable during the placement process. For this step a Binder-Start-Stop-Unit (B-S-S-U) was installed just before the binder application nozzle. With this system a precise binder application between the incoming dry fibers and the mold or already layed up preform (nip-point) is possible. Also a clocked binder application for the reduction of the overall binder content (easier impregnation) and an easier preform draping is possible.

For the verification of the online binding placement system a quasi-isotropic glass fiber preform was locally reinforced with carbon fibers. For the manufacturing of the glass fiber preform, a binder fleece was stacked between each of the five layers of glass fabrics. On top of the glass preform a local reinforcement (crossing structures)

with carbon fibers was attached under the usage of the online binding system. The so produced local reinforced preform is then ready for the impregnation or a subsequent preform draping process. To verify the ability of draping some of the produced flat preforms were heated up over the melting temperature of the binder particles on top of a 3D mold. After the temperature decreased the 3D preform is prepared to store or for the impregnation process.

Concluding an economic feasibility study of the developed process compared to "State of the Art" preform manufacturing processes is presented. As reference preform manufacturing processes the Tailored-Fiber-Placement Process and the manufacturing with crimp or non-crimp fabrics were carried out. It has been demonstrated that the costs of the entire component can be reduced by 3.7 % using the newly developed method of online binding.

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind gegenwärtig in allen technischen Bereichen präsent und ihre Bedeutung wächst stetig. Eine langfristige Ressourcenschonung kann durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen, infolge des Leichtbaupotentials, in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern ermöglicht werden [1]. Die Luft- und Raumfahrtindustrie als auch die Rüstungsindustrie zählen hierbei zu den Treibern dieser Werkstoffgattung. Durch die Kombination zweier Materialien bieten sich Möglichkeiten, die Nachteile eines Werkstoffes durch Vorteile eines anderen Werkstoffes teilweise zu kompensieren und hierdurch bessere Eigenschaften zu erzielen [2]. Im Gegensatz zu einem isotropen Werkstoff (beispielsweise Metall), besteht bei Verbundwerkstoffen die Möglichkeit die Verstärkungsfasern der Belastungsrichtung entsprechend auszurichten. Durch diese lastspezifischen Lagenorientierungen kann die maximale Performance des Verstärkungsmaterials ausgenutzt und somit das Bauteilgewicht auf ein Minimum reduziert werden.

Die spezifische Bauteilperformance für unterschiedliche Materialien und die damit verbundenen Bauteilkosten wurden in einer Roland Berger Studie [3] untersucht, deren Resultat in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Gegenüber Stahl kann durch den Einsatz von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eine Gewichtsreduktion von 75 % erreicht werden, dies geht jedoch mit einer Kostensteigerung des Bauteiles von ≈ 800 % einher. Eine Aufschlüsselung der zu erwartenden Kosteneinsparungspotenziale zeigt, dass das größte Einsparungspotenzial bei den Herstellungsverfahren (30 – 40 %), gefolgt von der Kohlenstofffaser (15 – 25 %) und der Matrix (< 10 %) liegt.

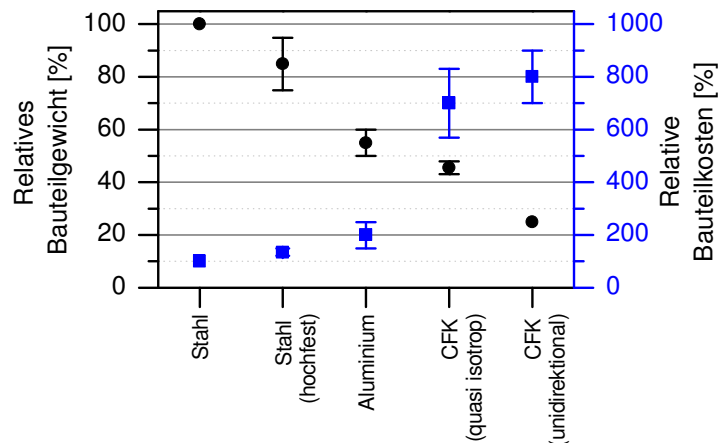


Abbildung 1.1: Relatives Bauteilgewicht vs. Relative Bauteilkosten nach [3]

Aufgrund der Annahme sinkender Preise für die Herstellung von Verbundwerkstoffen, basierend auf einer Verstärkungsfaser aus Kohlenstoff, wird die Branche innerhalb der nächsten Dekade ein deutliches Wachstum verzeichnen [3]. Die Umsatzentwicklung kohlenstofffaserverstärkter Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit des Wirtschaftszweiges wird in Abbildung 1.2 dargestellt. Der prognostizierte Umsatz der Branchen Luft- & Raumfahrt inkl. Verteidigung, Windenergie, sowie dem Fahrzeugbau kann nach dem aktuellen Composites-Marktbericht von 2014 in der Zeitspanne der Jahre 2013 bis 2022 mehr als verdoppelt werden [4]. Die durchschnittliche Gesamtwachstumsrate pro Jahr beträgt $\approx 8,5\%$, bei Berücksichtigung der Branchen Bauwesen sowie Sport und Freizeit sinkt die jährliche Wachstumsrate leicht auf $\approx 7,9\%$.

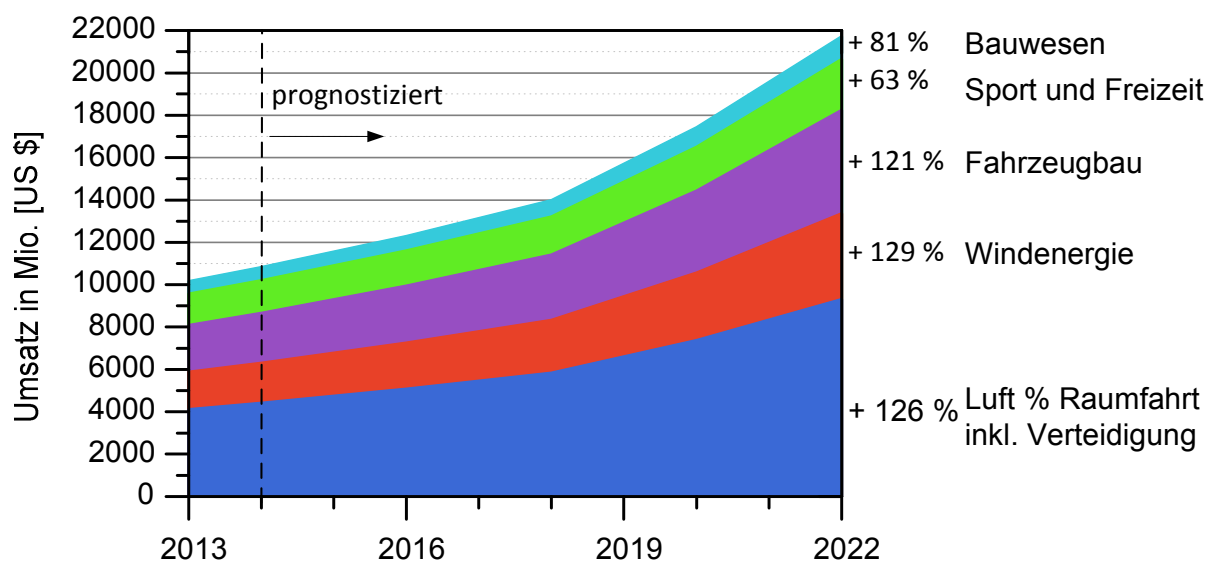


Abbildung 1.2: Entwicklung des Umsatzes für CF-Bauteile nach [4]

Die Spezifizierung für „kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe“ erfolgt am einfachsten anhand der Werkstoffzusammensetzung. Faserverbundwerkstoffe setzen sich dabei immer aus einer Verstärkungsfasern in Form von Kurz- bis Endlosfasern sowie einer die Fasern umgebenden Schlichte und Matrix zusammen. Die mit Abstand am häufigsten eingesetzten Matrices sind Polymere mit 64 %, gefolgt von Kohlenstoff mit 13 %, Keramik mit 10 %, Metallen mit 8 % und Hybriden mit 5 % [4]. Innerhalb der polymeren Matrixsysteme wird zwischen Duroplasten, Thermoplasten und Elastomeren unterschieden, wobei letztere gegenwärtig nur eine geringe Bedeutung innerhalb der Verbundwerkstoffe verzeichnen. Duroplastische Verbundwerkstoffe dominieren derzeit mit 76 % gemessen an dem Umsatz den Markt, was mit folgenden Eigenschaften begründet werden kann [4]:

- Große Hersteller- und Matrixauswahl und somit hoher Preiskampf (kostengünstige Matrices)
- Große Auswahl an Herstellungsvarianten (vom Handlaminieren bis zum vollautomatisierten Resin Transfer Molding - RTM Verfahren)
- Gute mechanische Eigenschaften, Temperaturbeständigkeit, geringe Feuchtigkeitsaufnahme

Aufgrund der beschriebenen positiven Eigenschaften sind verschiedene Verarbeitungsprozesse für duroplastische Matrixsysteme in der Industrie etabliert. Bei den in der Verarbeitungsindustrie gegenwärtig vorwiegend eingesetzten Harzinfusions- und Injektionsverfahren, dem sog. „Liquid Composite Molding“ kurz: LCM, werden sogenannte Preforms mit flüssigem Matrixmaterial imprägniert und anschließend ausgehärtet. Diese Verfahren sind auch für Seriengrößen von mehreren 10.000 Stk./a geeignet. Diese Preforms bestehen vorwiegend aus trockenen Geweben oder Gelegen, welche eine lastgerechte Auslegung eines Bauteiles überwiegend erschweren. Die Hauptschritte der LCM-Herstellungskette sind in Abbildung 1.3 dargestellt. Je nach Bauteilkomplexität ist der Prozessschritt der Preformherstellung für bis zu 40 - 50 % der gesamten Bauteilkosten bei der Preformherstellung verantwortlich [5, 6].

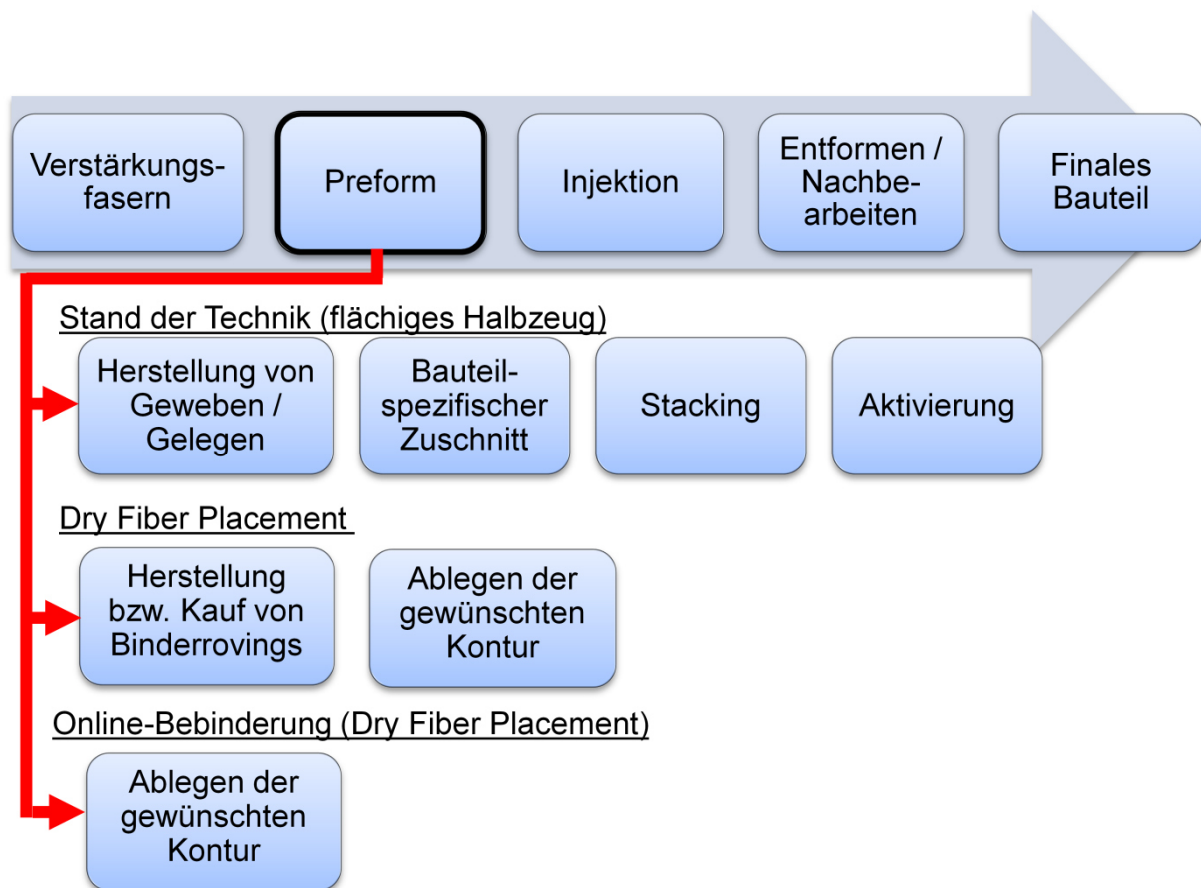


Abbildung 1.3: Schematischer Ablauf der LCM - Herstellungsprozesskette

Eine Steigerung der Bauteilperformance durch lokale Verstärkungen mittels unidirektionaler Rovings (UD-Rovings) eines Gewebes / Geleges oder der reine Aufbau einer Preform aus UD-Rovings, steigert die Kosten der Preformherstellung zusätzlich. Um jedoch einen höheren Leichtbaugrad zu erreichen ist eine lastgerechte UD-Verstärkung unumgänglich. Einige bestehende Technologien können diesen Wunsch der UD-Verstärkung erfüllen, sind jedoch mit einer Kostensteigerung verbunden. Als Beispiel sei hier das Dry-Fiber-Placement [7] genannt, bei dem bebinderte Rovings als Halbzeug zum Einsatz kommen. Diese Halbzeuge sind zugleich die Schlüsselstelle für die spätere Bauteilperformance, sowie normativ für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen, adaptiven Herstellungsmethode zur lokalen und lastgerechten Verstärkung bestehender Preforms sowie der ganzheitlichen Herstellung lastgerechter Preforms aus online bebinderten Rovings. Hierbei ist unter einer adaptiven Herstellungsmethode die Veränderung von

Parametern, wie z. B. der Breite des abgelegten Rovings oder der Bindergehalt, während des Ablegevorganges zu verstehen.

Innerhalb des Kernprozesses, dem Bebinderungsprozess, wird ein in diesem Falle pulverförmiges Polymer in der erforderlichen Menge von einem Förderungssystem bereitgestellt, erwärmt und auf einem Roving aufgetragen. Aktuell erhältliche Binderhalbzeuge werden in einem zusätzlichen Arbeitsschritt offline, d. h. außerhalb des Ablegeprozesses, hergestellt. Die Entwicklung einer neuen Herstellungsmethode soll die Bebinderung des Rovings direkt beim Ablegen der trockenen Rovings ermöglichen. Hierdurch ist es möglich, sowohl den Bindertyp als auch das Rovingmaterial beliebig zu variieren um den Anforderungen an das finale Produkt bestmöglich gerecht zu werden. Der Entfall eines Prozessschrittes als auch die Nutzung der reinen Materialkomponenten erlaubt eine Reduktion der Herstellungskosten, welches im Abschluss mittels einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berechnet werden soll.

1.3 Aufbau der Arbeit

Ausgehend vom Ziel der Arbeit werden unterschiedliche Entwicklungsfelder definiert. Die Entwicklungsfelder sind zu Beginn breit gefächert um die beinhalteten Technologien bzw. Methoden für die Online-Bebinderung ganzheitlich zu erfassen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die Technologie bzw. Methode oder Information für den nächsten Schritt zusammengefasst. Abbildung 1.4 zeigt die Schritte welche zur Zielerreichung der „Online-Bebinderung“ notwendig sind. Hierbei ist die Vorgehensweise, bei welcher eine Fokussierung von Schritt zu Schritt erfolgt, durch die Verjüngung des Dreieckes symbolisiert.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Herstellungskette innerhalb der Liquid Composite Molding Prozesskette für ein Bauteil, inklusive der Module und Komponenten für die Online-Bebinderung, wird im Stand der Technik (Kapitel 2) beschrieben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden innerhalb der Methodenentwicklung (Kapitel 4) das Grundkonzept für eine spätere Online-Bebinderung erarbeitet. Hierfür werden die Module einzeln nach definierten Vorgaben konstruiert und getestet. Zur Untersuchung der industriellen Einsetzbarkeit der Module wird ein Prüfstand umgerüstet um ein Zwischenziel, die Herstellung von offline Binderrovings und Preforms (Kapitel 5) zu erreichen. Diese offline Herstellung dient dazu, die Funktionsfähigkeit der Module weiter zu optimieren und Bindermaterial für die Charakterisierung des Binderverhaltens anzufertigen. Ausgehend von diesem Testmaterial werden je Versuchsparame-

ter drei Preformtypen hergestellt. Eine Charakterisierung der hergestellten Preforms und deren Einfluss auf das spätere Herstellungsverfahren und die Bauteilperformance erfolgt mittels scheinbarer interlaminaer Scherfestigkeit (ILSS), verschiedener Permeabilitäts-Kennwertermittlungen sowie 3-Punkt-Biegeversuchen.

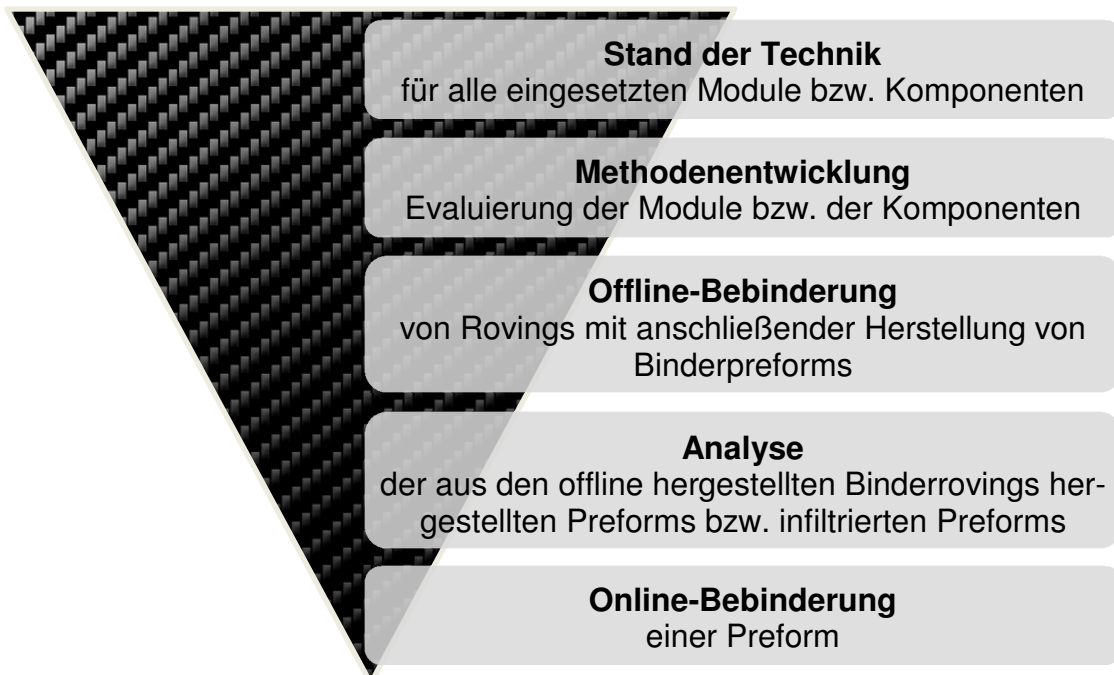


Abbildung 1.4: Struktogramm des Aufbaus der Arbeit

Nach erfolgreicher Herstellung der Binderrovings im Offlinemodus werden alle Versuchsmodule an einen Ablegeendeffektor (an der IVW GmbH entwickelt) montiert. Hiermit kann die Zielsetzung, nämlich die Online-Bebinderung eines trockenen Rovings, aufgezeigt werden.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Ende der Arbeit vergleicht die Herstellungskosten des neuentwickelten Verfahrens gegenüber dem Fiber-Patch-Preforming (FPP) und dem Tailored-Fiber-Placement (TFP). Anhand eines Demonstratorbauteiles werden die Gesamtkosten normiert dargestellt. Eine Aufteilung der Kosten in die Unterkategorien: lokale Verstärkung (Herstellungskosten, Materialkosten), Grundstruktur (Herstellungskosten, Materialkosten), Harzinjektion, Nachbearbeitung und Produktionsstätte wird ebenso dargestellt.

2. Stand der Technik

Der für diese Arbeit zugrundeliegende aktuelle Stand der Technik setzt sich aus zwei grundsätzlichen Prozesstechnologien zusammen. Zum einen der Herstellung und dem Ablegen von Binderrovings zu einer sogenannten Preform und zum anderen der Infiltration der Preform mittels eines Matrixsystemes. Die Prozessreihenfolge ist durch die Systematik des Herstellungsprozesses vorgegeben, wobei der generelle Herstellungsablauf für Liquid Composite Molding Prozesse (LCM) im Nachfolgenden zusammenfassend dargestellt wird.

Als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Preforms werden vorwiegend Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff- oder Glasfasern eingesetzt [1, 8]. Diese Materialien liegen meist in Form eines Gewebes, Geleges oder als unidirektionale Rovings vor. Das Preforming mit anschließendem Harzinjektionsverfahren erlaubt, dank der guten Automatisierbarkeit des Prozesses, eine wirtschaftliche Bauteilherstellung für mittlere Stückzahlen [9, 10]. Unterschiedliche Ansätze zur Herstellung von Preforms werden in Kapitel 2.1 ausführlich dargestellt. Nach der Preformherstellung folgt, je nach eingesetztem Preformprozess, ein händischer oder maschineller Besäumungsprozess. Die konturnahe Preform („net-shape“) wird anschließend in oder auf die Werkzeugkavität (in Abhängigkeit der verwendeten Infiltrationstechnologie vgl. hierzu Kapitel 2.5) platziert. Nach der Matrixinfusion bzw. Matrixinjektion erfolgt die Aushärtung des Bauteiles in der Form. Unter dem Gesichtspunkt der Infiltrationstechnologie und den Anforderungen an das finale Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) Bauteil, ist eine maschinelle Nachbearbeitung des infiltrierten Bauteiles notwendig. In Abbildung 2.1 wird die Prozesskette beispielhaft am Resin-Transfer-Molding (RTM) aufgezeigt.

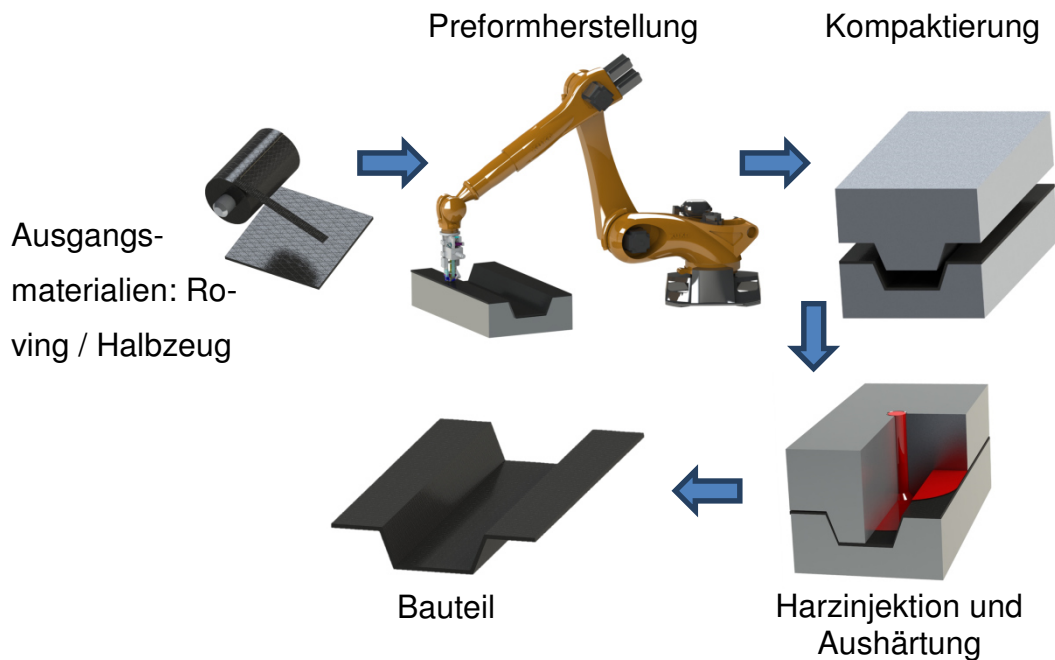


Abbildung 2.1: Bauteilherstellprozess – Preform RTM Injektionsverfahren

2.1 Fertigungsverfahren zur Herstellung von Preforms für LCM - Prozesse

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Herstellung von Preforms, nutzen als Ausgangsstoff Gewebe, Gelege oder UD-Rovings. Hierbei ist es möglich die Preformverfahren in unterschiedliche Kategorien zu unterteilen, wie Abbildung 2.2 aufzeigt [11]. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Verfahren lässt sich dem „direkten Preforming“ zuordnen, wobei die Preform sowohl in der Ebene hergestellt und anschließend umgeformt als auch direkt in die gewünschte Geometrie abgelegt werden kann.

Die wirtschaftliche Herstellung von FKV Bauteilen ist eng mit der Automatisierung von Verarbeitungsschritten verknüpft. Reduktion und Automation von Verfahrensschritten bilden bei der Preformherstellung für die LCM-Bauteilherstellung den wesentlichen Beitrag zur Reduktion der Verarbeitungszeit [12]. Für die Herstellung von Preforms werden gegenwärtig mehrere Verfahren eingesetzt oder befinden sich in der Entwicklung. Derzeitig ist das Preforming mittels Konfektions- oder Bindertechnik und mit Geweben oder Gelegen als Verstärkungsfasern am weitesten verbreitet, auch wenn diese Nachteile hinsichtlich der lokalen Lastoptimierung mit sich bringen. Im Nachfolgenden sind die gegenwärtig verwendeten Herstellungsprinzipien als auch Forschungsvorhaben skizziert. Hierbei werden zuerst Verfahren aus der sequentiellen Preformherstellung, wie die Konfektionstechnik oder Binderumformtechnik, ge-

folgt von Verfahren aus der direkten Preformherstellung, wie die 3D-Prozesse, erläutert.

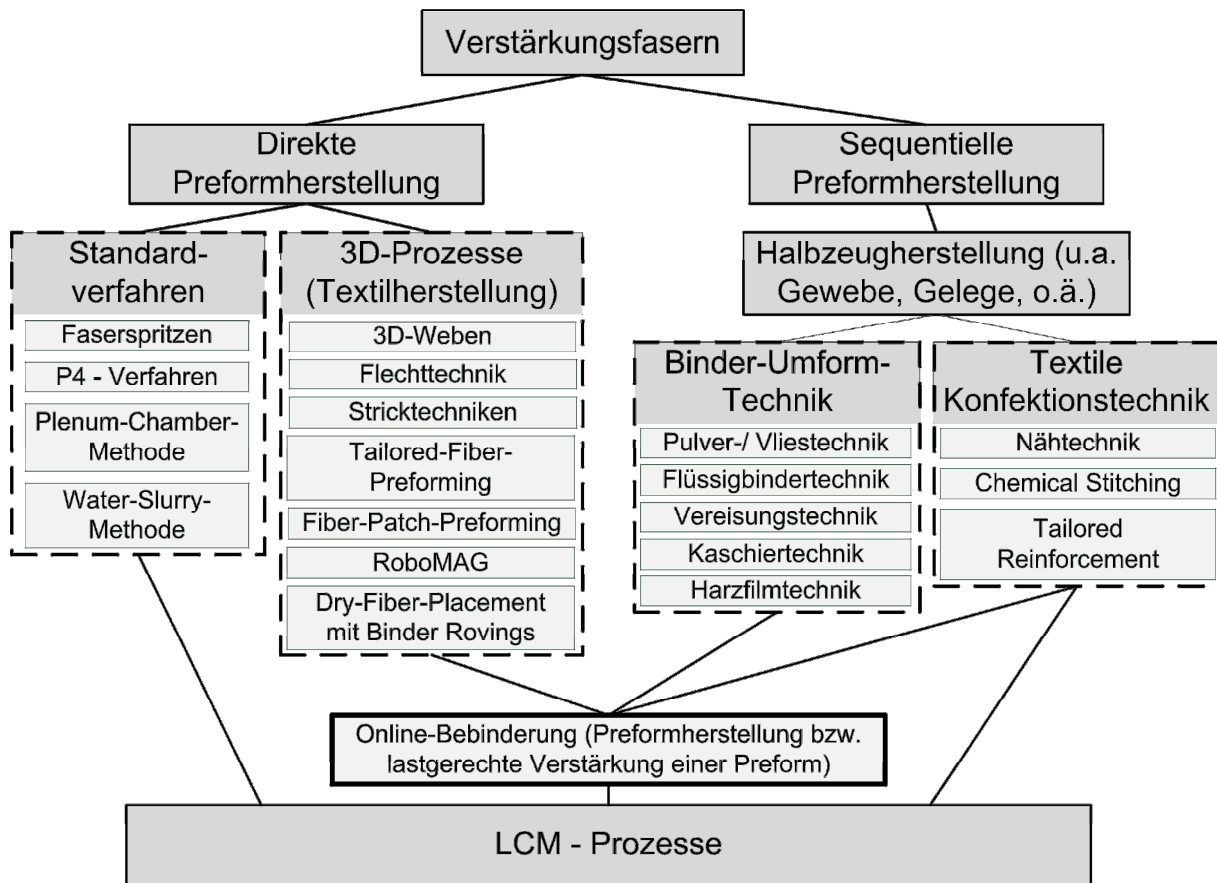


Abbildung 2.2: Unterscheidungskriterien für die Preformherstellung nach [11]

2.1.1 Sequentielle Preformherstellung mittels Konfektionstechnologie

Seit Mitte der 1980er-Jahre erfolgt eine Fixierung von Verstärkungsfasern für Gelege- / Gewebelagen durch den Einsatz der Nähetechnologie. Die Fixierungsnaht kann auch als Strukturnaht die mechanische Performance erhöhen, so z. B. als Riss-Stopper [13]. Eine Fixierung von einzelnen oder mehreren Subpreforms ist durch ein automatisiertes Handling der komplexen Preforms möglich, wodurch eine Vorfertigung und Lagerung der Subpreforms ermöglicht wird [14]. In Abhängigkeit der Stichlänge, Stichtyp, Stichmuster oder des verwendeten Garnes, also der Art der Fixierungsnaht wird die spätere Infiltrierung der Preform als auch die Bauteilqualität, durch Harznester, Zerstörung und Ablenkung von Fasern, beeinflusst [15-17].

Durch kontinuierliche Umformung mit anschließendem Vernähen sind auch endlose Versteifungsstrukturen als I- oder T Profil herstellbar [12, 18-20].

Nähetechnologie (Beispiele: Türstruktur & Rumpfsektionen in der Luftfahrtindustrie [13])	
+ Stand der Technik + Nahezu beliebige Materialauswahl + Kurzer Taktzeiten durch hohen Automatisierungsgrad	- Hoher Aufwand für die Verstärkung mit schmalen UD-Rovings - Keine vollständige Ausschöpfung des Leichtbaupotenziales auf Grund der bedingt lokalen Lastverstärkung

Ein neuer Ansatz innerhalb der Nähetechnologie zur Herstellung einer Preform stellt das „Chemical Stitching“ dar. Hierbei wird ein reaktiver Klebstoff durch eine Kanüle über die Dicke der Verstärkungsfasern lokal eingebracht, d. h. durch den Lagenaufbau. Eine gezielte Versteifung von flächigen Faserhalbzeugen mit einer definierten Lagenzahl (Mindestdicke) ist dadurch möglich. [21]

Chemical Stitching (Beispiele: Aktuell in der Entwicklungsphase)	
+ Gezielte Preformversteifung möglich	- Geschwindigkeit von der Anzahl der Injektionskanülen abhängig - Steuerungsaufwand - Reinigungsaufwand

2.1.2 Sequentielle Preformherstellung mittels Bindertechnologie

Die Preformherstellung innerhalb der Binder-Umform-Technik mit flächigen Halbzeugen kann durch unterschiedliche Bindererscheinungsarten erfolgen, welche im Nachfolgenden getrennt erläutert werden.

Eine Preformherstellung mittels Bindertechnologie, mit duroplastischem und/oder thermoplastischem Binder als Bindemittel zwischen den einzelnen Halbzeugen, befindet sich im Serieneinsatz [22-24]. Als Binder kommen sowohl Vliese, pulverförmige oder flüssige Systeme mit einem Bindergewichtsanteil zwischen 2 - 7 % zum Einsatz. Hierbei werden die meist flächigen Halbzeuge, wie Gewebe oder Gelege, mit dem Bindersystem beaufschlagt und nach Komplettierung des Lagenaufbaus in einem zusätzlichen Schritt unter Einwirkung von Druck und Hitze aktiviert, sodass eine handhabbare Preform entsteht [25, 26]. Durch Variation von Bindereigenschaften kann der „Springback“-Effekt bei einer Drapierung in eine nahe Endkontur reduziert

werden [22]. Thoma et al [21] vergleicht drei Preformingverfahren, das Chemical Stitching, mit Bindervlies und mit Pulverbinder hinsichtlich ihrer mechanischen Preformstabilität. In Abhängigkeit der Art des Testverfahrens wie z. B. dem Schältest oder dem Cantilever-Test, unterscheiden sich die Verfahren hinsichtlich ihrer Eigenschaften. Bei einem Schältest wird nur die Anhaftung zweier Preforms zueinander untersucht, sodass hier eine größere Bindermenge zu einem besseren Resultat führt. Beim Cantilever-Test wird die Preform-Biegesteifigkeit ermittelt, d. h. die Binderverteilung in der Preform ist von größerer Bedeutung. In Abhängigkeit der Geometrie der Preform, d. h. dem Verhältnis von Länge zu Breite, dem Gewicht, als auch des späteren Bauteildesigns, kann das optimale Preformingverfahren variieren. Eine lastgerechte Dimensionierung des Bauteils ist durch die Nutzung von flächigen, in einem gesonderten Prozess hergestellten Halbzeugen nur eingeschränkt möglich [27, 28]. Als beispielhafte Einsatzgebiete sind hier die Preformanlage zur Herstellung von Spanten, CFK Fensterrahmen [29, 30] oder Komponenten für den BMW i3 zu nennen.

2.1.2.1 Bindervliessysteme

Bindervliessysteme zur Herstellung von flächigen Preforms sind kommerziell aus unterschiedlichen Materialien erhältlich [31, 32]. Die Vliessysteme bestehen meist aus Co-Polyamid, Polyolefin, Polypropylen oder Polyurethan und haben ein Flächengewicht von $< 20 \text{ g/m}^2$. Sie werden schichtweise zwischen die Verstärkungsfasern platziert und in einem nachfolgenden Schritt aktiviert [33]. Dieser Aktivierungsschritt kann sowohl ohne Drapierung in der Ebene oder mit Drapierung in eine 3D Struktur erfolgen. Ein hoch automatisiertes Handlingsystem, welches die zugeschnittenen Fasern mit den Bindervliesen auf einmal aufnimmt, erwärmt, im erwärmten Zustand ablegt und auf die Werkzeugoberfläche drapiert, wird von Gräf [34] beschrieben.

Bindervliessysteme (Beispiele: Einsatz sowohl in der Automobil als auch Luftfahrt)	
+ Kommerziell verfügbar	- Nur flächige Bebinderung umsetzbar
+ Einfache Handhabung	- Bebinderung von Rovings schwierig
+ Gleichmäßige Binderverteilung	- Bindergehalt begrenzt variabel einstellbar

2.1.2.2 Pulverförmige Bindersysteme

Der Einsatz von pulverförmigen Bindersystemen zur vereinfachten Handhabung von trockenen Verstärkungsfasern ist sowohl für Gewebe / Gelege [23], UD-Rovings, als auch für Kurzfasern-Preforms geeignet. Ein beispielhafter Verarbeitungsprozess für Kurzfasern ist in dem US Patent von Rajendran [35] aufgezeigt. Im Vergleich zu den Vliesbindersystemen muss der pulverförmige Binder auf die Verstärkungsfasern aufgestreut und zum Transport angeschmolzen oder thermisch aktiviert werden.

Pulverförmige Bindersysteme (Beispiele: Automobilsektor)	
+ Materialauswahl	- Nur flächige Halbzeuge verarbeitbar
+ Flächig anpassbare Dosierung	- Bebinderung von Rovings schwierig

2.1.2.3 Flüssige Bindersysteme

Im Gegensatz zur Pulverbebinderung wird das flüssige Bindersystem auf die Verstärkungsfasern aufgesprüht. Im sogenannten Hot-Melt Verfahren wird in einer externen Anlage das thermoplastische Bindermaterial verflüssigt. Nach Verflüssigung wird der Thermoplast in einem beheizten Schlauch zu einer Düse gefördert und auf eine Lage der Verstärkungsfasern aufgetragen. Nach der Herstellung des Lagenaufbaues, wobei Anzahl und Orientierung der Verstärkungslagen mit Binderauftrag gestapelt vorliegen, erfolgt ein zweites Aufheizen der gesamten Preform. Mithilfe eines Kompaktierungsdruckes werden die einzelnen Lagen kompaktiert / umgeformt, bevor diese, nach dem Abkühlen, gelagert oder weiterverarbeitet werden können. Dies kann sowohl in der Ebene als auch in eine gewünschte 3D Form inkl. Drapierung erfolgen. Die Auswahl an Verstärkungsfasern, als auch an Bindermaterialien kann entsprechend den Anforderungen des Bauteiles erfolgen.

Flüssigbinder (Beispiele: Kurz- bzw. Langfaserverstärkte Produkte)	
+ Materialauswahl	- Nur flächige Halbzeuge nutzbar, kein Aufbau von UD-Rovings
+ Anpassbare Menge	- Bebinderung von Rovings schwierig

Die Dosierungsgeschwindigkeit und die Genauigkeit des Bindersystemes sind maßgeblich von dem eingesetzten Bindersystem als auch von der Ablegegeometrie abhängig. Durch den weit verbreiteten industriellen Einsatz von Verflüssigungsauftrags-

systemen zum Auftragen von zumeist Klebstoffen, sind Austragsmengen von mehreren Kilogramm pro Stunde möglich. Eine lastgerechte Verstärkung von Textilien oder das reine Ablegen von UD-Rovings ist jedoch nur eingeschränkt möglich. [36]

2.1.3 Direkte Preformherstellung (3D-Prozesse)

Im Gegensatz zu der sequentiellen Preformherstellung wird bei der direkten Preformherstellung ein Roving als Ausgangsmaterial genutzt. Die Möglichkeit einer lastoptimierten Preformherstellung ist somit je nach Verarbeitungsprozess möglich.

2.1.3.1 Dry-Fiber Placement mit bebinderten UD-Halbzeugen

Die Preformherstellung mittels trockenen Rovings wird in der Literatur [7, 37-42] unter den Bezeichnungen „Tow Placement“, „Fiber Placement“ oder „Dry-Fiber-Placement“ geführt. Das Verfahren nutzt die Tapelegetechnologie zur Ablage von „bebinderten“ UD-Rovings [43]. Mittels dieser Technologie ist es möglich, sowohl komplette Preforms aus UD-Rovings, als auch flächige Gewebe / Gelege lokal und lastgerecht zu verstärken [39, 42, 44]. Im Gegensatz zur Preformherstellung mittels flächiger Halbzeuge kann die Endkontur sehr präzise abgelegt werden, sodass der zu recycelnde Verschnitt auf ein Minimum reduziert wird.

Dry-Fiber-Placement (Beispiele: Tenax® Part via Preform [45])	
<ul style="list-style-type: none"> + Lokale Verstärkung möglich + Ablegedicke + Binderverteilung durch variable Düsengeometrie einstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialqualität nicht beeinflussbar - Materialführung der trockenen Fasern aufwendig um Material nicht zu schädigen - Beschränkung auf die am Markt erhältlichen Rovings und Materialkombinationen

Im Vergleich zur klassischen Handablage mit vorgeschrittenen Prepregs kann der Materialdurchsatz von 1 kg pro Stunde auf 6,5 – 11 kg pro Stunde gesteigert werden, bei gleichzeitiger Reduktion des Verschnittes um 5 – 20 % [37]. Die Kombination des „Dry-Fiber-Placements“ mit anderen Verfahren wie mit dem Tailored-Fiber-Placement Verfahren [46] (vgl. Kapitel 2.1.3.3) oder einem Fasersprühprozess [45, 47, 48] ist in Abhängigkeit des Bauteils zweckmäßig.

2.1.3.2 Flechttechnik - Braiding

Die ursprünglich für die Herstellung von Schnüren entwickelte Technologie (Textiltechnik) kann ebenso für die Herstellung von Preforms eingesetzt werden [49]. Für die Preformherstellung werden einzelne Rovings auf einem Kern mit einer Standard Flechtmaschinen, als auch ohne Kern mit einer 3D-Flechtmaschine, zu einer geschlossenen Preform verflochten. Die Herstellung von asymmetrisch offenen, Hohl-, L, C, T, I-Profilen, Abzweigungen, als auch Aussparungen sind mit einer modernen 3D-Flechtmaschine möglich [50, 51]. Das Herstellen von sogenannten Tailored Blanks, d. h. von maßgeschneiderten geschlossenen Preforms, auf einem komplexen Kern mit einer Variation des Durchmessers, lokaler Integration von 0° Lagen sowie Integration von „Inserts“ sind Schlüsselfunktionen für diese Preformtechnologie [9, 44, 52, 53]. Die geflochtene Preform erreicht im Querschnitt eine „net-shape“ Qualität, die Länge der jeweiligen Preform muss maschinell bearbeitet werden.

Flechttechnik (Beispiele: Profile wie Stringer, Spanten [53], etc.; Rotorblätter - A400M)	
+ Einfache, geschlossene Profile wirtschaftlich herstellbar	- Keine flächige Preform herstellbar - Keine lokale Verstärkung möglich
+ Automatisierbarkeit	
+ Nahezu „net-shape“ Qualität	

2.1.3.3 Tailored-Fiber-Placement (TFP)

Das Tailored-Fiber-Placement Verfahren, kurz TFP ist ein Verfahren zum Ablegen von Verstärkungsfasern mittels Sticktechnologie [54]. Beim Tailored-Fiber-Placement wird der Roving von einem Polymerfaden oder auf einer Verstärkungsfaser [55] basierendem Faden mit einem Zickzackmuster [56] auf dem Grundmaterial fixiert. Die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der verwendeten Materialien wie dem Grundmaterial, dem Nähfaden oder auch dem Rovingmaterial, sind nahezu unbegrenzt. Die Möglichkeit der Verwendung eines dünnen Grundmaterials und des anschließenden maschinellen Entfernens erlaubt die Herstellung von offenen Strukturen. Die lokale Verstärkung des Bauteiles mit UD-Rovings lässt den Einsatz kostengünstiger Grundmaterialien mit einer Strukturoptimierung in den Hauptbelastungsebenen, zur Reduktion der größten Belastung, zu [57-60]. Die Herstellung von textilen Preforms mit dem „Tailored-Fiber-Placement“ Verfahren kann durch ein Besäumen nahe den

Nähfäden in einer „net-shape“ Qualität erfolgen [61]. Aufgrund der Vernähung der lokalen Verstärkungsfasern sind nur flache Verstärkungen möglich.

Tailord-Fiber-Placement (Beispiele: Zug-Druck-Stäbe; Fahrrad Brake Booster [56]; Roboterarm)	
<ul style="list-style-type: none"> + Flächige Preforms herstellbar + Automatisierbarkeit + Nahezu „net-shape“ Qualität (nach Preform Besäumung) + Nahezu beliebige Verstärkungsgeometrien 	<ul style="list-style-type: none"> - Näheinflüsse vorhanden - Lokale Verstärkung mit einer hohen Aufdickung nur bedingt möglich

2.1.3.4 Fiber-Patch-Preforming (FPP)

Das Fiber-Patch-Preforming Verfahren setzt sich aus zwei Verfahrensschritten, dem Längenzuschnitt des Binderrovings sowie dem Platzieren, zusammen. Als Ausgangsmaterial für das FPP Verfahren wird ein Faserband aus endlosfaserverstärkten Rovings, mit thermoplastischen als auch mit reaktiven Binderpartikeln verwendet [54]. In einem ersten Schritt werden die sogenannten Fiber Patches mithilfe eines Schneidsystems mechanisch mittels Klinge oder energetisch mittels Laser, in die erforderliche Geometrie geschnitten. Das Applizieren der Fiber Patches an die berechnete Position erfolgt durch schnelle und präzise Ablegesysteme, wie z. B. durch Delta Robotik Systemen [44]. Zur präzisen Positionierung der Fiber Patches sind sowohl die Toleranzen beim Schneiden [62] sowie auch die Abweichungen bei der Aufnahme- bzw. beim Platzieren der Patches auf der Werkzeuoberfläche von Bedeutung. Die Patchlängen sind von dem eingesetzten Prozess als auch dem herzustellenden Bauteil abhängig, im Schnitt sind sie zwischen 40 – 80 mm lang.

Fiber-Patch-Preforming (Beispiele: Aktuell in der Entwicklungsphase)	
+ Verstärkung handelsüblicher Halbzeuge + Geringe Dicke der Verstärkung möglich + Aufbau von komplexen Preforms, keine Drapierungsproblematik	- Platziergeschwindigkeit (Materialdurchsatz) - Materialauswahl (keine Endlosfasern)

2.1.3.5 RoboMAG

Im Unterschied zu anderen Preformherstellungsmethoden werden beim RoboMAG-Verfahren keine Zusätze wie Polymere oder Klebstoffsysteme, Nähfäden oder sonstige Materialien benötigt. Anstelle einer internen Fixierung innerhalb der Bauteilfläche erfolgt bei diesem Preformverfahren die Fixierung außerhalb [62]. Hierbei werden die trockenen Fasern direkt auf das Endkonturwerkzeug appliziert und durch ein das Werkzeug umlaufendes Band fixiert [63]. Diese Fixierung kann durch ein selbstklebendes Klebeband oder eine anderweitige Rovingfixierung erfolgen.

RoboMAG (Beispiele: Aktuell in der Entwicklungsphase)	
+ Verwendung von Standardrovings + Kein Einfluss des Fixierungsmaterial	- Preform muss auf Ablegetool injiziert werden - Nur konvexe Materialablage möglich - Faserorientierung kann sich während der Infusion / Injektion ändern

2.1.3.6 Preformherstellung mittels Vereisungstechnik

Die Verwendung von Wasser als Klebefilm für die Preformherstellung wird bei der Vereisungstechnik genutzt. Hierbei wird zur Fixierung der einzelnen Lagen Wasser auf eine gekühlte Form aufgesprüht. Dabei wechselt der Aggregatzustand des Wassers von flüssig in eine feste Phase und ermöglicht so eine Anhaftung der Fasern an der Form oder der vorhandenen Preform. Nach Beendigung der Ablegephase muss die Preform im gefrorenen Zustand in bzw. auf die Infiltrationsform aufgelegt werden. Durch eine mehrstündige Evakuierung der Luft erfolgt eine vollständige

Trocknung der Verstärkungsfasern vor der eigentlichen Infiltration. Hierdurch wird eine ökonomische Herstellung erschwert. [64]

Vereisungstechnik (Beispiele: Aktuell in der Entwicklungsphase)	
<ul style="list-style-type: none"> + Verwendung von Standardrovings + Kein Einfluss von Fixierungsmaterial 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Zykluszeit durch die Entfernung des Wassers unter Vakuum - Aufwendige Preformherstellung und Lagerung - Faserorientierung kann sich während der Infusion / Injektion ändern

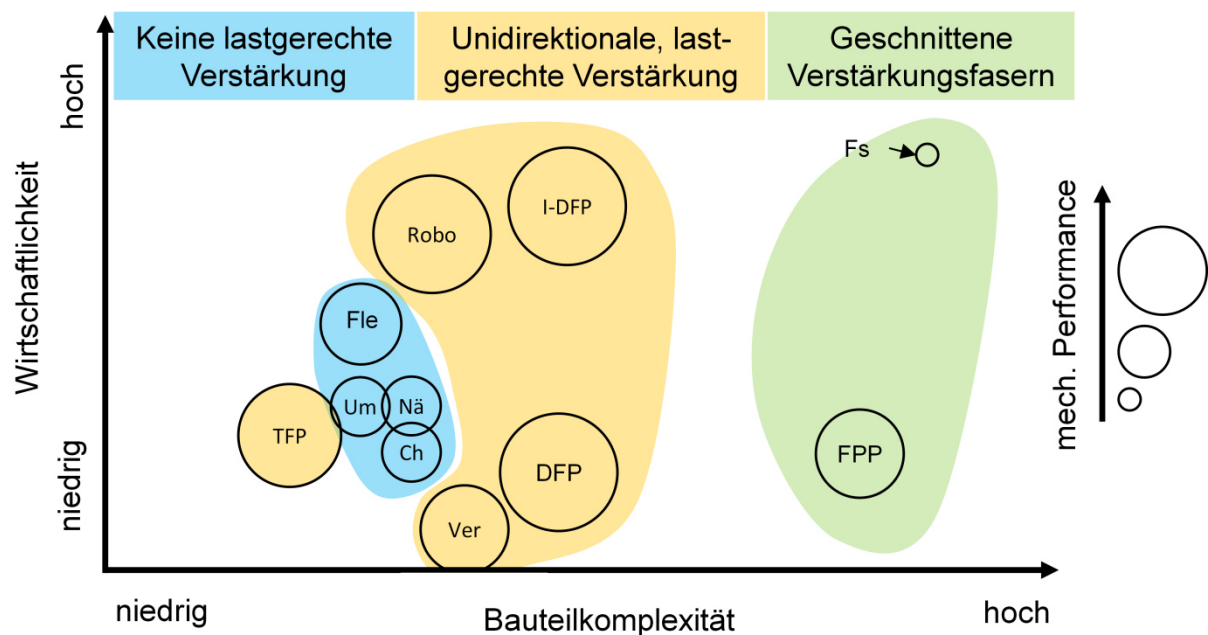
❖ **Fazit der Fertigungsverfahren zur Herstellung von Preforms für LCM - Prozesse**

Eine generelle Aussage über die beste „Preformingmethode“ für alle Bauteile kann nicht getroffen werden, da die Eigenschaften bzw. die einstellbaren Parameter der Preformingprozesse, als auch die Bauteil- / Prozessanforderungen zu unterschiedlich sind. Abbildung 2.3 illustriert eine Analyse der aufgezeigten Preformingverfahren bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit, der möglichen Bauteilkomplexität sowie der mechanischen Performance. Die Einteilung zu den drei Verstärkungsvarianten - keine lastgerechte Verstärkung, UD lastgerechte Verstärkung und geschnittene Fasern – hängt von dem untersuchten Bauteil ab.

Die höchste mechanische Performance innerhalb eines Bauteiles kann durch Dry-Fiber-Placement Methoden, aufgrund der unidirektionalen Faserverstärkung, erzielt werden. Die Bauteilkomplexität der Fiber Placement Methoden ist abhängig vom jeweiligen Verfahren, jedoch nur im Mittelfeld aller Preformingverfahren platziert. Ursachen hierfür sind die Störkontur des TLK-Endeffektors sowie die Einschränkungen durch die Anpressrolle.

Die Bedeutung der direkten Preformingmethoden als eine Herstellung von lastoptimierten Strukturen [65] zur Bauteilherstellung direkt aus dem Roving, wird zunehmen. Der aufwändige und kostenintensive Schritt zur Herstellung von Geweben oder Gelegen entfällt [66]. Zusätzlich zur Reduktion der Kosten durch den Entfall eines Arbeitsschrittes, sinken die Bauteilkosten durch die genaue Platzierung der Rovings im Dry-Fiber-Placement Prozess, welches ebenso die Abfallmaterialkosten reduziert. Die Anforderungen im Automobilbereich [65] bezüglich lastoptimierter Strukturen

können somit durch dem Einsatz der Dry-Fiber-Placement Methoden erreicht werden.



TFP	Tailored-Fiber-Placement	DFP	Dry-Fiber-Placement
Fle	Flechten / Braiding	Robo	RoboMAG
Um	Binderumformtechnik	I-DFP	In-situ DFP / Online-Bebinderung
Nä	Nähtechnologie	FS	Fasersprühen
Ch	Chemical Stitching	FPP	Fiber-Patch-Preforming
Ver	Preformvereisung		

Abbildung 2.3: Preformingverfahren im Vergleich

2.2 Methoden des Faserspreizens

Die meisten Verarbeitungsprozesse zur Herstellung von High-Performance Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen erfordern homogene und einstellbare Eingangsmaterialien als Grundvoraussetzung für einen stabilen und zertifizierbaren Prozess. Die am meisten verwendeten Verstärkungsmaterialien bei Faser-Kunststoff-Verbunden wie Geweben oder Gelegen, werden aus einem Roving als Ausgangsprodukt hergestellt. Durch das Spreizen eines Rovings wird die Homogenisierung der Bauteildicke als auch des Faservolumengehaltes im Bauteil verbessert. Dies wirkt sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften aus. Darüber hinaus können durch eine gezielte Variation der Rovingbreite im Prozess die Eigenschaften für einen Zwischenprozess oder des späteren Endproduktes lokal variiert werden, so z. B. für die Generierung von Lücken zur Vereinfachung der Imprägnierung [67].

Für einen gleichmäßigen Bindereintrag bei der Bebinderung eines Rovings mit Binderpulver ist eine definierte Breite des Rovings während des gesamten Prozesses unabdingbar. Im Nachfolgenden werden die am häufigsten eingesetzte Technologien zur Faserspreizung aufgeführt und erläutert.

2.2.1 Faserspreizung durch Umlenkung

Die einfachste Spreizungsmethodik ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Hierbei wird das Filamentbündel (Roving) über einen horizontal angeordneten Rundstab (Pin) geführt. In Abhängigkeit der Filamenthöhe ergeben sich unterschiedliche Radien zwischen der Innen- (R_1) und Außenseite (R_2).

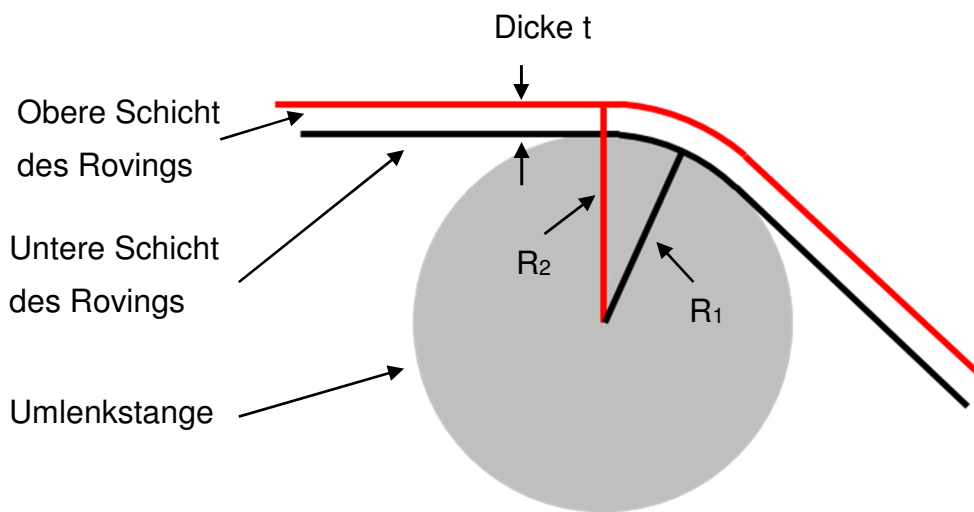


Abbildung 2.4: Faserspreizung durch Umlenkung mittels Pin

Diese Vergrößerung des Radius R_1 zu R_2 resultiert in einer Verlängerung des Bogenradius des umschlungenen Kreissegmentes. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Dehnungen und somit Faserspannungen, da eine Längenänderung der Faser nicht möglich ist. Aufgrund dieser erhöhten Zugspannung der Fasern versuchen diese einen geringeren Radius einzunehmen um die Zugspannung zu verringern, wodurch der Roving gespreizt wird. Zusätzlich zur starren Variante kann die Faserspreizung durch eine Umlenkung durch eine horizontale, amplitudische Anregung des Pins optimiert werden [68].

2.2.2 Radiuspreizer

Wird ein Filamentbündel über eine konvex gebogene Stange, die einer geraden Stange vorgeschaltet ist, geführt, wird das Filamentbündel bzw. der Roving gespreizt. Durch den in der ersten Stange vorhandenen Biegeradius wird die Zugkraft der Fasern umgelenkt. Die höchste Kraft bzw. Zugspannung wirkt dabei in der Mitte der

Stange, welche nach außen hin abnimmt [68]. In dem von Rudolf Kern aus dem Jahre 1938 eingereichten Patent wird die konvexe Stange zusätzlich angeregt. Die Anregung in Form von mechanischen Schwingungen erleichtert das Auseinanderfächern des Rovings.

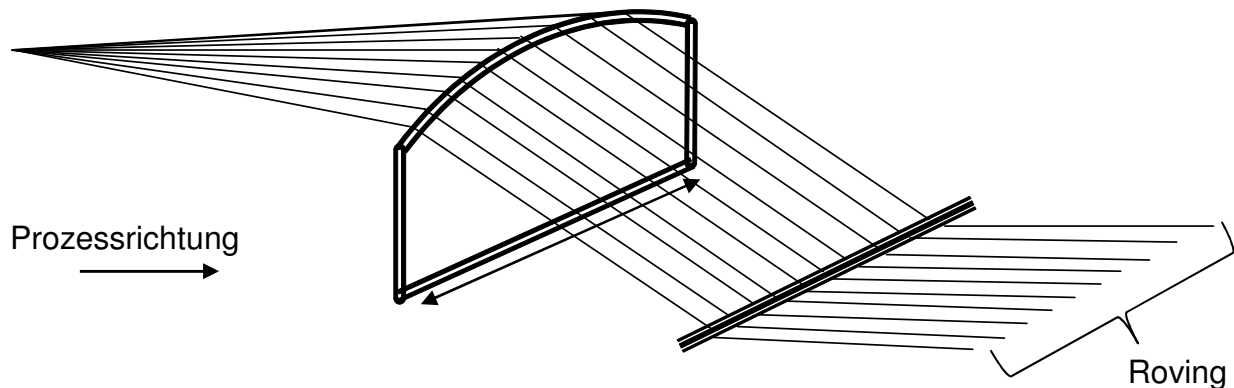


Abbildung 2.5: Rovingspreizung mittels Radiuspreizer nach [68]

- **Konvexe gegenläufige Drehwellen:**

Eine weitere Methodik um eine Spreizung eines Rovings zu erreichen, stellen zwei konvex gegenläufige Wellen dar [69]. Die gegenläufigen Wellen haben, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, eine unterbrochene Außenkontur in Form von konvexen Stegen, zwischen denen das Faserbündel läuft. Die konvexen Kanten der Stege sorgen für ein differentes Spannungsbild quer zum Roving. Unterstützt wird das Spannungsbild durch die vertikal oszillierende Belastung des Faserbündels in Folge der Anordnung der Stege. Durch eine von außen erzeugte Rotation der Drehwellen wird der Roving je Umdrehung erneut auf eine Kante platziert, was einem schlagartigen Abrutschen des Filaments entgegenwirkt.

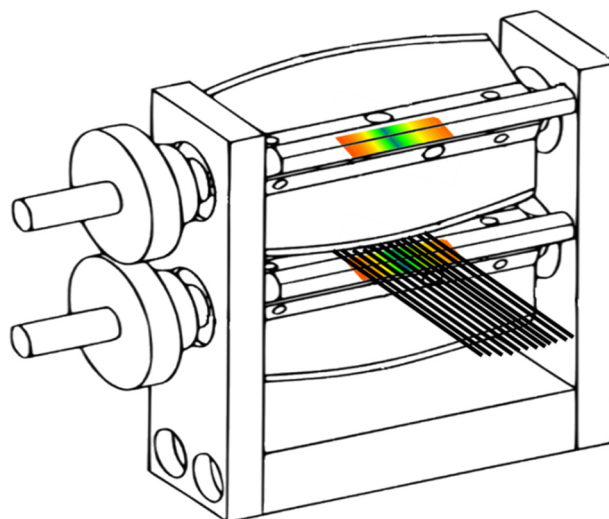


Abbildung 2.6: Rovingspreizung durch konvex gegenläufige Drehwellen nach [69]

2.2.3 Fukui-Effekt

In einem von Kawabe & Tomoda aus dem Jahre 1996 [70] beschriebenen Patent werden zur Spreizung eines Filamentbündels strömungsmechanische Effekte ausgenutzt. Durch die Applizierung eines Unterdruckes auf den Roving wird dieser beim Aufspreizen geschont. Abbildung 2.7 zeigt den Verfahrensweg des Rovings durch den Spreizungsprozess. Der durch die Antriebsrolle A und B bewegte Roving wird über einen Hohlraum geführt (Punkte C und D), welcher mittels Unterdruck Luft anströmen lässt. Die hierbei entstehende Sogwirkung verursacht eine Auslenkung des Rovings in den Hohlraum. Eine Regelung der Antriebsrollen sorgt für einen konstanten Biegeradius durch die Sogwirkung des Rovings im Hohlraum. In Abhängigkeit der Länge des Hohlraumes steigt die Effektivität der Spreizung an. Durch mehrere hintereinandergeschaltete Spreizräume wird sowohl die effektive Länge, als auch eine Erzeugung eines möglichst homogenen Luftstromes mit möglichst wenigen Verwirbelungen, erleichtert. [70]

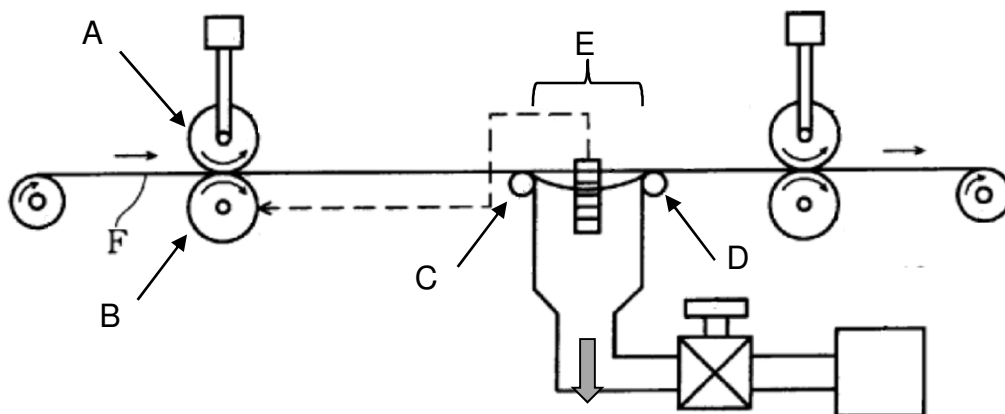


Abbildung 2.7: Prozessabbildung des Spreizprozesses mittels Fukui-Effekt [70]

Innerhalb des Prozessraumes E durchläuft der Roving drei unterschiedliche Stadien der Faserspreizung, welche in Abbildung 2.8 dargestellt sind. Erläutert werden kann die Wirkungsweise anhand des Gesetzes von Bernoulli (2.1).

$$\rho \frac{v^2}{2} + p = \text{const.} \quad (2.1)$$

Mit ρ Dichte der Fluids, v Strömungsgeschwindigkeit, p Druck

Von der linken bis zur rechten Abbildung strömt die Luft zuerst um den kompakten Roving und am Schluss gleichmäßig von oben nach unten durch den Roving. Die Druckverteilung um den Roving ist ungleichmäßig, ober- und unterhalb des Rovings ist der Druck hoch, links und rechts neben dem Roving gering. Dementsprechend ist

hier die Strömungsgeschwindigkeit am höchsten. Die Kraft, welche aus der Druckdifferenz zwischen $P_1 > P_2 > P_3$ resultiert, wirkt spreizend auf die Filamente des Rovings. Das in der Mitte dargestellte Bild stellt eine Zwischenstufe im Spreizungsprozess dar, bis sich die Druckverhältnisse mehr und mehr angleichen und der Roving gespreizt vorliegt, wie das rechte Bild zeigt.

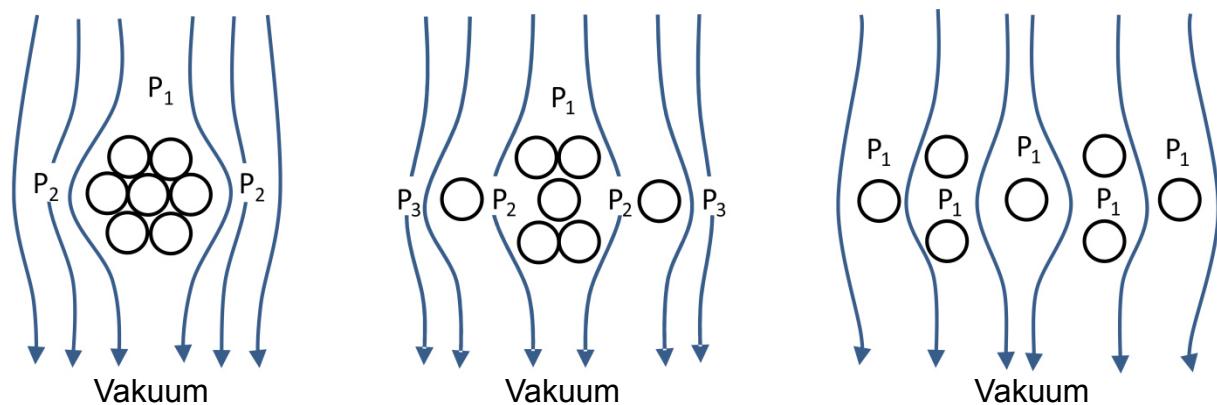


Abbildung 2.8: Veranschaulichung des Fuki-Effekts [70]

2.2.4 Venturi-Effekt

Das Patent zur Spreizung und Begrenzung eines Rovings von Clare [71] nutzt den sogenannten Venturi-Effekt. Die Abbildungen A 1 und A 2 sind Schnittansichten durch den Mittelpunkt der Figuren B 1 und B 2. A 1 und A 2 veranschaulichen den Querschnitt und die Form des Rovings in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstrecke innerhalb der Spreizeinheit. Durch den niedrigen Druck innerhalb der ersten Venturidüse wird das inhomogene Filament aufgefächert. Mit Hilfe einer weiteren Venturidüse werden die Fasern durch die gegenströmende Luft gespreizt und homogenisiert. Die Faserspreizung erfolgt somit durch die Venturidüse aufgrund der Dickenreduzierung des Rovings, welche wesentlich stärker ist als die Breitenreduzierung [71].

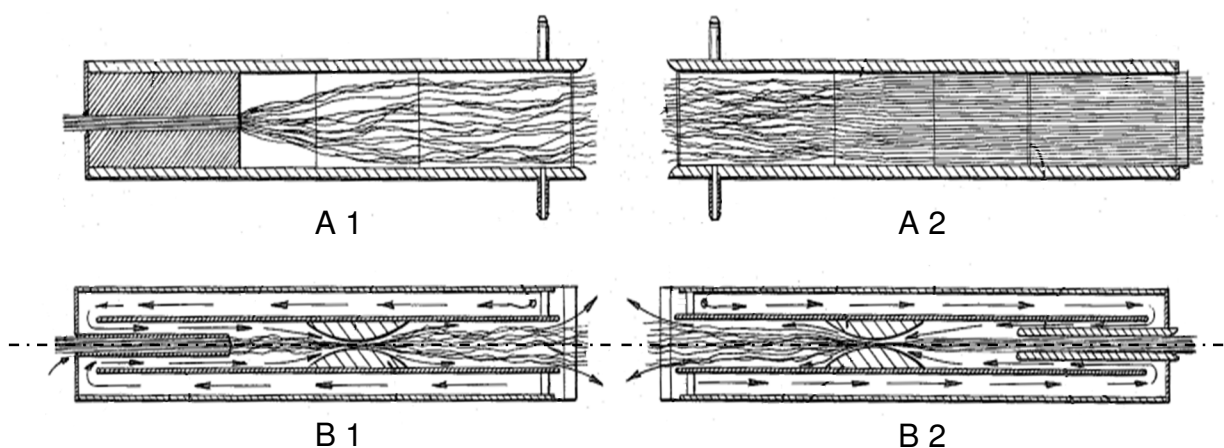


Abbildung 2.9: Veranschaulichung des Venturi-Effekts [71]

❖ Fazit zu Methoden des Faserspreizens

Alle Technologien zur Faserspreizung haben das Ziel ein Faserbündel homogen zu spreizen. Aus prozesstechnischer Sicht ist der Spreizungsaufwand für das Spreizen mittels Umlenkung am geringsten und für das Spreizen mittels Fukui-Prinzip am aufwendigsten, da hier der Roving im Ausgangsprinzip spannungsfrei sein muss. Mittels welcher Methodik ein Hersteller seine Fasern spreizt, ist meist ein Firmengeheimnis. Aufgrund der Umsetzbarkeit ist jedoch davon auszugehen, dass eine Abwandlung der ersten dargestellten Spreiztechnologie vermehrt zum Einsatz kommt. Hierbei kann die Faserspreizung durch den Umschlingungswinkel der Pins sowie der Vibrationsfrequenz und der Vibrationsamplitude eingestellt werden. In Abhängigkeit der verwendeten Fasern, sei es eine „CF-High Modulus“ oder eine „CF-High Tenacity“, als auch des Spreizungsortes, wie z. B. innerhalb einer Prozesskette oder außerhalb, variiert das jeweils beste Konzept zur Faserspreizung.

2.3 Tapelegetechnologie

Die grundsätzliche Funktionsweise eines Tapelegekopfes (TLK) ist in Abbildung 2.10 aufgezeigt. Das auf einer Spule gelagerte duroplastische oder thermoplastische Verstärkungsmaterial wird dem TLK zugeführt, innerhalb des Systems gelenkt, am Ende durch eine Energiequelle erwärmt und mittels einer Konsolidierungsrolle auf die Kontur gepresst [72]. Eine Schneideinheit innerhalb des TLK längt die Faser bzw. das Halbzeug auf die benötigte Länge ab. Ein automatischer Vorschub fördert das Tape anschließend wieder durch den TLK zur Konsolidierungsrolle, sodass die nächste Bahn abgelegt werden kann.

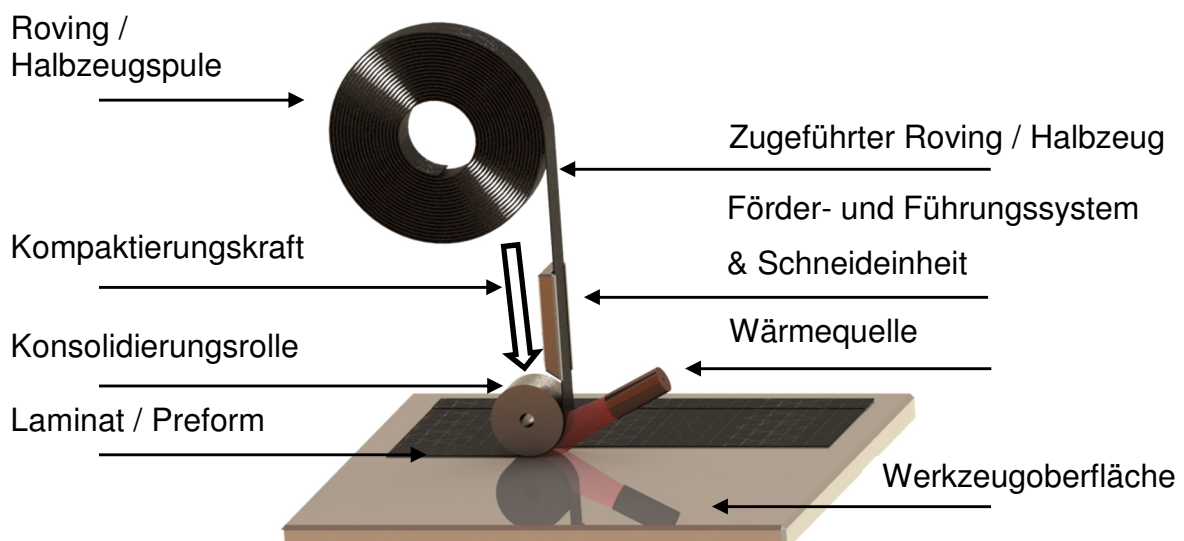


Abbildung 2.10: Grundsätzliche Komponenten eines Tapelegekopfes [73]

Duroplastische, vorimprägnierte Prepregs sind gegenwärtig die am häufigsten eingesetzten Halbzeuge im Tapelegeprozess [1]. Diese werden als Automated-Fiber-Placement – AFP oder Automatic-Fiber-Laying – AFL bezeichnet. Die derzeitigen Haupteinsatzgebiete des Tapelegeprozesses mittels Prepregtapes sind die Luft- und Raumfahrt, z. B. mit der Herstellung der Boeing 787 – Dreamliner und des Airbus A350 XWB. Das vorimprägnierte Tape wird dem Ablegekopf meist gekühlt zugeführt, um die Anhaftungswirkung gering und die Viskosität des Harzes hoch zu halten. Während des Ablegens wird das Material erwärmt, um die Anhaftungswirkung des Polymers zu erhöhen und die Viskosität zu reduzieren. Innerhalb eines nachgelagerten Prozessschrittes wird das Material in einem Autoklaven, d. h. innerhalb eines Vakuumsackes mit appliziertem Überdruck, oder im Out-of-Autoclave – OoA nur mittels Vakuum [74] zum finalen Bauteil ausgehärtet. Die Ablegegeschwindigkeit ist sowohl von der Geometrie des herzustellenden Bauteiles, von dem eingesetzten Material als auch vom Aushärteprozess abhängig. Die maximal mögliche Ablegegeschwindigkeit eines erhältlichen Ablegesystems [75] wird mit 60 m/min angegeben. Unter Berücksichtigung der maximalen Schneidgeschwindigkeit des Systemes, welche bei 36 m/min liegt, kann die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie sowie der Beschleunigungsparameter bei Beschleunigung und beim Abbremsen berechnet werden.

Im Gegensatz zum duroplastischen Tapelegen kann beim Einsatz von thermoplastischen Halbzeugmaterialien eine Reduzierung der Prozessschritte erfolgen, welche durch den Einsatz des sogenannten in-situ Tapelegens möglich wird. Das in-situ Tapelegen zeichnet sich durch den Entfall einer zusätzlichen Kompaktierung innerhalb eines Autoklaven aus. Die maximale Prozessgeschwindigkeit beim in-situ Tapelegen von thermoplastischen Halbzeugen unterliegt zum Teil den gleichen Abhängigkeiten wie beim duroplastischen Tapelegen. Durch die Möglichkeit des in-situ Tapelegens entfällt der langandauernde Prozessschritt in einem Autoklaven [76], jedoch unter der Prämisse eines langsameren Ablegeprozesses. Die maximale Ablegegeschwindigkeit ist material- und prozessabhängig und liegt bei weniger als 20 m/min für das in-situ Tapelegen. Ein schnelleres Ablegen ist bei einem nachgeschalteten Konsolidierungsschritt möglich. Die Wirtschaftlichkeit beider Varianten muss bauteilabhängig geprüft werden. Innerhalb des Prozesses wird ein vollständig imprägniertes und konsolidiertes thermoplastisches Halbzeug kurz vor der Ablage erwärmt. Das Erwärmen

kann u. a. mittels Laser [77-79] oder Heißgasdüse [76, 80] erfolgen, sodass die Temperatur der thermoplastischen Matrix oberhalb der Schmelztemperatur liegt ($T > T_{\text{Schmelz}}$). Eine temperierte Anpresswalze presst die nun schmelzflüssige Matrix mit UD-Faserverstärkung auf die abzulegende Kontur, konsolidiert diese und reduziert die Matrixtemperatur ($T < T_{\text{Schmelz}}$). Durch optimale Prozessparameter ist ein in-situ Tapelegen mit einem geringen Porengehalt möglich [76, 79, 81-83], welches die Bauteilkosten reduziert [84, 85].

Analog zum thermoplastischen und duroplastischen Tapelegen ist es ebenso möglich, trockene, bebinderte Rovings (Dry-Fiber-Placement) abzulegen. Die Funktionsweise ist hierbei nahezu identisch mit der des thermoplastischen Tapelegens. Aufgrund des geringen Bindergehaltes (< 10 Gew.- %) auf den Binderrovings können im Vergleich zu dem thermoplastischen Tapelegen auch alternative Erwärmungsmethoden eingesetzt werden. Hierbei reduzieren elektrische Systeme wie ein Infrarotstrahler [75] oder ein Heißluftherhitzer¹ die Sicherheitsvorkehrungen und senken die Kosten. Nach dem Erwärmen des Bindermaterials wird der Binderroving auf dem Ablegewerkzeug oder der schon abgelegten Preform durch die Andrückrolle angepresst und gleichzeitig die Temperatur reduziert, sodass ein Anhaften des Binderrovings gewährleistet ist. Eine schnelle Erwärmung des geringen Anteils von Bindermaterial auf dem Roving erlaubt eine theoretisch höhere Ablegegeschwindigkeit im Vergleich zum duroplastischen Tapelegen. Dies muss jedoch mit zukünftigen Hochgeschwindigkeitsablegesystemen noch unter Beweis gestellt werden. Dem Ablegen von Binderrovings muss jedoch immer ein LCM-Prozessschritt zur vollständigen Bauteilherstellung folgen.

❖ Fazit Tapelegetechnologie

Die Tapelegetechnologie mit duroplastischen Halbzeugen ist vollständig automatisiert und befindet sich innerhalb der Luftfahrtbranche im Serieneinsatz. In Abhängigkeit des herzustellenden Bauteiles kann zwischen Thermoplast-, Duroplast- oder dem Bindertapelegen variiert werden. Jedes Verfahren bietet seine Vor- und Nachteile und muss bei der Prozessauswahl für die Bauteilherstellung, unabhängig von den unterschiedlichen Eigenschaften des eingesetzten Polymers, berücksichtigt werden.

¹ Osram Sylvania Air Heaters, <http://www.sylvania.com>

Thermoplastisches Tapelegen	
+ Keine zusätzliche Konsolidierung (im Autoklaven) beim in-situ Tapelegen notwendig	- Ablegegeschwindigkeit niedrig
+ Bauteilgröße	- Materialkosten
Duroplastisches Tapelegen	
+ Vollständig automatisiert und im Serieneinsatz	- Aufwendige Aushärtung (Autoklav / Out-of-Autoclave)
+ Ablegegeschwindigkeit	- Materialkosten
Ablegen von Binderrovings	
+ Materialkosten	- Materialtransport / Handlung
+ Ablegegeschwindigkeit	- Imprägnierprozess notwendig
+ Nutzung schneller Harzsysteme im RTM Prozess	

2.4 Permeabilität der Preform

Nach der Preformherstellung mittels Tapelegetechnologie (Kapitel 2.3) erfolgt die Infiltrierung der trockenen Fasern mit der Matrix (Kapitel 2.5). Der Faservolumengehalt und die Imprägniergüte stellen hierbei wesentliche Faktoren der Bauteilqualität dar [86]. Die Imprägnierbarkeit / Tränkbarkeit, genauer die Permeabilität der Verstärkungsfasern, kann mithilfe des Gesetzes von Darcy [87] beschrieben werden. „Darcy’s law“ stellt eine spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichung dar. Die Validierung des Gesetzes für Verstärkungstextilien wurde u. a. von Adams und Rebenfels [88] wie auch von Gebart [89] durchgeführt. In Abbildung 2.11 ist ein schematischer Aufbau eines eindimensional, durchflossenen porösen Mediums dargestellt.

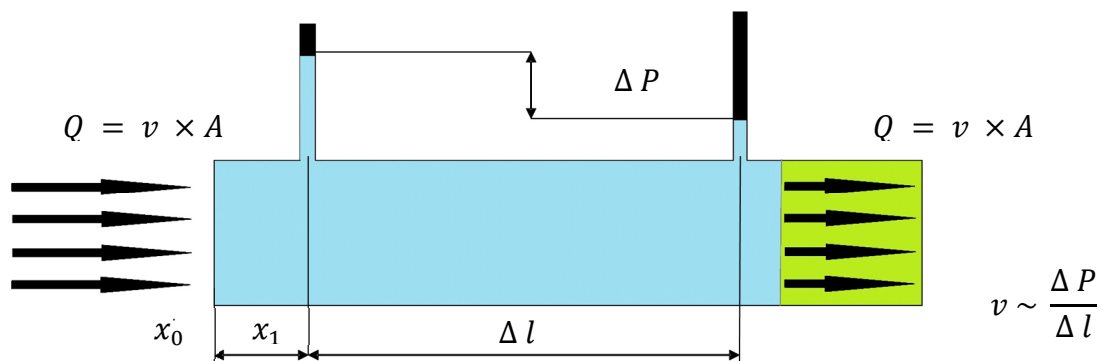


Abbildung 2.11: 1D Fließen durch ein poröses Medium nach [1]

$$v = \frac{K}{\eta} \times \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (2.2)$$

Darcy's Gesetz setzt sich aus der über das Volumen gemittelten Fließgeschwindigkeit v , der Viskosität des Fluides η , dem Druck p als auch der Fließlänge l zusammen. Die Permeabilität von Verstärkungsfasern wird mit den Kenngrößen K_1 , K_2 und K_3 angegeben. In der Ebene der Verstärkungsfasern gibt K_1 die Ausrichtung mit der höchsten Permeabilität an, was der Hauptachse der Fließellipse entspricht. Die niedrigste Permeabilität in der Ebene, also die kürzere Achse der Fließellipse wird als K_2 deklariert. Der Winkel α gibt hierbei die Winkelverschiebung von K_1 und K_2 gegenüber einer horizontalen Ellipse an. Die Permeabilitätskennziffer K_3 gibt die Fließfront senkrecht zur aufgespannten Fläche durch K_1 und K_2 an, also über die Dicke des Bauteiles. Die Einheit der Permeabilität wird in m^2 angegeben. In Abbildung 2.12 ist eine beispielhafte Fließellipse (Ausbreitung in 2D) sowie eine Fließellipse (Ausbreitung im 3D Raum) in Abhängigkeit des Angusszeitpunktes angegeben.

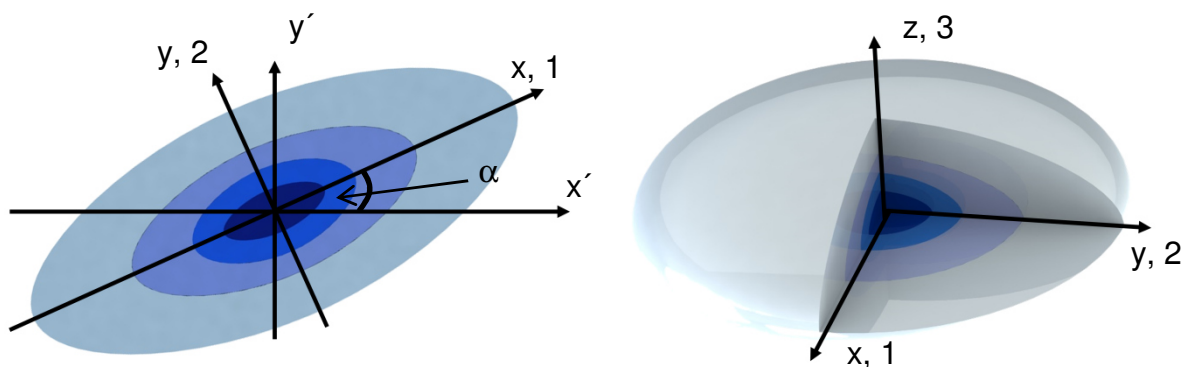


Abbildung 2.12: Unterschiedliche Ausbreitungsformen von Fließfronten mit einem Punktanguss bei 2D- und 3D-Messung [90]

Die Permeabilität eines faserverstärkten porösen Mediums kann durch unterschiedliche Verfahren ermittelt werden. Hierbei werden transiente, also ungesättigte, und stationäre, also gesättigte, Messverfahren unterschieden. Die ungesättigte Permeabilität kann in 1D, 2D oder 3D Messverfahren und wahlweise mit konstantem Injektionsdruck oder konstantem Volumenstrom unterschieden werden. Beim 1D Verfahren [91] müssen mindestens drei Versuche zur Bestimmung der Hauptachsenpermeabilität von K_1 , K_2 und dem Verdrehwinkel α durchgeführt werden, wohingegen bei einem 2D Messverfahren [90, 92-96] nur eine Messung notwendig ist. Für die Bestimmung der Dickenpermeabilität sind sowohl ungesättigte [90] als auch gesättigte Ver-

fahren [97] etabliert. Vor- und Nachteile der gängigsten Permeabilitätsmethoden sind in der Literatur beschrieben [1].

Die Analyse bzw. die Kenntnis der Permeabilität eines Verstärkungsmaterials ist für die Simulation eines Infiltrationsverlaufes eines Bauteiles als auch zur Prozesskontrolle von hoher Bedeutung. Durch die Kenntnis der Permeabilität kann die Anzahl und Anordnung der Angusspunkte, die Angussstrategie, der Injektionsdruck, die wahrscheinliche Injektionszeit, als auch die Fließfront innerhalb einer Preform simuliert werden [98].

❖ **Fazit der Preform – Permeabilität**

Die Kenntnis der Permeabilität einer trockenen Verstärkungsstruktur in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes ist für die Matrixinfusion bzw. –injektion von hoher Bedeutung. Hierdurch kann eine Simulation der Matrixinfiltrierung des Bauteiles erfolgen und eine Aussage über u. a.: die beste Angussstrategie; über die Zeit zur vollständigen Imprägnierung der Preform; welche Stellen einen zu hohen Faservolumengehalt aufweisen und somit eine Imprägnierung nicht möglich ist, getroffen werden. Ebenso können Lufteinschlüsse reduziert und potentielle Engstellen in der Infiltration erkannt werden. Durch z. B. eine Optimierung der Werkzeugkavität können „Kavitätseingstellen“ behoben oder durch unterschiedliche Preformingmethoden bzw. gewählten Verarbeitungsparameter wie u. a. die Stichlänge, die Stichanzahl, der Bindergehalt und das Bindermaterial, die Permeabilität in der Preform an das Bauteil angepasst werden [1, 99].

2.5 LCM - Prozesstechnologien

Nach der in Kapitel 2.1 aufgezeigten Herstellung von Preforms wird im weiteren Prozessschritt die Preform mit einem meist duroplastischen Harz imprägniert. Einige Infiltrierungsmethoden sind in Abbildung 2.13 dargestellt, wobei es zwischen den reinen Infusionstechniken und den reinen Injektionstechniken auch Kombinationen beider Methoden gibt. Eine Kombination aus „Infusionstechnik mit Überdruck beim Aushärten“ besteht hierbei aus einer infundierten Preform, welche unter Überdruck ausgehärtet wird. Eine andere Kombination wäre das VARTM –Verfahren wobei die Werkzeugkavität vor dem RTM Injektionsprozess zusätzlich mittels Vakuum beaufschlagt wird. Im Nachfolgendem werden sowohl das Vacuum Assisted Resin Infusion

(VARI), das Resin Transfer Molding (RTM) als auch auf das Advanced RTM (ARTM) als gängigste LCM-Verfahren näher beschrieben [1].

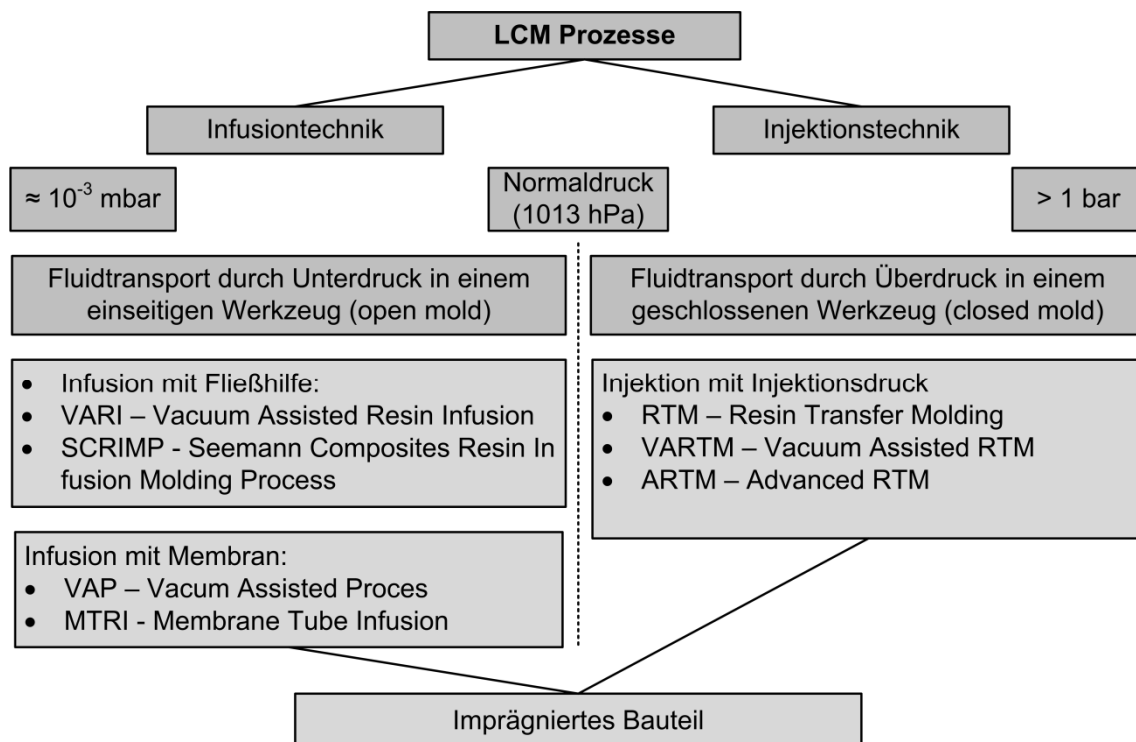


Abbildung 2.13: Übersicht über verschiedene Infiltrierungstechnologien [1]

2.5.1 VARI – Vacuum Assisted Resin Infusion

Das VARI Verfahren stellt das einfachste und kostengünstigste Verfahren zur Infusion von trockenen Fasern mit einer Matrix dar. Hierbei wird die Preform, bestehend aus den Verstärkungsfasern, in eine einteilige Form platziert. Ein definierter Lagenaufbau aus Abreisgewebe, Fließmedium, Loch- und Vakuumsfolie wird über die bereits platzierte Preform drapiert. Durch eine Beaufschlagung des Vakuumsackes mit Vakuum wird die Preform mit maximal dem Umgebungsdruck kompaktiert. Die Matrix wird nach dem Öffnen eines Ventiles in der Harzleitung, durch die anliegende Druckdifferenz, in das Bauteil hineingezogen. Ein skizzierter VARI - Aufbau ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

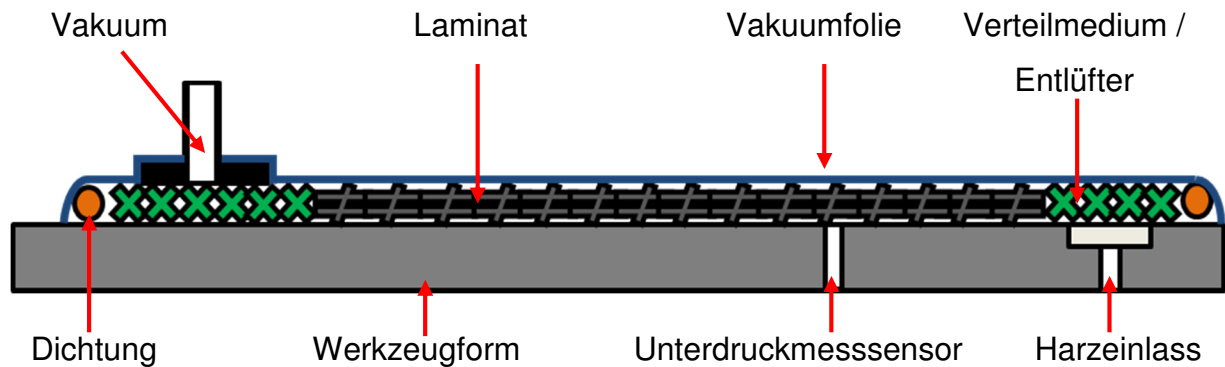


Abbildung 2.14: Aufbau eines Vacuum Assisted Resin Infusion Prozesses [1]

Die Imprägnierung erfolgt zumeist „in-plane“, d. h. die Preform wird zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Vakuumsack entlang der Bauteillänge imprägniert. Nach einer vollständigen Imprägnierung der Preform wird die Matrixzuleitung geschlossen und die Aushärtung startet. Aufgrund der maximalen Druckdifferenz von $P_{VARI} < 1$ bar ist pro Angusspunkt die infiltrierbare Bauteilgröße beschränkt. Ein Einsatz einer Verteilerstruktur für die Matrix und/oder mehrere Angüsse, welche über die Länge bzw. Breite eines Bauteiles verteilt sind, erlaubt auch die Infiltration großer Objekte, wie z. B. einem Windflügel einer Windenergieanlage [100]. Mit unterschiedlichen Angusszenarien wie dem Punkt-, Ring- oder Linienanguss, kann zudem die Infusionszeit und der Imprägnierungsverlauf gesteuert werden. Bei einer Vergrößerung des Angusses sinkt die Infusionszeit [101]. Die Herstellung von Werkzeugen und das benötigte Equipment für das VARI Verfahren sind aufgrund der geringen Anforderungen des Verfahrens vergleichsweise kostengünstig. Die Verarbeitungsrestriktionen des Verfahrens sind ein geringer Faservolumengehalt $< 50\%$, geringe Stückgrößen von ≈ 2000 Stk. / a als auch eine Dickenbeschränkung des Bauteiles [1]. [1]

2.5.2 RTM - Resin Transfer Molding

Im Gegensatz zum VARI Verfahren wird beim Resin Transfer Molding eine mindestens zweiteilige geschlossene Form (closed mold) benötigt (Abbildung 2.15). Nach Platzierung der Preform in der unteren Kavität des Werkzeuges wird das Werkzeug geschlossen. Zusätzliches Verbrauchsmaterial (vgl. VARI) ist nicht erforderlich. Die Preform wird anschließend auf die finale Bauteildicke kompaktiert und die Matrix injiziert.

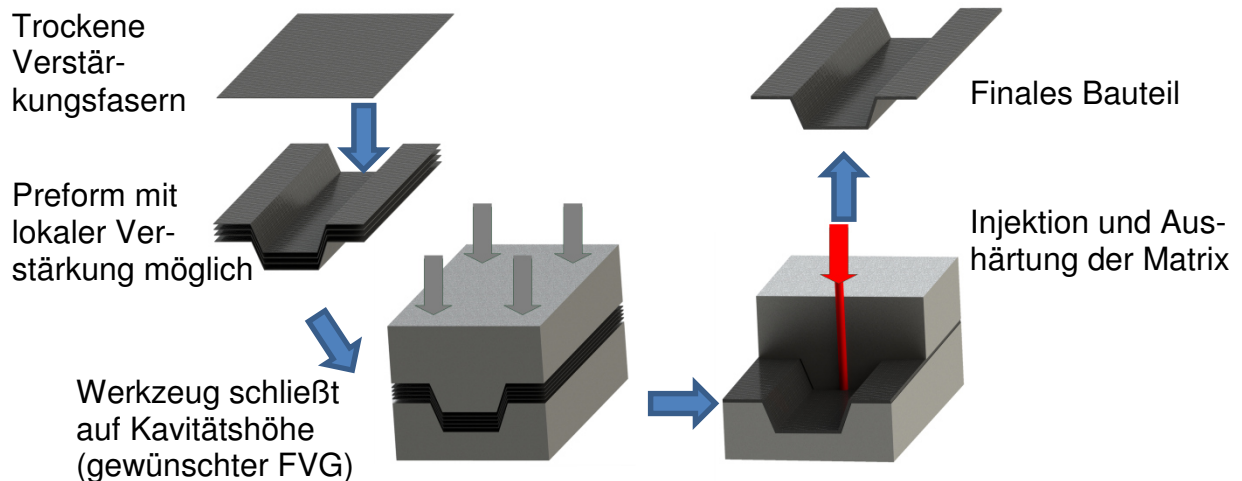


Abbildung 2.15: Prozessablauf eines Resin Transfer Molding (RTM) Prozesses

Die Matrixinjektion erfolgt mit einem definierten Druck- oder Durchfluss- und Temperaturzyklus, wobei die Imprägnierung „in-plane“ erfolgt. Nach vollständiger Imprägnierung startet die Aushärtereaktion des Matrixmaterials aufgrund des chemischen Reaktionsprozesses der Matrix. Der Aushärtezyklus kann durch den Einsatz einer beheizten Form in Verbindung mit einem angepassten Matrixsystem beschleunigt werden. Die Zykluszeit ist abhängig von der Bauteilgeometrie, dem Angusszenario, der Geschwindigkeit der Temperierung des Werkzeuges [102, 103], dem verwendeten Matrixmaterial als auch von der Preform-Permeabilität (Kapitel 2.3). Das verwendete Matrixmaterial wird maßgeblich durch den späteren Einsatzzweck definiert [104]. Im Automobilbau sind Aushärtezeiten der Matrices von < 5 min Stand der Technik [105], wohingegen die Aushärtezeiten in der Luftfahrt mehrere Stunden dauern. Durch eine vollständige Automatisierung werden Zykluszeiten zwischen ca. 5 – 25 min und Seriengrößen > 50.000 Stück / a erreicht, womit sich dieser Prozess auch für die Automobilindustrie eignet [1, 10, 106]. Die Kosten für ein Werkzeug inklusive Presse steigen im Vergleich zum VARI Verfahren erheblich an. Gründe hierfür sind die prozessbedingte Nutzung einer Presse, einer Matrixinjektionsanlage, sowie die Komplexität eines zweiteiligen Werkzeuges [107].

2.5.3 ARTM - Advanced Resin Transfer Molding

Das Advanced RTM (ARTM) oder auch Compression RTM (CRTM) Verfahren ist eine Weiterentwicklung des Standard RTM Verfahrens [1]. Beim ARTM erfolgt das Injizieren der Matrix in die Form gegenüber dem RTM Verfahren vor dem Kompaktieren der Verstärkungsfasern auf die Endkavitätshöhe. Ober- und Unterseite des Werkzeuges werden nach dem Platzieren der Preform auf einen definierten Abstand

zur Preform geschlossen, sodass sich ein Spalt bildet. Der so eingestellte Faservolumengehalt ist niedriger als der finale FVG ($FVG_{\text{Injektion}} < FVG_{\text{Final}}$), sodass sich die definierte Matrixmenge auf der Oberseite der Preform leicht ausbreiten kann. Durch das parallele Schließen der Kavität verteilt sich die Matrix zu Beginn, aufgrund des geringeren Widerstandes innerhalb des Verstärkungsmaterials, zuerst über die komplette Preformoberseite, bevor sie am Rand durch eine Dichtung gestoppt wird. Danach erfolgt durch das Schließen des Werkzeuges die Imprägnierung der Preform in Dickenrichtung. Hierbei wird der Faservolumengehalt erhöht, bis $FVG_{\text{Injektion}} < FVG_{\text{Final}}$ beträgt. Eine Imprägnierung von Bauteilen kann somit in wenigen Sekunden erfolgen [108]. Eine Sonderform des ARTM Verfahrens ist die Spaltimprägnierung. Die Werkzeugoberseite schließt bei diesem Verfahren nicht parallel sondern in einem Winkel [108]. Durch die Möglichkeit zur Automatisierung des Spaltimprägnierungsverfahrens analog dem RTM Verfahren, in Verbindung mit einer gleichzeitig verringerten Imprägnierungszeit, ist eine Produktionskapazität von bis zu 100.000 Stück / a möglich [109]. Ebenso sind bei diesem Verfahren schnell reaktive Harze verarbeitbar [108], was den aktuellen Trend der Aushärtezeit von Harzen widerspiegelt und einer weiteren Verkürzung der Zykluszeit entspricht [105]. Die Anlagen und Werkzeugkosten für das ARTM bzw. CRTM Verfahren sind im Vergleich zu einem Standard RTM Verfahren (High Pressure RTM), bei Berücksichtigung gewisser Vorgaben, kostengünstiger [107]. [1, 110, 111]

❖ Fazit der LCM-Prozesstechnologien

Die Variantenvielfalt an unterschiedlichen Liquid Composite Molding Prozessen ist enorm. So kann durch die Herstellung vom Prototyp mittels manuellem Vakuuminfusionsverfahren bis hin zur Großserie mittels vollautomatisierter RTM / ARTM Verfahren die gesamte Produktmengenvielfalt abgedeckt werden. In Abhängigkeit des eingesetzten Verfahrens und des verwendeten Verstärkungsmaterials ist der maximal erreichbare Faservolumengehalt limitiert. Bei einer Vakuuminfusion ist, aufgrund der maximal wirkenden Schließkräfte bzw. Infiltrationsdruckes ($FVG_{\text{Vakuuminfusion}} < FVG_{\text{RTM}}$), der maximal erreichbare Faservolumengehalt geringer als bei einem RTM Verfahren. Die Auswahl der eingesetzten Matrices muss ebenso bei der Verfahrensauswahl berücksichtigt werden, da beispielsweise ein schnell reaktives System zugleich eine schnelle Imprägnierung erfordert. Die Auswahl der Verfahren richtet sich somit sowohl nach der herzustellenden Stückzahl, nach der Geometrie des Bautei-

les, der geforderten mechanischen Performance und der Auswahl des Matrixsystems.

2.6 Prozessbasierende Grundlagen einer Kostenrechnung

Durch eine prozessbasierende Wirtschaftlichkeitsanalyse unterschiedlicher Verfahren kann eine Auswahl des wirtschaftlich günstigsten Verfahrens, für eine getroffene Annahme, ermittelt werden. Schlimbach [112] hat innerhalb seiner Arbeit die Kostenstruktur zur Analyse aufgeschlüsselt. Hierbei wird der bestehende Gesamtprozess, zu unterschiedlichen Verfahren getrennt, zuerst in Prozessschritte, diese in Aktivitäten und wiederum diese in Einzelwerte unterteilt. Hiermit ist ein Vergleich zweier oder mehrerer Technologien, welche ein nahezu identisches Produkt herstellen, möglich.

Beim Vergleich mehrerer alternativer Technologien ist es erforderlich weitere Parameter außerhalb des reinen Produktes zu berücksichtigen, da unterschiedliche Herstellungstechnologien zumeist auch in unterschiedlichen Produkten resultieren. Hierbei sei die Herstellung einer Motorhaube aus unterschiedlichen Werkstoffen als Beispiel genannt, welche alle die Grundanforderungen an eine Motorhaube erfüllen, sich jedoch im Gewicht, dem Recycling, etc. unterscheiden. Durch die Reduktion des Gewichtes wird auf die Lebensdauer eines Produktes gerechnet der anfallende Treibhausgasausstoß, also der „CO₂-Footprint“, positiv beeinflusst, wohingegen die Recyclingkosten am Nutzungsende höher liegen können [1].

Die Erstellung von Programmen zur Berechnung der Herstellungskosten von FKV-Bauteilen begann in der Luft- und Raumfahrtindustrie aufgrund der frühzeitigen Verwendung des Leichtbaumaterials. Innerhalb der US-amerikanischen Luft- und Raumfahrt sind nach [1] mehrere prozessanalytische Kostenmodelle vorhanden:

- ACCEM - Advanced Composite Cost Estimation Model
- MCMC - Manufacturing Cost Model for Composites
- MSU - Cost Comparison Model
- COSTADE - Composites Optimization Software for Transport Aircraft Design

Aufgrund einer Vielzahl an unternehmensspezifischen Parametern und der damit verbundenen Geheimhaltung, sind die meisten der genannten Programme nicht kommerziell verfügbar. Als Resultat werden unternehmensspezifische Programme entwickelt, welche einen externen Vergleich, außerhalb des Unternehmens nur schwer

möglich machen. Am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) wurde ein Kosten-Abschätzungs-Programm entwickelt, welches frei verfügbar ist [113]. Jedoch ist die Verwendung von allgemeingültigen, freiverfügbaren Programmen in Ihrem Nutzen begrenzt. So sind sie für Standardprozess zumeist sinnvoll einsetzbar, für Neuentwicklungen, aufgrund der Prozessvielfalt, nur beschränkt einsatzfähig. Die Neuerstellung eines Kostenprogrammes zur Analyse einer neuentwickelten Herstellungsmethodik ist somit auch zukünftig notwendig.

Die Erfordernis eines solchen Kostenprogrammes liegt in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wobei der formelle Begriff der „Wirtschaftlichkeit“ eine Bezeichnung für das Verhältnis von Ertrag und Aufwand ist [114, 115].

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Ertrag}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Kosten}} \quad (2.3)$$

Für eine Technologiebewertung zwischen verschiedenen Verarbeitungsverfahren ist jedoch der Verkauf des hergestellten Produktes irrelevant, sodass hierfür in einem solchen Kostenprogramm die Kostenvergleichsrechnung zu Einsatz kommt [116].

3. Materialien

Für die Durchführung der Versuche analog dem Aufbau der Arbeit (Abbildung 1.4) werden in nachfolgendem Kapitel die eingesetzten Versuchsmaterialien aufgeführt. Hierbei sind die eingesetzten Verstärkungsfasern als auch die verwendeten Bindersysteme für die spätere Auswertung von Bedeutung. Als Referenz für die in dieser Arbeit selbst bebinderten Materialien wird ein Vergleichsmaterial eingesetzt. Ein Teil der hergestellten Preforms wird später mit einem in Kapitel 3.4 dargestellten Matrixsystem infiltriert.

3.1 Verstärkungsfasern

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Herstellung von Preforms Kohlenstofffasern der SGL Carbon SE verwendet. Um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses weiter zu erhöhen wird eine „Heavy Tow“ Faser mit 50.000 Fasern verwendet. Die Eigenschaften der verwendeten Kohlenstofffaser SIGRAFIL C30 (Standardmodul) sind in Tabelle 3.1 abgebildet.

Tabelle 3.1: Eigenschaften Kohlenstofffasern SGL - SIGRAFIL C30 [117]

Fasertyp	Filamentanzahl	Garnfeinheit	Dichte	Durchmesser	Schlichte	Schlichte Grad	Zugfestigkeit	E-Modul	Bruchdehnung
		tex	g/cm ³	µm		%	GPa	GPa	%
SIGRAFIL C30 Basic modulus	50k	3300	1,80	7	EP	1,0	4,0	240	1,7

Zur Charakterisierung bzw. Überprüfung des Fasergewichtes wurde die gesamte Materiallieferung mit einem Umfang von zehn Spulen gravimetrisch vermessen. In Abbildung 3.1 sind die Ergebnisse der Analyse für unterschiedliche Spulen angegeben. Als Resultat der Messungen wurden Spule 4 mit einer Abweichung von 1,22 % und Spule 7 mit einer Abweichung von 0,71 % nicht für die weiteren Versuche eingesetzt. Grund hierfür sind die zu hohen Abweichungen der Garnfeinheit vom Sollwert und die daraus resultierenden Ungenauigkeiten der nachgeschalteten Bebinderungs-schritte. Die Standardabweichung der restlichen verwendeten Spulen liegt im Mittel bei $\approx 0,62$ %. Im Vergleich zu der aufzubringenden Bindermengen von ca. 2 – 7 % ist die Standardabweichung der Fasern hoch, jedoch technisch nicht optimierbar.

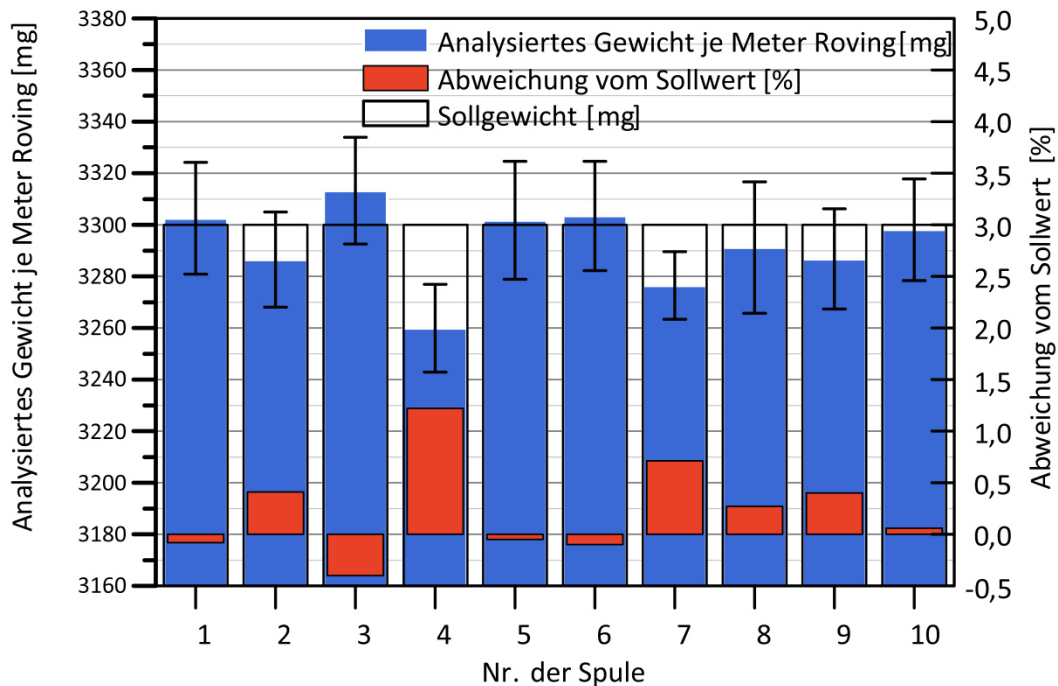


Abbildung 3.1: SGL SIGRAFIL C30 Gewichtsanalyse

3.2 Bindersysteme

Zur Herstellung von Binderrovings können sowohl thermoplastische als auch duroplastische Bindersysteme zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 2.1.2). Im Rahmen der Anlagenentwicklung wurden unterschiedliche duroplastische Bindermaterialien der Hersteller Huntsman² und Momentive³ verwendet, welche im Nachfolgenden näher beschrieben werden.

Beide duroplastische Bindersysteme sind Bisphenol-A basiert und liegen in Pulverform vor. Das Bindersystem XB 3366 von Huntsman hat eine Erweichungstemperatur von ca. 150 °C, wohingegen das EPIKOTE™ Resin 05311 von Momentive nur eine Erweichungstemperatur von 102 °C (± 5 °C) hat [118-120].

Die Partikelgrößenverteilung der beiden Binder sind zusammen mit REM-Aufnahmen in Abbildung 3.2 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die unterschiedliche Größenverteilung der Binderpartikel. Während beim XB 3366 von Huntsman die meisten Binderpartikel eine Größe zwischen 125 – 250 μm (50,17 %) aufweisen, liegt der Hauptanteil des 05311 von Momentive zwischen 63 – 125 μm (41,48 %).

² Huntsman Advanced Materials, Schweiz

³ Momentive Specialty Chemicals. Deutschland

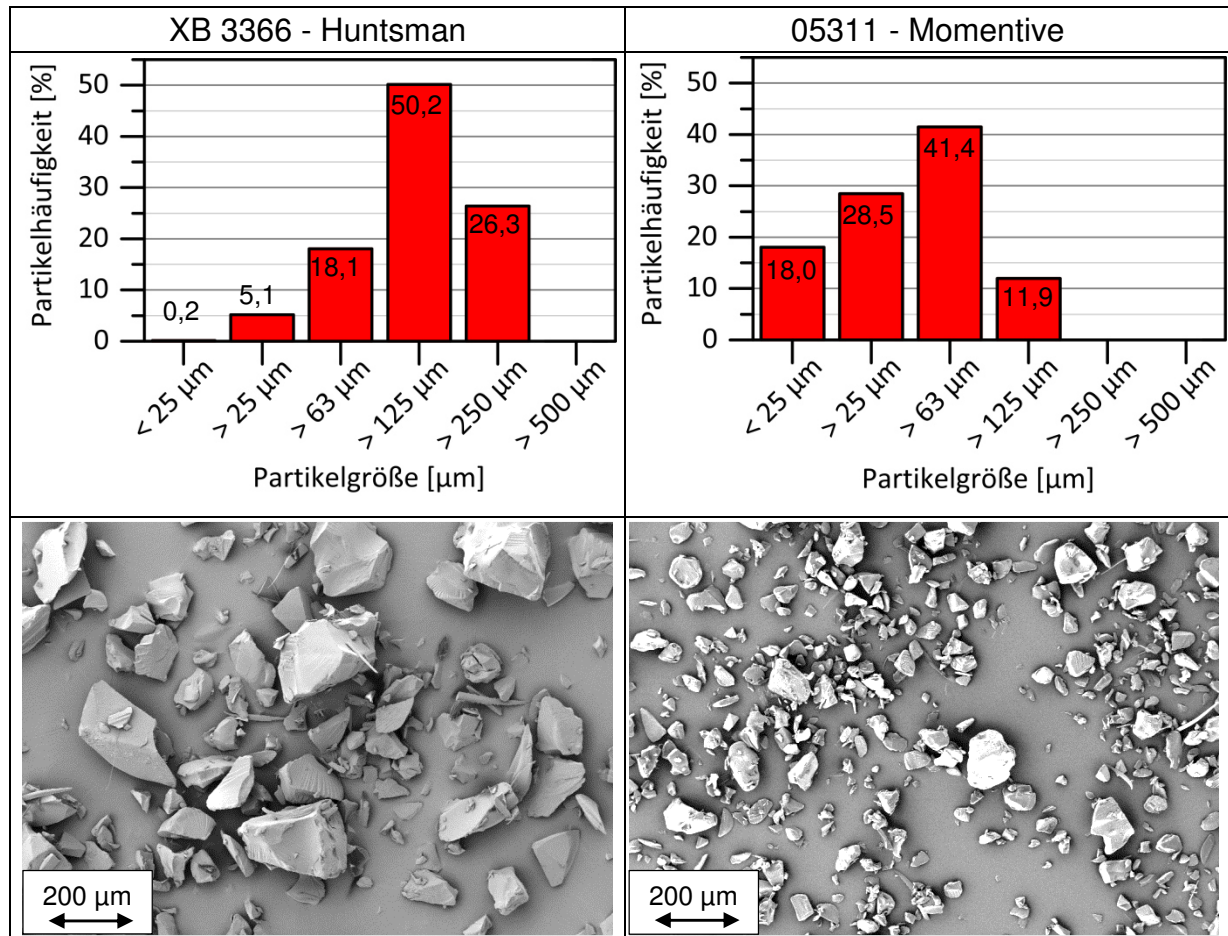


Abbildung 3.2: Partikelverteilung Huntsman XB 3366 & Momentive Epikote 05311

Ein XB 3366 Binderpartikel von Huntsman ist in starker Vergrößerung in Abbildung 3.3 aufgezeigt. Hierbei ist ein sprödes Bruchverhalten ersichtlich. Analog verhält sich auch das Bindermaterial 05311 von Momentive. Die Kenntnis über das Materialverhalten bzw. die Oberfläche ist für die spätere Analyse der Aufschmelzung bzw. Erwärmung während der Binderapplizierung von Bedeutung.

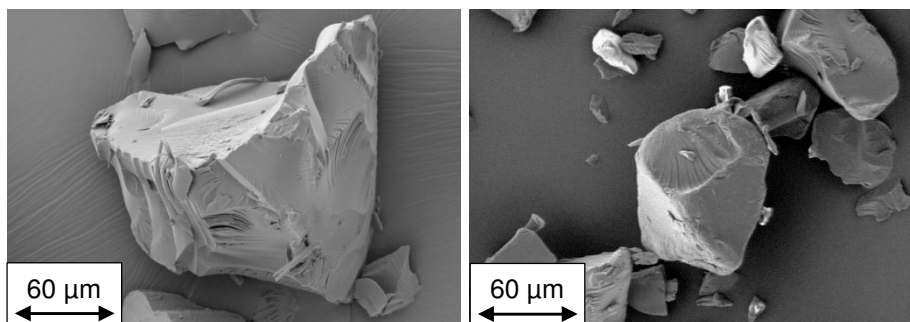


Abbildung 3.3: Detailansicht der XB 3366 und 05311 Binderpartikel

3.3 Vergleichsmaterial – Binderroving

Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Binderrovings werden mit kommerziell erhältlichen Binderrovings verglichen. Innerhalb einer Marktrecherche zu Binderhalbzeugen wurden mehrere Produkte identifiziert, wobei jedoch nur wenige Produkte kommerziell erhältlich sind bzw. waren. Die Auswahl fiel auf ein von der Firma Hightex⁴ hergestelltes Material. Der Binderroving basiert auf einer Kohlenstofffaser der Firma Toho Tenax (HTS 12) mit einem Momentive EPIKOTE 05311 Bindersystem (vgl. Kapitel 3.2). Der Binderanteil liegt laut Datenblatt bei 1,5 – 3 Gew.-%. Aufnahmen mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (Abbildung 3.4) zeigen einige Binderpartikel auf den Kohlenstofffasern. Die Bindergehalte der nicht kommerziell erhältlichen Binderrovings rangieren zwischen 6 - 8 Gew.-%, wobei sowohl thermoplastische als auch duroplastische Matrices eingesetzt werden. In Abhängigkeit des verwendeten Infiltrationssystemes reagiert der duroplastische Binder mit dem Matrixsystem, im Falle eines thermoplastischen Binders bleibt dieser als eigenständige Phase im Gesamtverbund erhalten und kann dort u. a. als Zähmodifikation eingesetzt werden [121].

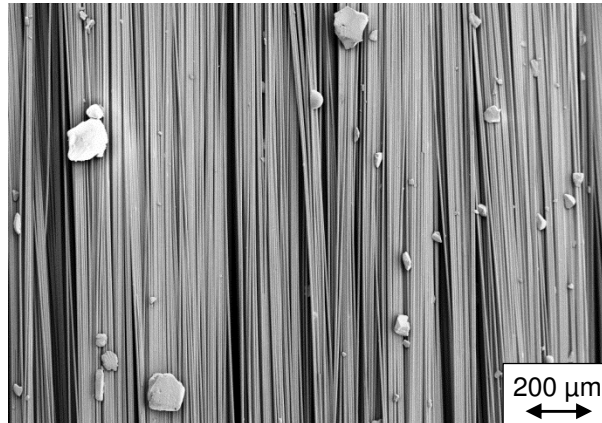


Abbildung 3.4: REM Referenzaufnahme Binderroving: Hightex - HTS 12, Momentive Epikote 05311

3.4 Matrixsystem zur Infiltration

Zur Charakterisierung der Bauteileigenschaften (Kapitel 5.2.3) der hergestellten Preforms (Kapitel 5.1) werden diese mit einem flüssigen Matrixsystem, durch das in Kapitel 2.5 dargestellte Verfahren der Vakuuminfusion, infiltriert. Das verwendete Matrixsystem von Momentive mit der Bezeichnung: EPIKOTE™ Resin MGS® RIMR 935

⁴ Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, Deutschland

& EPIKURE™ Curing Agent MGS® RIMH 93 dient zur Herstellung aller mechanischen Proben. Das Matrixsystem ist gekennzeichnet durch gute mechanische Eigenschaften und einer niedrigen Verarbeitungsviskosität (ca. 280 mPa s bei 25 °C [122]). Das verwendete Matrixsystem (Harz und Härter) ist nach Angaben des Herstellers, für die Verarbeitung in einem Vakuuminfusionsverfahren oder mittels Nassimprägnierung einsetzbar, wobei die Verarbeitungszeit ca. zwei Stunden beträgt.

❖ **Fazit der Versuchsmaterialien**

Die durchschnittliche gravimetrische Abweichung der eingesetzten Kohlenstofffasern konnte durch den Entfall von Spule Nr. 4 und Nr. 7 deutlich reduziert werden, sodass eine möglichst homogene Garnfeinheit der Verstärkungsfasern vorliegt. Die beiden verwendeten Bindersysteme zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Partikelverteilung auf, welche bei späteren Tests eventuell von Bedeutung sein kann. Ebenso wurde ein Binderreferenzmaterial ausgewählt, welches mit dem selbst hergestellten Material verglichen werden kann.

4. Entwicklung einer Methode zur Applizierung von Bindermaterial auf Rovings

In diesem Kapitel wird eine neue Applizierungsmethodik für Polymerpartikel zur Herstellung von Bindertapes aus UD-Rovings aufgezeigt. Ziel dieser Applizierungsmethodik ist es, ein duroplastisches oder thermoplastisches pulverförmiges Bindermaterial auf einen Roving zu applizieren. Die zu entwickelnde Methodik soll im weiteren Verlauf der Untersuchungen auch für die Online-Bebinderung (Kapitel 6) einsetzbar sein. Zur Prozessanalyse wird die entwickelte Methodik zuerst „offline“, d. h. außerhalb des Ablegeprozesses getestet und optimiert. Die Offline-Bebinderung dient der Funktionsprüfung der Systeme sowie der Analyse der daraus resultierenden Binderrovings. Hierfür wurde ein Prüfstand mit unterschiedlichen Funktionsmodulen entwickelt, welche im Einzelnen nachfolgend aufgezeigt und die Funktionsmethodik als auch die einstellbaren Parameter detailliert erläutert werden.

Abbildung 4.1 zeigt die drei Hauptstationen, die „Roving Vorbereitung“, den „Binder-Roving-Prüfstand“ als auch die „Automatisierte Binder-Roving Ablage“ der Offline-Binder-Preformherstellung. Die einzelnen Prozessschritte werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

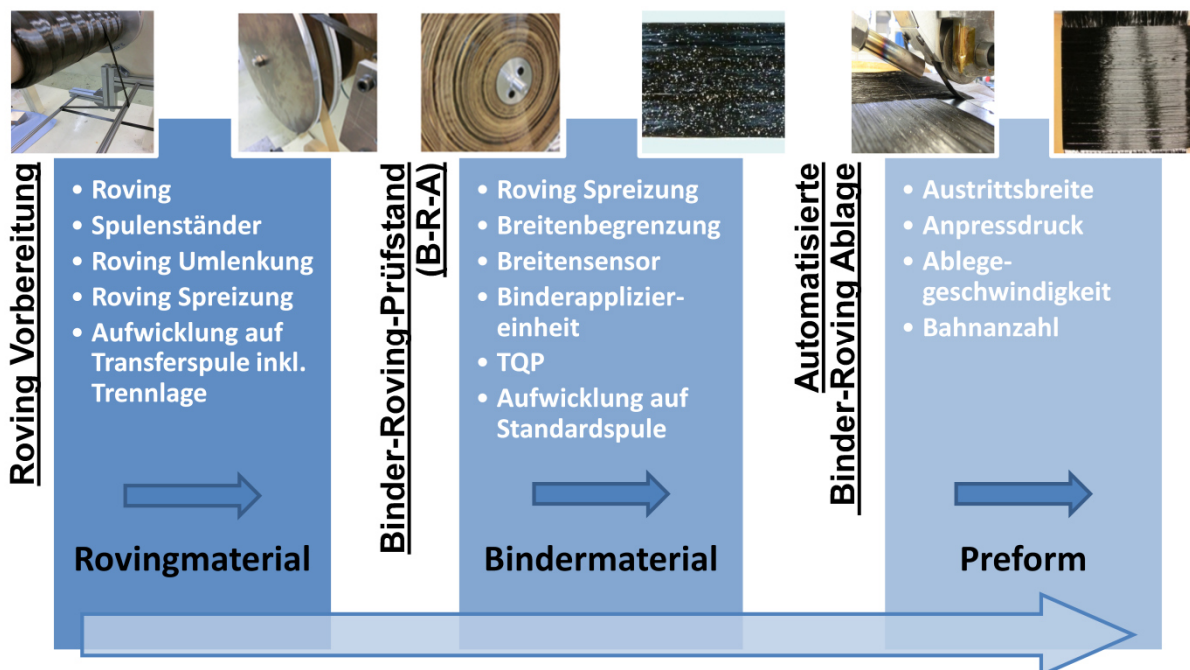


Abbildung 4.1: Prozessschritte der Preformherstellung

Innerhalb des ersten von drei Arbeitsabschnitten für die Herstellung von Binder-Preforms wird der Roving für die weiteren Verarbeitungsschritte vorbereitet. Die verwendeten Kohlenstofffasern werden auf einer Standard-Pappspule geliefert. Das mittels Kreuzwicklung aufgespulte Material darf sowohl für die Offline-Bebinderung als auch für die Online-Bebinderung beim Materialabspulen keinen Winkelversatz aufweisen. Ein Winkelversatz im Ausgangsmaterial erfordert für die gleichmäßige Faserspreizung ohne „Twists“ mechanische Umlenkungen, elektronische Ausgleichseinheiten oder lange Distanzen. Für einen kompakten und zugleich stabilen Ablegeprozess eines gespreizten Rovings steht dies im Widerspruch, sodass die Fasern in einem ersten Schritt umgespult werden.

4.1 Prozessbeschreibung „Roving Vorbereitung“

Der erste Prozessschritt „Roving Vorbereitung“ umfasst das Umspulen und Spreizen des Ausgangsmaterials. Das Spreizen des verwendeten Rovings ist für eine gleichbleibende Halbzeugqualität unerlässlich. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine homogene Rovingbreite dem weiteren Prozess zugeführt wird. Als Umspulstation wurde eine Wickelanlage⁵ um ein Führungsgatter, eine Spreizeinheit inkl. Zwischenlagenablegeeinheit, erweitert. Der danach gespreizte Roving wird auf eine eigens entwickelte Transferspule aufgespult. In Abbildung 4.2 sind die Stationen der Roving Vorbereitung aufgeführt.

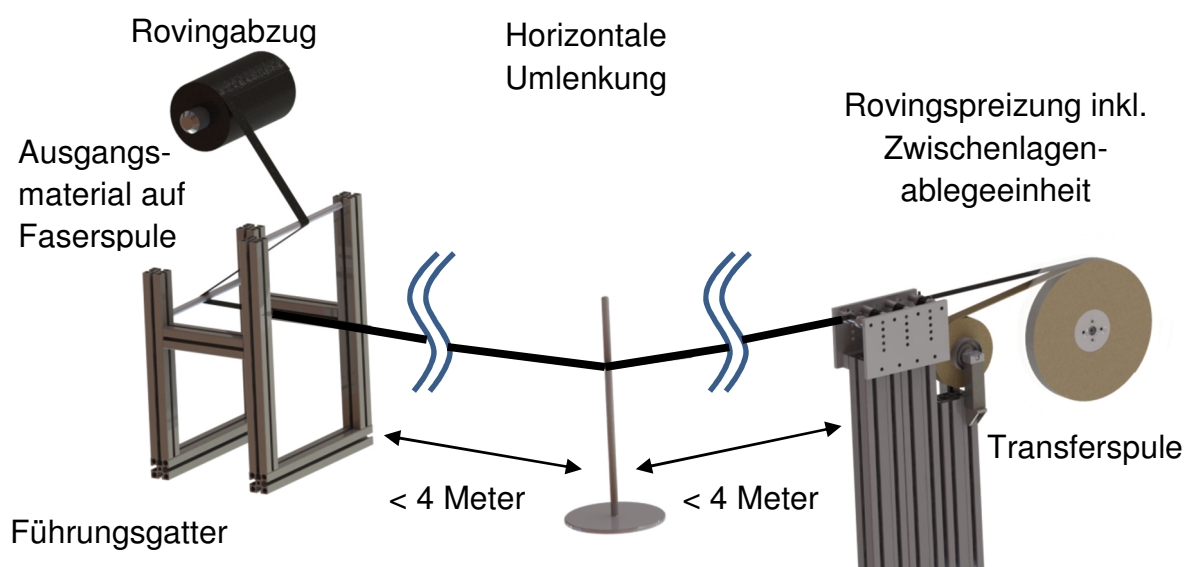


Abbildung 4.2: Anlagentechnik zur Roving Vorbereitung

⁵ Bolenz und Schäfer GmbH

Von einer Faserspule, welcher auf einem Spulenständer des Typs (SFT⁶) montiert ist, wird der Roving mit einer definierten Zugkraft von weniger als $< 3 \text{ N}$ abgezogen, bevor er am ersten Führungsgatter umgelenkt wird.

4.1.1 Führungsgatter

Das für die Spreizung entwickelte Führungsgatter bzw. die Umlenkstäbe, wird in Abbildung 4.3 gezeigt und ist der Materialspule nachgeschaltet. Die Distanz zwischen Spule und der ersten Umlenkstange als auch der Winkel zwischen beiden Umlenkstangen ist für ein twistfreies Umspulen und Spreizen des Materials verantwortlich. Aufgrund der Eigenspannungen des Rovings an den Wendezonen der Spule ist die Distanz zur ersten Umlenkung gering. Dies verhindert ein erstes Verdrehen des Rovings vor der Umlenkung. Beide Umlenkungen egalisieren zum Großteil die Eigenspannungen im Roving und gewährleisten einen twistfreien Weitertransport. Durch eine nachgeschaltete horizontale Umlenkung wird der Abspulwinkel des Rovings (Spulenbreite 255 mm) für den weiteren Spreizungsschritt reduziert. Hierbei wird auf einer größeren Distanz ($> 4 \text{ m}$) der Roving um 90° gedreht, umgelenkt und der Spreizstation (Distanz $> 4 \text{ m}$) wieder horizontal zugeführt.

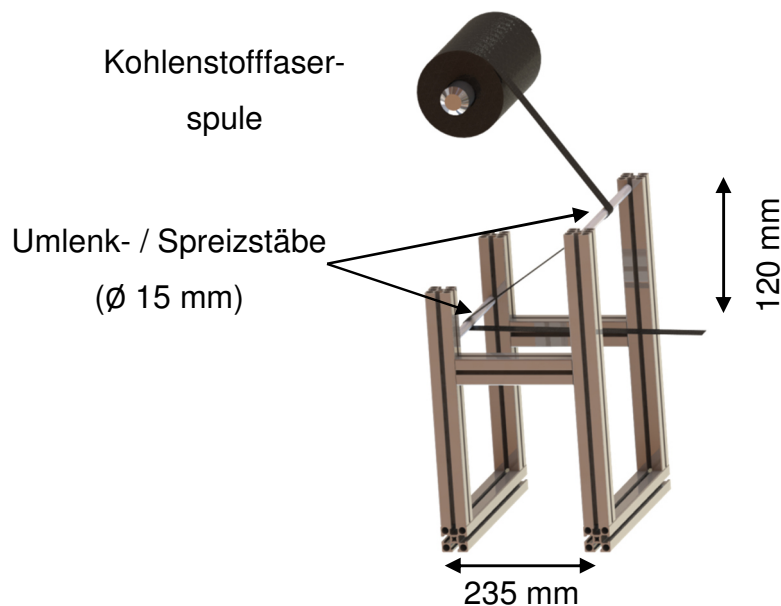


Abbildung 4.3: Rovingabzug und Rovingumlenkstäbe (Führungsgatter)

⁶ EHA Composite Machinery GmbH, Steffenberg

4.1.2 Entwicklung einer Rovingspreizung inkl. Zwischenlagenablegeeinheit

Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Spreizung eines Rovings wurden bereits in Kapitel 2.2 erörtert. Als Grundlage der nachfolgend ausgearbeiteten Spreizstation dienen Voruntersuchungen an einer industriellen Spreizanlage mit schwingend angeregten Spreizstäben. Bei den Untersuchungen wurde die Spreizbarkeit von Kohlenstofffasern miteinander verglichen ohne jedoch eine maximale Spreizung zu untersuchen. Die in Abbildung 4.4 dargestellten Kurven zeigen sowohl die Eingangsbreite in rot des Rovings als auch die gespreizte Ausgangsbreite in schwarz. Als Versuchsmaterial wurde ebenso eine 50k Kohlenstofffaser von SGL Carbon SE eingesetzt. Eine zu 82 % befüllte Materialspule wurde zur Breitenanalyse komplett umgespult. Der ermittelte Trend der Rovingbreite liegt sowohl bei der Eingangsbreite als auch der Ausgangsbreite ähnlich und spiegelt eine Verbreiterung des Rovings mit zunehmender Messlänge wider. Eine zunehmende Messlänge bedeutet gleichzeitig einen abnehmenden Spulendurchmesser, welcher gleichzeitig eine Reduktion des aufgewickelten Radius der Fasern auf dem Kern darstellt, welches als eine Ursache für diese Verbreiterung herangezogen werden kann. Zusätzlich hierzu kann die Bandspannung beim Befüllen der Spule, welche bei einem geringen Spulendurchmesser höher ist, für diesen Trend ursächlich sein.

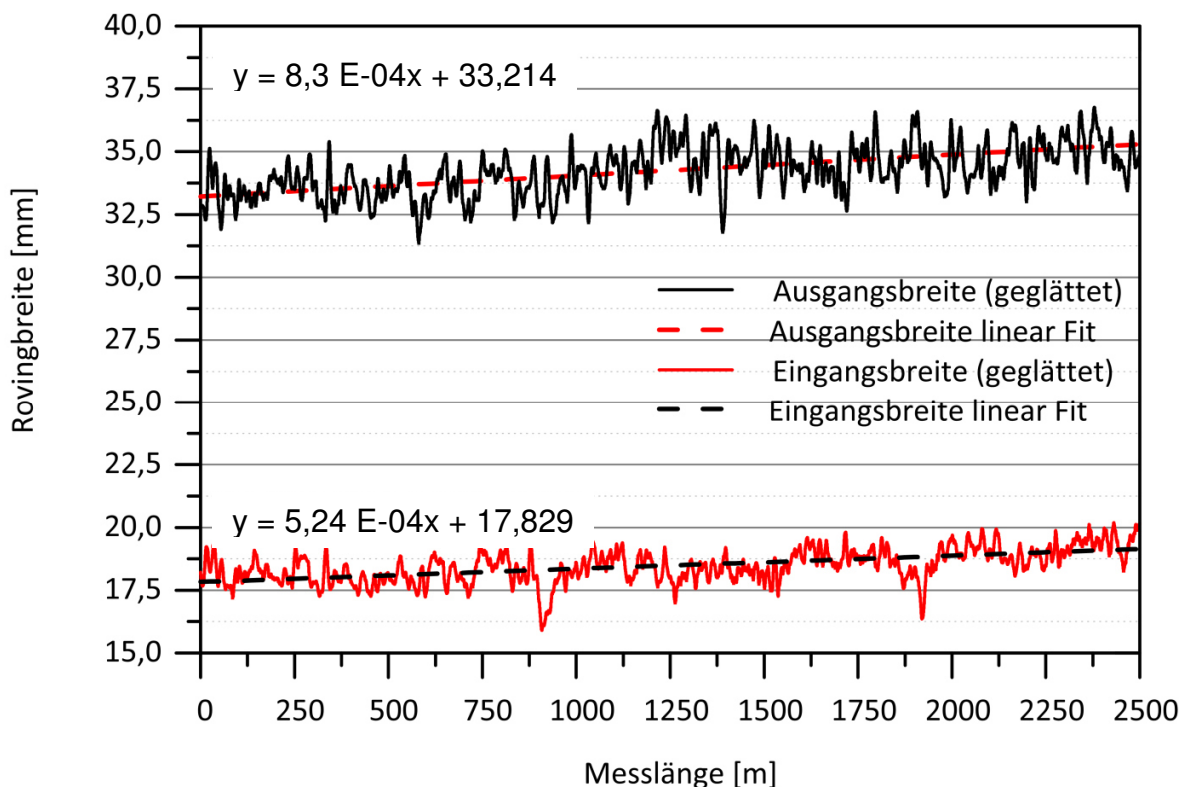


Abbildung 4.4: Voruntersuchung zur Spreizbarkeit eines SGL - 50k Rovings

Auf Grundlage der Vorversuche wurde eine Spreizeinheit entwickelt, welche eine Faserspreizung in einem definierten und erreichbaren Korridor ermöglicht. Hierfür wurde die maximale Spreizung des verwendeten Materials auf 30 mm festgelegt, welches einem Flächengewicht von 110 g/m² entspricht.

Innerhalb des ersten Prozessschrittes „Roving Vorbereitung“ dienen Spreizstäbe, also die Umlenkung des Rovings in der Horizontalen, als Spreizungssystem (vgl. hierzu Abbildung 4.2). Hierfür wurde eine Spreizeinheit (siehe Abbildung 4.5) konstruiert und aufgebaut. Der verwendete Spreizmechanismus „Faserspreizung durch Umlenkung“ (vgl. Kapitel 2.2) wurde aufgrund der Prozessstabilität sowie der ausreichenden Spreizleistung ausgewählt. Die Anzahl der Spreizstäbe ist von 1 – 7 Stück variabel, wobei pro Spreizstab der Umschlingungswinkel von 0° bis 305,4° variabel einstellbar ist. Durch einstellbare Begrenzungshilfen am ersten und letzten Stab der Einheit ist eine definierte Breitenreduktion möglich, sodass eine konstante Rovingbreite erreicht und auf eine Transferspule aufgewickelt werden kann. Zur Sicherstellung der Abwicklung des Rovingmaterials von der Spule im nachfolgenden Prozessschritt wird beim Aufwickeln der Kohlenstofffasern ein Trennpapier eingebracht, welches eine Verhakung durch Ineinandergleiten der Fasern verhindert. Die Papierspule ist hierbei direkt an der Spreizstation montiert. Als Trennpapier wird ein Abdeckpapier⁷ eingesetzt, welches auf die definierte Transferspulenbreite mittels einer Bandsäge zugeschnitten wurde. Die Breitentoleranz beträgt hierbei + 1 mm auf die Transferspulenbreite. Es konnte durch eine Nachbearbeitung eine glatte und saubere Oberfläche als auch eine verlässliche Breitentoleranz von - 0,1 mm bis - 0,2 mm zur Transferspulenbreite erzielt werden.

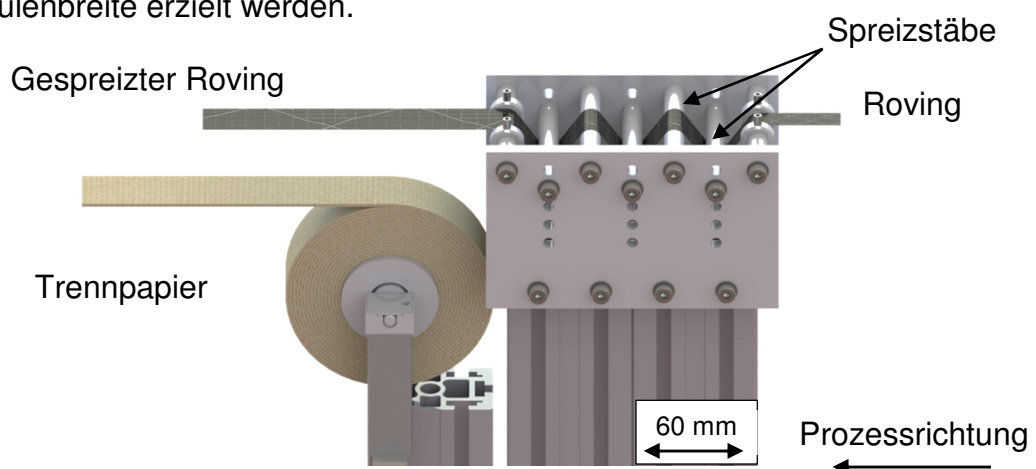


Abbildung 4.5: Spreizeinheit "Roving Vorbereitung" inkl. Papierrolle

⁷ Colad Abdeckpapier, Gewicht 50 g/m², Lauflänge 300 m, Breite 21 cm

4.1.3 Transferspule

Nach der Spreizeinheit wird der Roving auf einer eigens konstruierten Spule (Abbildung 4.6) inklusive des Trennpapieres aufgewickelt. Die Seitenwände der Spule bestehen aus 10 mm starken PMMA-Scheiben mit einem Durchmesser von \varnothing 450 mm, welche auf einem Aluminiumkern mit einem Durchmesser von \varnothing 80 mm mit einem Abstand von 30 mm fixiert sind. Die maximal speicherbare Materiallänge, welches sowohl für die Verstärkungsfasern als auch das Trennpapier gilt, beträgt 900 m. Während des Aufwickelvorganges wird zusätzlich zu den Plexiglasseitenwänden auf jeder Seite eine Aluminiumplatte mit einer Wandstärke von 10 mm montiert, welche ein Aufweiten der PMMA-Seitenwände verhindert. Ein unerwünschtes Aufweiten der Seitenwände könnte zu einer Inhomogenität der Materialbreite bzw. Materialqualität, durch ein seitliches Abgleiten des Fasermaterials zwischen der Seitenwand und dem bereits aufgewickelten Material, führen.

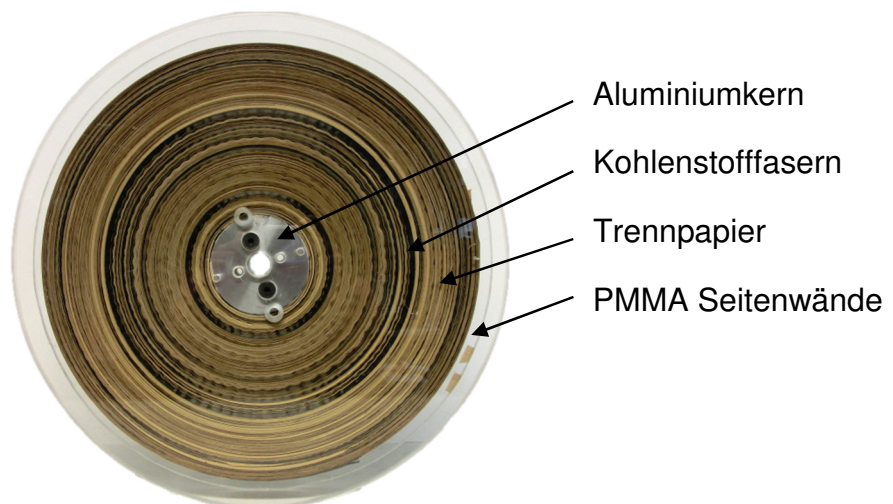


Abbildung 4.6: Transferspule inkl. Trennpapier

4.2 Prozessbeschreibung „Binder-Roving-Prüfstand“

Für die Herstellung und Evaluierung der einzelnen Komponenten der Online-Bebinderung wurde ein Prüfstand (Binder-Roving-Prüfstand) aufgebaut, der es erlaubt, die Komponenten für die Online-Bebinderung offline zu evaluieren. Der B-R-P ist in Abbildung 4.7 schematisch dargestellt, die einzelnen Module werden im Nachfolgenden detailliert erläutert.

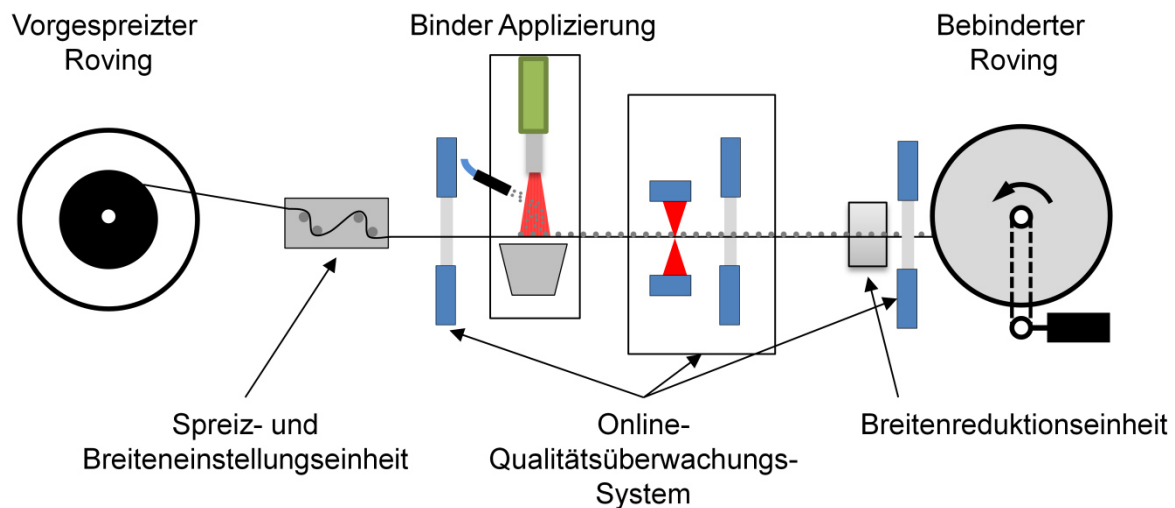


Abbildung 4.7: Aufbau des Binder-Roving-Prüfstandes

Das gespreizte Rovingmaterial auf der Transferspule mit einer Breite von < 30 mm wird nochmals durch eine Spreiz- und Breitereinstellungseinheit geführt. Anschließend wird die Rovingbreite durch eine optische Breitenerfassung gemessen, bevor der Binder auf dem Roving mittels des Binder-Applizier-Moduls (B-A-M) aufgetragen wird. Nachfolgend kann die Breite nochmals optisch detektiert werden, bevor der nun bebinderte Roving auf eine vordefinierte konstante oder variable Breite reduziert und aufgespult wird. Im Nachfolgenden werden die Spreiz- und Breitereinstellungseinheit, das Binder-Applizier-Modul als auch die Qualitätsüberwachungssysteme näher beschrieben.

4.2.1 Spreiz- und Breitereinstellungseinheit

Die Spreiz- und Breitereinstellungseinheit dient der Roving Führung, der Breitenhomogenisierung als auch der Breitereinstellung.

Die Anforderungen an die in diesem Kapitel beschriebene Spreiz- und Breitereinstellungseinheit (variable Breiten-Einstellungs-Einheit, kurz: vBEE) sind:

- Variable in-situ / Online-Breitereinstellung
- Spreizung bzw. Homogenisierung des Rovings
- Einfache Adaption an den Ablege-Endeffektor bzw. den TLK

Zur Verdeutlichung der Möglichkeiten einer variablen Breiten-Einstellungs-Einheit ist in Abbildung 4.8 eine sphärische Ablegekontur mit einem Halbzeug mit definierter Breite dargestellt. Geometriebedingt ergibt sich durch die Krümmung der Kontur zur Werkzeugmitte eine vergrößerte Oberfläche. Mit einer vorgegeben Halbzeugbreite ist

es nicht möglich, diese Kontur ohne Überlappungen oder Fehlstellen („laps“ oder „gaps“) zu fertigen. Durch eine direkte Bebinderung des Rovings mit Binderpartikeln im Prozess kann die Breite des Rovings vor dem Ablegen und damit an die Geometrieanforderung des Werkzeuges angepasst werden. Hiermit ist eine vollständige Bedeckung der Oberfläche möglich, wenngleich durch das gleiche Volumen des Binderrovings die abgelegte Höhe variiert. Eine Variation der Rovinghöhe ist jedoch für eine spätere Infiltration [67] bzw. das finale Bauteil weniger ausschlaggebend als Fehlstellen.

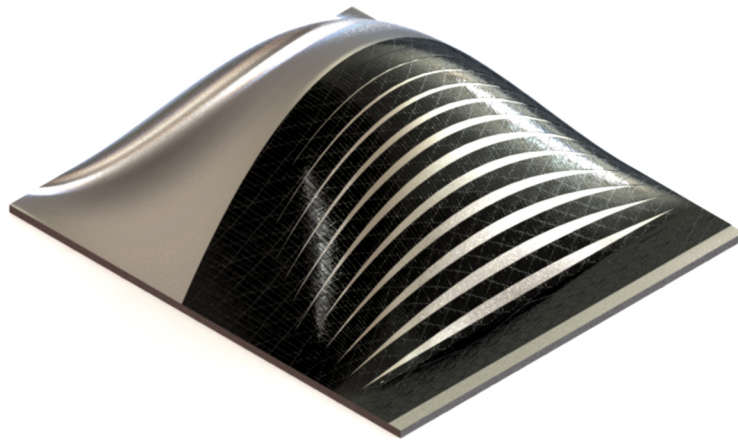


Abbildung 4.8: Bild einer sphärisch abgelegten Kontur mit Binderroving-Halbzügen mit konstanter Breite

Auf den Grundlagen des Stands der Technik als auch auf der in Kapitel 4 beschriebenen „Spreizstation inkl. Zwischenlagenablegeeinheit“ wurden diverse Voruntersuchungen durchgeführt. Basierend auf den Anforderungen und den Restriktionen bzgl. der Abmessungen wurde eine Kombination aus unterschiedlichen Spreiztechnologien angewendet, um eine bestmögliche Rovingspreizung und Rovinghomogenisierung auf kleinstmöglichem Raum zu realisieren. Sowohl die „Spreizung durch Umlenkung“ als auch eine „Spreizung nach dem Fukui-Prinzip“ wurden innerhalb der vBEE integriert. Die maximalen Abmessungen der Konstruktion sind durch den an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, kurz IVW-GmbH, vorhanden Tapelegekopf EVO 1 limitiert und betragen 165 mm in der Länge und 70 mm in der Breite.

Abbildung 4.9 zeigt das CAD Modell der variablen Breiten-Einstellungs-Einheit im Schnitt. Der Roving wird nach einer kurzen Einlaufschräge innerhalb des ersten Rotationsmoduls (Abbildung 4.10) geführt und bei Bedarf umgelenkt. Der Umlenkungswinkel α beschreibt hierbei die Verdrehung des Rotationsmoduls. Geometriebedingt

kann der Umlenkungswinkel des Rovings variabel von 0° bis zu 283° für jedes Rotationsmodul eingestellt werden (Abbildung 4.10). Nach Verlassen des ersten Rotationsmoduls wird der Roving über das Fukui-Modul geführt. Durch Applizierung eines Vakuums unterhalb der Vakuumkammer wird ein Luftstrom durch eine Lochscheibe homogenisiert appliziert, welcher den Roving umlenkt und spreizt. Zusätzlich werden Verunreinigungen, wie zum Beispiel Faserflusen, abgezogen. Im Gegensatz zu dem von Kawabe beschriebenen Patent [70] erfolgt hierbei die Spreizung nicht spannungslos, was in einer geringeren Spreizkraft resultiert. Nach dem Verlassen des Fukui-Moduls wird der Roving nochmals durch ein identisches Rotationsmodul geführt, bevor der Roving die variable Breiten-Einstellungs-Einheit verlässt. Beide Rotationsmodule werden getrennt voneinander durch Schrittmotoren⁸ [123] angetrieben. Das maximal erzielbare Drehmoment wird durch eine Untersetzung mittels Riemenantriebs (Zahnrad $n_1 = 36$ und Zahnrad $n_2 = 84$) im Übersetzungsverhältnis von $\approx 2,3$ auf $1,14$ Nm gesteigert.

Die Rovingbreite ist durch variable seitliche Führungsbleche einstellbar, welche sich an beiden Seiten über das gesamte Modul erstrecken. Der Antrieb erfolgt ebenso wie bei den Rotationsmodulen mittels eines Schrittmotors⁹ [124].

Die Rotationsbewegung des Schrittmotors wird durch zwei gegenläufige Trapezgewindespindelantriebe in eine lineare Breiteneinstellung umgesetzt. Durch den Einsatz von Gleitlagern (IGUS) an allen rotatorisch oder linear bewegten Komponenten ist ein störungsfreier Betrieb ohne Reinigungsaufwand der Lager zu gewährleisten.

Der Antrieb aller Schrittmotoren wird durch eine Computerized Numerical Control (CNC) Steuerung übernommen. Das Steuerungsinterface wird mit einer CNC Maschinensoftware¹⁰ angesteuert. Die Signale werden von dem Steuerungsinterface über einen dem Schrittmotor angepassten Mikroschritt-Treiber¹¹ an den Schrittmotor weitergeleitet. Jeder Schrittmotor (2 x Rotationsmodul und Breiten-Einstellung) kann unabhängig und mittels CNC angesteuert werden.

⁸ TRINAMIC QSH4218-51-049

⁹ TRINAMIC QSH2818-51-07

¹⁰ Newfangled Solutions LLC, Mach 3

¹¹ Leadshine Schrittmotortreiber M542

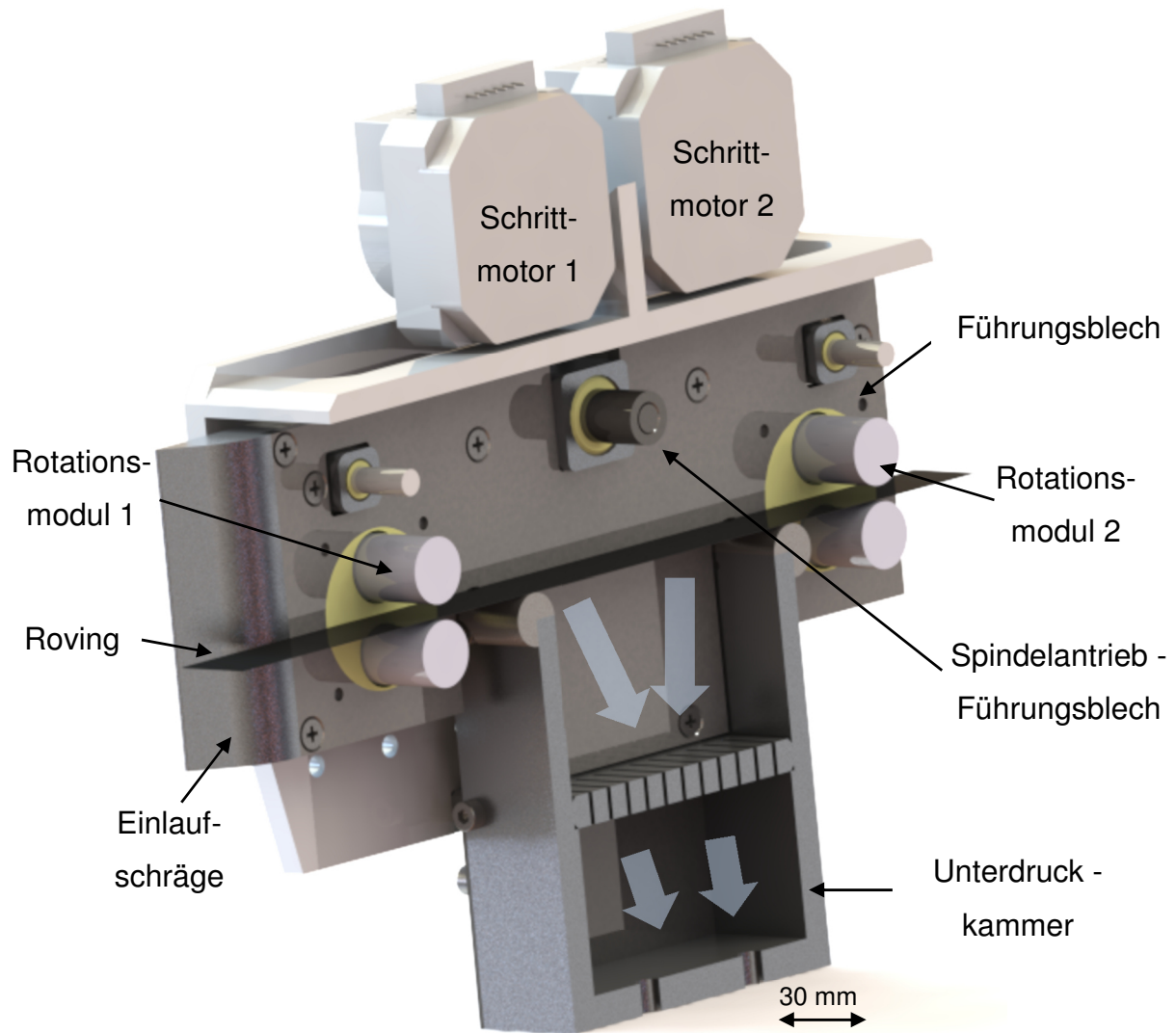


Abbildung 4.9: Rovingverlauf innerhalb der variablen Breiten-Einstellungs-Einheit (vBEE) in der Schnittdarstellung

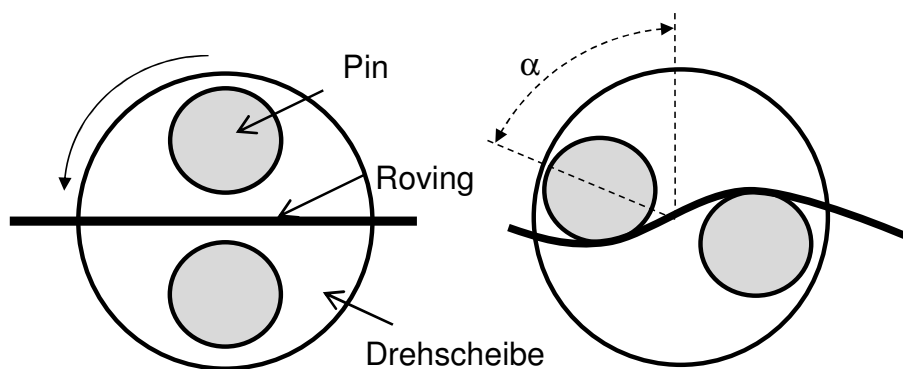


Abbildung 4.10: Wirkungsprinzip der Rotationsmodule

In Abbildung 4.11 ist exemplarisch der Breitenverlauf eines Rovings nach der variablen Breiten-Einstellungs-Einheit dargestellt. Es wurden zwei Verfahrensgeschwindigkeiten der Breiten-Einstellungs-Einheit (100 mm/min & 500 mm/min) getestet. Von einer Ausgangsbreite von 17 mm wird der Roving auf die Sollbreite von 12 mm reduziert. Hierbei ist ersichtlich, dass die Verschmälerung des Rovings bei beiden Geschwindigkeiten erfolgreich ist, jedoch beim anschließenden Verbreitern die höhere Verfahrensgeschwindigkeit zu einem ungleichmäßigen Breitenverlauf führen kann. Grund hierfür ist die zur Verbreiterung des Rovings benötigte Wegstrecke zu dessen Spreizung. In Abhängigkeit der abzulegenden Geometrie ist eine notwendige Breitenreduktion des Rovings meist nur marginal notwendig, sodass diese Restriktionen eine Anlagenrestriktion aber keine spätere Bauteilrestriktion darstellt.

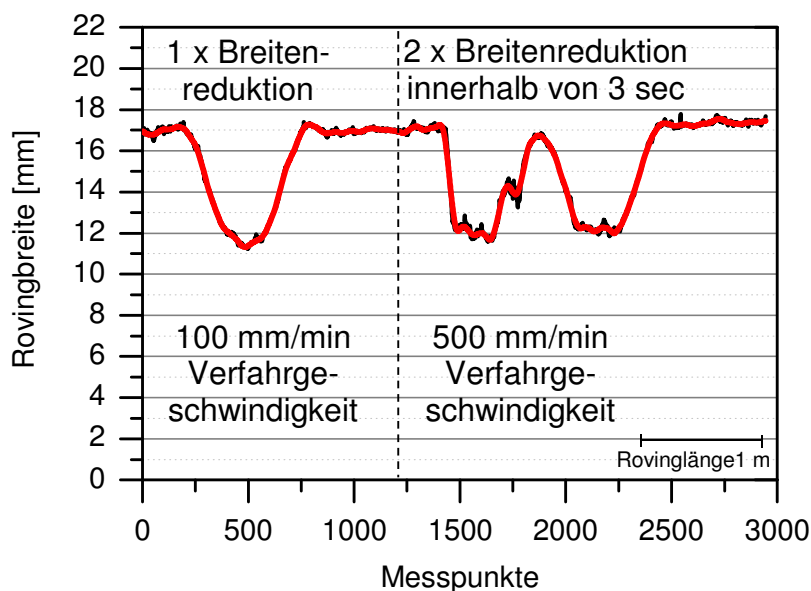


Abbildung 4.11: Breitenmessung bei Variation der Geschwindigkeit der variablen Breiten-Einstellungs-Einheit

4.2.2 Binder-Applizier-Modul

Das Binder-Applizier-Modul (B-A-M) besteht aus zwei Komponenten, dem Binder-Förder-Modul (B-F-M) und dem Applikationsmodul. Das Binder-Förder-Modul ist das Kernmodul des entwickelten Prozesses, welches definiert Binderpartikel in einen Luftstrom einbringen soll. Das Applikationsmodul hingegen wird nur für die Offline-Bebinderung des Rovings benötigt und dient dort dem Auftrag des Binders auf den Roving zur Abschirmung der Bebinderung und dem Auffangen überschüssiger Binderpartikel.

4.2.2.1 Binder-Förder-Modul (B-F-M)

Zur definierten Förderung und Applizierung von Binderpartikeln in einen Luftstrom wurde das Binder-Förder-Modul entwickelt. Die Anforderungen an das Modul sind nachfolgend aufgelistet:

- Förderung von thermoplastischen als auch duroplastischen pulverförmigen Binderpartikeln
- Vorratsbehälter zur leichten Befüllung des Bindermaterials
- Geschlossenes System innerhalb eines Druckluftstromes
- Variable Steuerung der Binderaustragsmenge

Während der Entwicklung des Binder-Förder-Moduls wurden drei unterschiedliche Binderfördereinheiten (siehe Abbildung 4.12) analysiert und gegeneinander bewertet. Innerhalb der ersten Variante werden die Binderpartikel mittels einer drehenden Förderschnecke, analog dem Extruderprinzip, von einem Vorratsbehälter zur Lufteinheit gefördert. Eine Variation der Bindermenge kann sowohl durch die Geometrie der Förderschnecke als auch durch die Schneckendrehzahl variiert werden. Die zweite Variante nutzt zur Förderung der Binderpartikel ein angetriebenes Zahnrad, welches die Binderpartikel aus dem Vorratsbehälter befördert. Dabei befindet sich das Zahnrad in einem geschlossenen System, sodass der Materialfluss durch die freie Fläche zwischen den Zahnrädern und dem Abstand zur Zahnradumrandung definiert ist (Zahnradpumpe). Variationsparameter, welche die Binderförderung beeinflussen, sind sowohl die geometrischen Abmessungen des eingesetzten Zahnrades, die Drehgeschwindigkeit als auch der Wandabstand des Zahnrades (Distanz zwischen Zahnradspitze und Gehäuse - h_s). Die letzte Variante nutzt einen Unterdruck zur Förderung der Binderpartikel. Hierbei strömt ein Luftstrom an einem Rohr vorbei, wodurch ein Unterdruck im Rohr erzeugt wird. Die Binderpartikel werden durch den Unterdruck aus dem Vorratsbehälter gefördert. In Abhängigkeit der Querschnitte des Systemes ist der Unterdruck und somit die Bindermenge einstellbar.

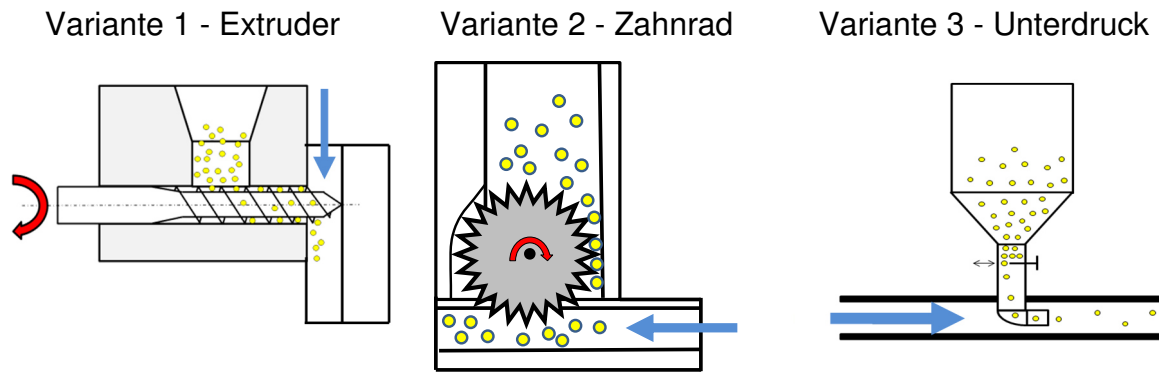


Abbildung 4.12: Varianten zur Binderförderung [125]

Eine Bewertung nach VDI 2225 ergab, dass Variante 1 als auch Variante 2 die Anforderungen an das System erfüllen. Variante 3 wurde Aufgrund der Einstellbarkeit, der Herstellbarkeit als auch des zu erwartenden Restrisikos nicht weiter verfolgt. Für beide Systeme wurden Prototypen aufgebaut und getestet. Innerhalb des Extruders wird das Polymerpulver an einer großen Oberfläche vorbeigeführt, welches in einer hohen Reibung resultiert. Aufgrund dieser Reibungsproblematik und der erweiterten Prozessvariationen der zweiten Variante, wurde nach den Voruntersuchungen nur noch Variante zwei für die definierte Binderförderung untersucht. Das Arbeitsprinzip der zweiten Variante ist vergleichbar mit dem einer Zahnradpumpe innerhalb der Fluidtechnik. Das Ausgangsvolumen für eine Zahnradpumpe mit einer Evolventenverzahnung lässt sich anhand der Formel (4.1) berechnen [126]. Sowohl die Geometrie des Zahnrades als auch dessen Umfangsgeschwindigkeit sind die Haupteinflussgrößen des linearen Volumenstromes für ein Fluid.

$$\dot{V}_{U/min} = m^2 \times (2n + 2 - \frac{1}{6} \pi^2 \times \cos^2 \alpha) \times \frac{b}{d_K} \times \pi \times d_K \times n \quad (4.1)$$

(mit m = Modul, n = Zähnezahl, α = Eingriffswinkel, b = Zahnradbreite, d_K = Kopfkreisdurchmesser)

Das für die Förderung der Binderpartikel eingesetzte Zahnrad ist ein sog. Sperrrad¹², welches keine symmetrischen Zähne aufweist. Für die Berechnung des Volumenstromes für das Sperrrad wird die Eingriffsbreite des Sperrades mit der Fläche des Zahndreieckes, Berechnung bis zum Drehpunkt (Anhang: Abbildung 10.2) und der Anzahl der Zähne multipliziert und von der Gesamtfläche des Außenkreises subtrahiert.

¹² Mädler, Sperrrad Typ: 22373000

$$\dot{V}_{U/min} = b \times \pi \times r_a^2 - n \times \left(\frac{\sqrt{4 \times Z_a^2 \times Z_b^2 - (Z_a^2 + Z_b^2 - Z_c^2)^2}}{4} \right) \quad (4.2)$$

Der Außenradius r_a beträgt hierbei die Summe aus dem Radius des Zahnrades (r_a) und dem variabel einstellbaren Abstand zwischen Zahnrad und Schieber (h_s).

$$r_a = r_z + h_s \quad (4.3)$$

Das theoretische Volumen für eine Sperrradumdrehung beträgt somit $\approx 432 \text{ mm}^3$ für eine Abstand (h_s) von 0,2 mm.

Durch Variation verschiedener Einstellgrößen (Abbildung 4.13) am Binder-Förder-Modul ist es möglich, die Ausbringungsmenge zu variieren, als auch das Modul an neue Bindertypen anzupassen.

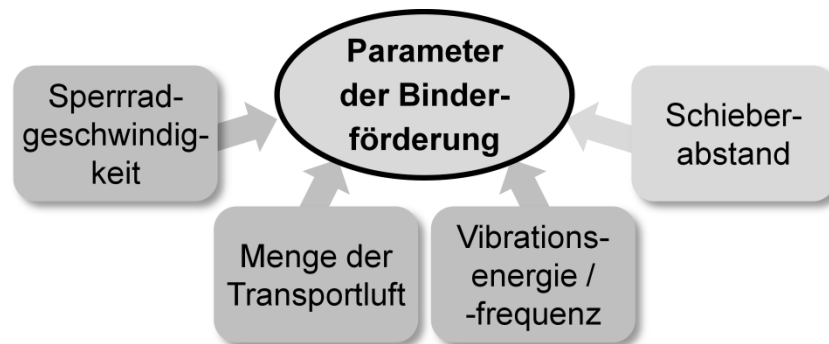


Abbildung 4.13: Einflussparameter auf die Binderförderung

Das finale Binder-Förder-Modul ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Das im Vorratsbehälter befindliche Bindermaterial wird durch eine trichterförmige Aussparung dem angetriebenen Sperrrad zugeführt. Der Antrieb des Sperrades erfolgt wie bei der Spreiz- und Breiteneinstellungseinheit (Kapitel 4.2.1) durch einen Schrittmotor¹³ [123], welcher mittels einer Zahnriemen-Untersetzung ($i \approx 3,4$) die Welle des Sperrades antreibt. Die Steuerung wird durch die Steuerungssoftware Mach 3 übernommen. Die Distanz bzw. der Spalt zwischen Sperrrad und Gehäuse ist durch einen Schieber individuell für das verwendete Bindersystem einstellbar. Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde der Abstand zwischen Sperrrad und Schieber auf 0,2 mm fixiert. Das gesamte Modul wird durch einen Luftdruckvibrator in Schwingung versetzt welches das Fördern des Bindermaterials unterstützt.

¹³ TRINAMIC QSH4218-51-049

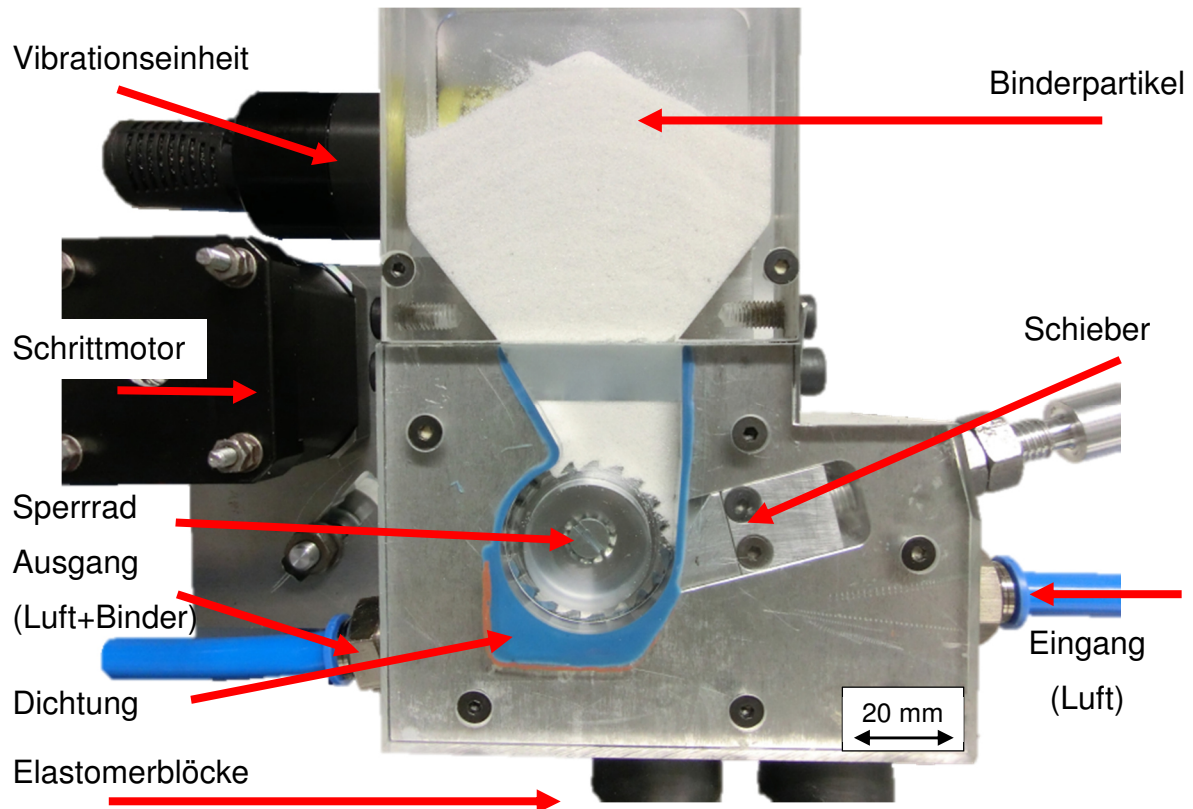


Abbildung 4.14: Binder-Förder-Modul

Die Analyse der Parametervariation wurde in verschiedenen Versuchsreihen durchgeführt, wobei jeweils nur ein Parameter verändert wurde, bei identischer Einstellung aller anderen Parameter, sodass die Ceteris-paribus Bedingung erfüllt ist. Die Ausbringungsmenge wurde mittels einer Präzisionsdigitalwaage¹⁴ [127] erfasst und per Schnittstelle von einem Messrechner weitergeleitet und gespeichert. Hierbei betrug die Messfrequenz der Gewichtsmessung 10 Hz. Nachfolgend sind die unterschiedlichen Variationsparameter aufgeführt und die Versuchsergebnisse dargestellt.

- **Binderausbringungsmenge in Abhängigkeit der Sperrradumdrehungen**

In Abhängigkeit der Umdrehungszahl des Sperrrades wird die Binderausbringungsmenge und somit der Bindergehalt auf dem Roving gesteuert. In einer ersten Versuchsreihe wurden die Umdrehungen pro Minute von 6 min^{-1} auf 60 min^{-1} gesteigert. In Abbildung 4.15 sind die Binderausbringungsmengen für das Huntsman Bindersystem (XB 3366), als auch für das Momentive System (05311) abgebildet. In Abhängigkeit der Drehzahl sowie des Bindermaterials kann eine genaue Dosierung der Binderpartikel erfolgen. Die Zielgröße liegt hierbei zwischen 0 und 5 g/min, welches in Verbin-

¹⁴ METTLER TOLEDO XP10002S

dung mit dem eingesetzten 50k Roving und einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 15 m/min zu einem Binderanteil von 0 bis 10 Gew.- % führt.

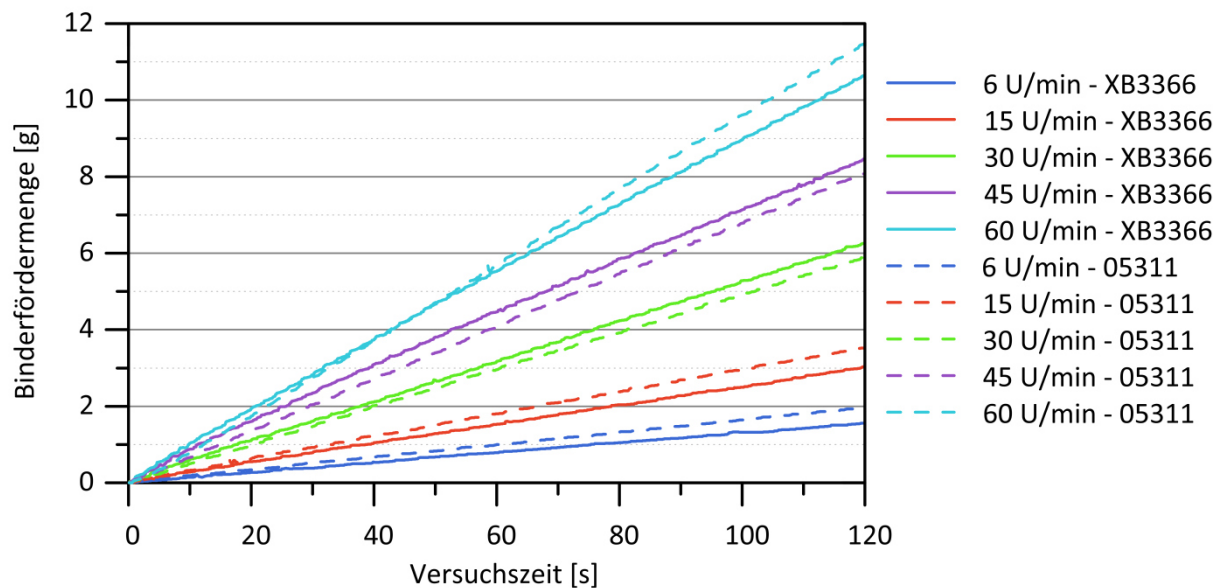


Abbildung 4.15: Binderausbringungsmenge in Variation der Sperradzahl (Bindermaterial XB 3366 & 05311)

Die theoretisch berechnete Fördermenge für ein Fluid ist um den Faktor 1,6 – 2,3 höher als die tatsächliche Fördermenge der Binderpartikel als Feststoff. Grund hierfür ist das Riesel- und Fließverhalten des Binderpulvers innerhalb der Zahnradfreiräume sowie dem Abstand zwischen dem Zahnrad und dem Schieber, in welchem die Binderpartikel nur aufgrund der Reibung weitertransportiert werden. Eine Verdopplung der Umdrehungen des Sperrades führt somit nicht zu einer Verdopplung der Binderausbringungsmenge, wie Tabelle 4.1 zeigt. Die Tabelle beinhaltet den Quotienten aus der geförderten Bindermenge und der Sperradumdrehung für vier unterschiedliche Messzeiten und fünf unterschiedliche Sperradumdrehungen. Deutlich ist eine Steigerung der Fördermenge des Bindermaterials mit zunehmender Steigerung der Sperradumdrehungen, also die Reduktion des Quotienten, zu erkennen. Die Ergebnisse der Tabelle 4.1 in Verbindung mit den Verläufen der Ausbringungsmenge (Abbildung 4.15) sind linear und steigen unterproportional mit der Umdrehungszahl des Sperrades.

Diese Tatsache lässt sich sowohl auf das Riesel- bzw. Fließverhalten als auch auf das Entfernen der Binderpartikel aus den Sperradzwischenräumen durch die zugeführte Druckluft in Verbindung mit der Vibrationsenergie schließen. Eine vollständige

Entfernung der Binderpartikel ist bei höheren Umdrehungszahlen nicht zu 100 % gewährleistet.

Tabelle 4.1: Quotient aus der geförderten Bindermenge & der Sperrradumdrehung

		Sperrradumdrehungen [min^{-1}]				
		6	15	30	45	60
Messzeiten [s]	30	0,063	0,053	0,054	0,052	0,047
	60	0,132	0,102	0,106	0,099	0,092
	90	0,195	0,152	0,158	0,143	0,135
	120	0,260	0,203	0,209	0,188	0,177

- **Binderausbringungsmenge in Abhängigkeit der Transportluft**

Die Transportluft dient dem Transport der Binderpartikel vom B-F-M zur Applizierungseinheit bzw. zum Ablegekopf. Hierbei wird ein definierter Luftstrom in das B-F-M eingeleitet, welcher durch eine Bohrung horizontal auf das Sperrrad strömt. Die Strömung erleichtert zusätzlich zur Transportfunktion noch das Lösen der Binderpartikel zwischen den Zähnen des Sperrrades. Die gelösten Binderpartikel werden nachfolgend mit der Transportluft aus dem B-F-M befördert. In Abbildung 4.16 ist die Binderausbringungsmenge bei Variation der Transportluft dargestellt (gestaffelt – 10 s). Der minimale Volumenstrom des Luftstromes beträgt 2,5 Normliter pro Minute (NI/min) und wurde jeweils um 2,5 NI/min auf 10 NI/min gesteigert. Hierzu wurde ein Schwebekörper-Durchflussmesser¹⁵ verwendet. Nach einem linearen Fit jeder Messkurve wurde der „Fehler der Summe der Quadrate“ berechnet¹⁶. Hierbei zeigte der Versuch mit 5,0 NI/min die geringsten Abweichungen (0,107), gefolgt von 7,5 NI/min und 10 NI/min. Der niedrigste Durchfluss zeigte die höchste Abweichung von dem linearen Fit (2,004). Für die weiteren Versuche wurde der Volumenstrom auf 5 NI/min festgelegt da hier die beste Gleichmäßigkeit der Binderförderung bei gleichzeitig geringem Luftstrom und somit geringen Verwirbelungen bei der späteren Applizierung des Bindermaterials auf dem Roving, vorherrscht. Eine Verringerung des Luftstromes führt zu einer ungleichmäßigen Binderfördermenge aufgrund eines ungleichmäßigen Lösens der Binderpartikel vom Zahnrad.

¹⁵ Schwebekörper-Durchflussmesser Modell FD (FD-1255L) der Firma INTERIN GmbH

¹⁶ Datenanalyse und Grafiksoftware Origin 8G SR4 der Firma OriginLab Corporation, USA

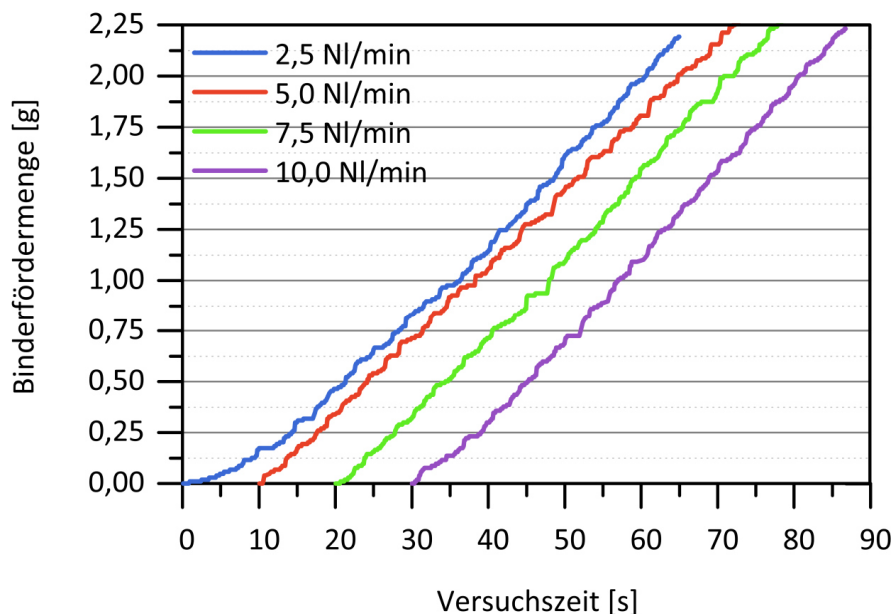


Abbildung 4.16: Binderausbringungsmenge bei Variation der Transportluft

- **Binderausbringungsmenge in Abhängigkeit der Vibrationsenergie / Vibrationsfrequenz**

Zur Unterstützung des Bindertransportes vom Vorratsbehälter zum Sperrad als auch zur Erleichterung des Ablöses des Binderpulvers zwischen den Sperrradzähnen wird das gesamte Binder-Förder-Modul durch einen Luftvibrator in Schwingung versetzt. In Tabelle 4.2 sind die ermittelten Kennwerte des eingesetzten Druckluft-Kolbenvibrators¹⁷ [128] (Datenblattwerte in Klammern) aufgeführt. Die Messdaten wurden mithilfe eines Messkraftverstärkers¹⁸ sowie einer Kraftmessdose¹⁹ [129] ermittelt. Die Aufnahme Frequenz betrug 10 kHz, ein exemplarischer Amplitudenverlauf ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

Tabelle 4.2: Eigenschaften des Luftvibrators: Netter Vibration NTS 180 HF

Eingangsluftdruck [bar]	Vibrationsfrequenz [Hz]	Vibrationskraft [N]
1,5	4864,94	35,15
2,0	5232,65 (5520)	62,26 (59)
2,5	5521,58	101,91

¹⁷ Netter Vibration NTS 180 HF

¹⁸ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Quantum X MX840A

¹⁹ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Z6FC3 – Nennkraft 20 kg

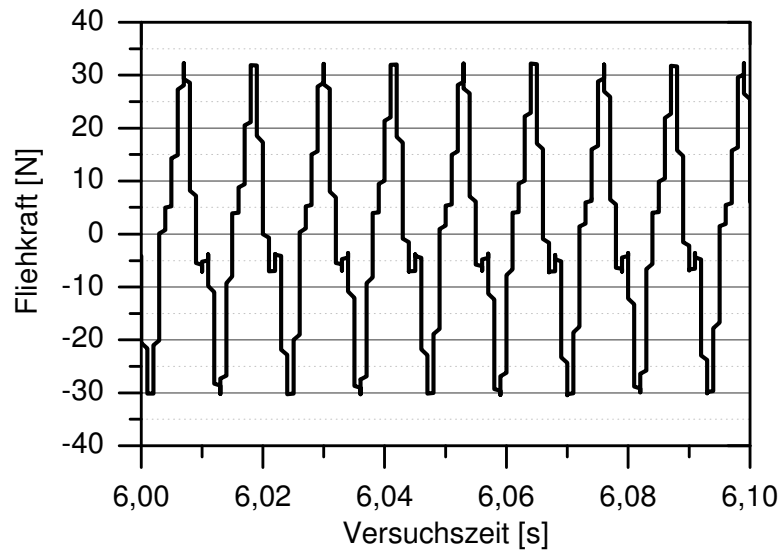


Abbildung 4.17: Exemplar. Fliehkraftverlauf bei 2 bar Nenndruck und ≈ 5.232 Hz

Abbildung 4.18 zeigt die Binderausbringungsmenge in Abhängigkeit der Eingangsdruckluft, welche die Vibrationsfrequenz und -kraft variiert. Es ist zu erkennen, dass bei einer zu geringen Vibrationsfrequenz bzw. -kraft, bei 1,5 bar Eingangsdruck, die Binderpartikel nicht homogen gefördert und weitertransportiert werden. Bei einer zu hohen Vibrationsfrequenz bzw. -kraft, bei 2,5 bar Eingangsdruck, sind zwei unterschiedliche Steigungen der Binderausbringungsmenge zu erkennen. Das gleichmäßigste Ergebnis wurde bei einem Eingangsdruck von 2,0 bar erreicht, welches einer Vibrationsfrequenz von ≈ 5.232 Hz und einer Vibrationskraft von ≈ 62 N entspricht.

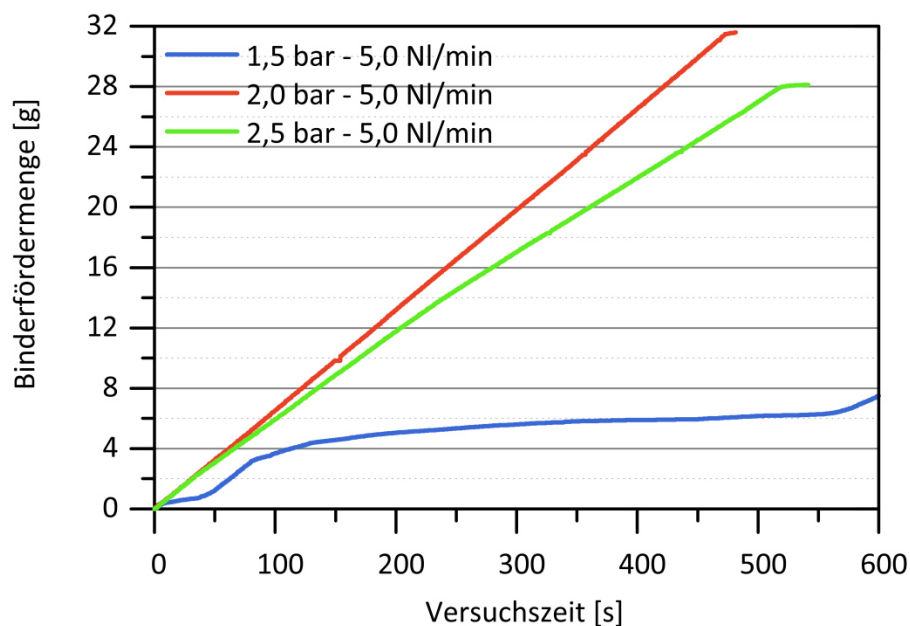


Abbildung 4.18: Binderausbringungsmenge in Variation der Vibrationsenergie bzw. -frequenz

4.2.2.2 Applikationsmodul für die Offline-Bebinderung

Das Applikationsmodul für die Offline-Bebinderung umfasst eine stufenlos verstellbare Halterung für die Energiequelle, ein Binderpartikel-Auffangsystem sowie eine Glas-/Edelstahl Abschildung gegen Luftturbulenzen, welche das Ergebnis evtl. beeinträchtigen könnten. Sowohl ein elektrischer Luftheritzer als auch eine Heißgasdüse kann als Energiequelle verwendet werden. Die durch den Prozess nicht applizierten Binderpartikel werden in dem trichterförmigen System aufgefangen und anschließend entsorgt. Beide Energiequellen wurden analysiert und sind im Nachfolgenden dargestellt (Abbildung 4.19 und Abbildung 4.23).

- **Binder-Applikations-Modul mit Heißluftfön**

Das Applikationsmodul mit einem Industrieheißluftfön²⁰ [130] ist in Abbildung 4.19 aufgezeigt. Die einzelnen Elemente der seitlichen Partikelzufuhr sind gekennzeichnet. Zu Temperaturmessung sind sechs Temperaturelemente (TS1 – TS 6, NiCr-Ni, Typ K mit Glasfaserummantelung) eingezeichnet.

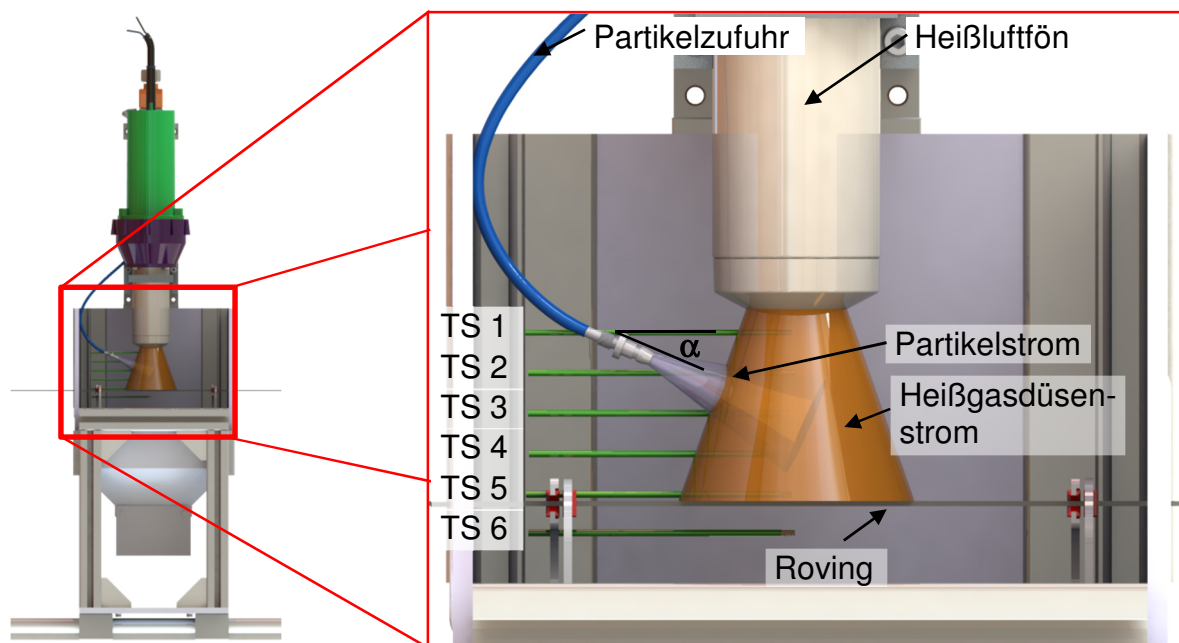


Abbildung 4.19: Binder-Applikations-Modul mit Heißluftfön Triac S und seitlicher Binderzuführung

Der Einfluss des Winkels der seitlichen Zuführung wurde auf die Auswirkungen hinsichtlich des Binderauftrages untersucht. Aufgrund von Restriktionen seitens des

²⁰ Leister Triac S

eingesetzten Lufterhitzers (maximaler Luftstrom von 230 l/min), als auch des verwendeten Luftstromes der Binderpartikelförderung (vgl. Kapitel 4.2.2), beträgt der eingestellte Winkel für die Offline-Bebinderung ≈ 45 Grad. Bei Untersuchungen mit einem veränderten Zufuhrwinkel zeigte sich, dass bei einem flacheren Winkel die Binderpartikel teilweise durch den Heißluftstrom an die Umrandung des Applizierungsmoduls gefördert werden, während bei steilerem Winkel die Binderpartikel nur begrenzt aufgeheizt werden und dadurch nicht am Roving haften.

Der Temperaturverlauf während der Binderapplizierung ist für die Anhaftung der Binderpartikel am Rovingmaterial essenziell. Zur Analyse des Temperaturprofils während der Offlineherstellung wurden mehrere Temperatursensoren in das Binder-Applizierungs-Modul (Abbildung 4.19) eingebracht. Die Distanz zwischen der Austrittsöffnung des Heißluftfönes und des Rovings beträgt 6 cm. Der Abstand des ersten Temperatursensoren (TS 1) zur Auslassöffnung des elektrischen Lufterhitzers beträgt 1,5 cm, der Abstand der Temperatursensoren (TS 2 – TS 6) zueinander beträgt jeweils 1 cm. Der Abfall der maximalen Temperatur in Abhängigkeit des Abstandes zur Austrittsöffnung sowie für unterschiedliche Leistungsstufen des Heißluftfönes ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Leistungsstufe die Temperaturunterschiede zwischen TS 1 und TS 6 zunehmen, was auf ein vergrößertes Temperaturdelta zur Umgebungstemperatur zurückzuführen ist.

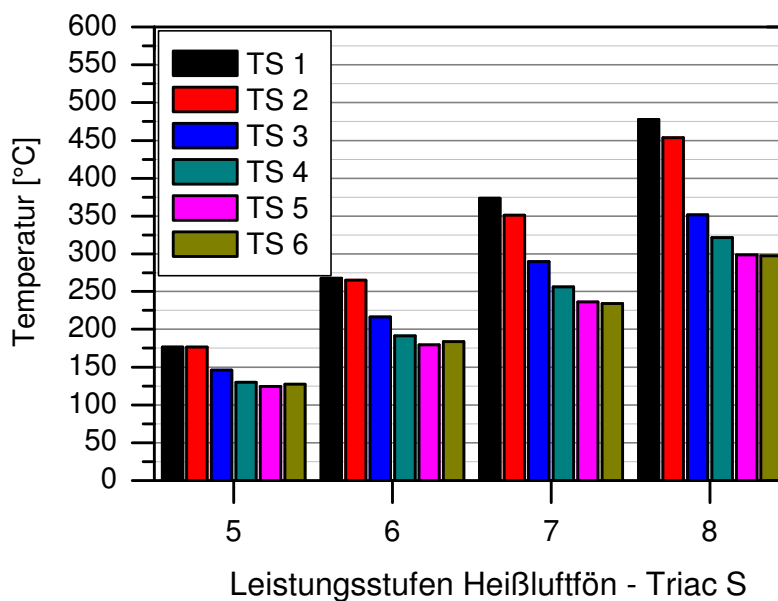
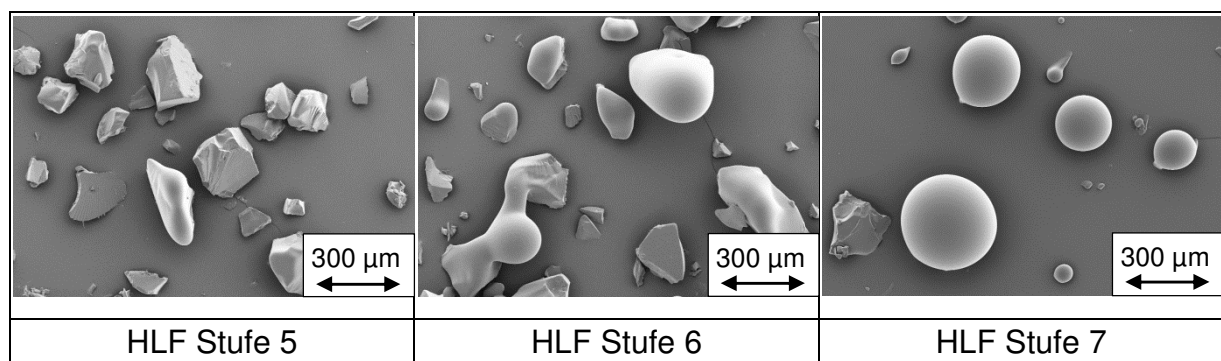


Abbildung 4.20: Temperaturverteilung in Abhängigkeit des Abstandes zur Austrittsöffnung des Heißluftstromes

Die Auswirkungen des Temperaturverlaufes auf die Phasenänderung des Bindermaterials (Huntsman XB 3366) wurden anhand eines Durchlaufversuches mit Binderpartikeln ausgewertet. Hierfür wurde auf einem Roving pro Versuch jeweils ein Probeträger für ein Rasterelektronenmikroskop aufgebracht. Während des Durchlaufens der Binder-Applizierungs-Einheit in Produktionsgeschwindigkeit wurden die Binderpartikel erwärmt und hafteten am Probenträger. Die Versuche wurden mit 15 m/min und einer Sperrradgeschwindigkeit von 15 min^{-1} durchgeführt. Die Analyseaufnahmen der Binderpartikel sind in der nachfolgenden Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Temperatureinfluss auf die Binderpartikel (XB 3366)



Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Abbildung 3.3) ist der Temperatureinfluss auf die Binderpartikel zu erkennen. Ein Aufschmelzen der Binderpartikel ist bereits ab Heißluftfön Stufe 5 sichtbar und nimmt mit Steigerung der Temperatur bei Stufe 6 und 7 weiter zu. Aufgrund der hohen Erwärmungstemperatur bei HLF Stufe 7 sind die Binderpartikel komplett aufgeschmolzen und liegen in der energetisch günstigsten Form, einer Kugelform, vor. Zur weiteren Analyse des Bindermaterials XB 3366²¹ wurde eine dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)²² Analyse durchgeführt (Abbildung 4.21). Innerhalb einer DSC Analyse wird die endotherme als auch die exotherme Wärmemenge eines Stoffes aufgezeichnet [2]. Der Aufwärme- bzw. Abkühlvorgang (nicht dargestellt) der Probe, wurde insgesamt drei Mal wiederholt und ist mit einem Versatz von 2 mW dargestellt. Hierbei wurde jeweils die Glasübergangstemperatur ermittelt. Diese steigt von $T_{g1} = 76,54 \text{ °C}$ beim ersten Aufschmelzen auf $T_{g2} = 80,86 \text{ °C}$ und beim dritten Aufschmelzen auf $T_{g3} = 81,23 \text{ °C}$ an. Die Steigerung des T_g ist auf den Temperaturverlauf der DSC-Messung (-20 bis 240 °C) zurückzuführen. Hierbei wird das Bisphenol A basierte Bindermaterial oberhalb des

²¹ Einwaage: 12,0500 mg

²² Mettler-Toledo Typ: DSC 821^e

Siedepunktes erwärmt wodurch Bestandteile in den gasförmigen Zustand übergehen. Der Anteil dieser gasförmigen Bestandteile verringert sich je Aufheizvorgang.

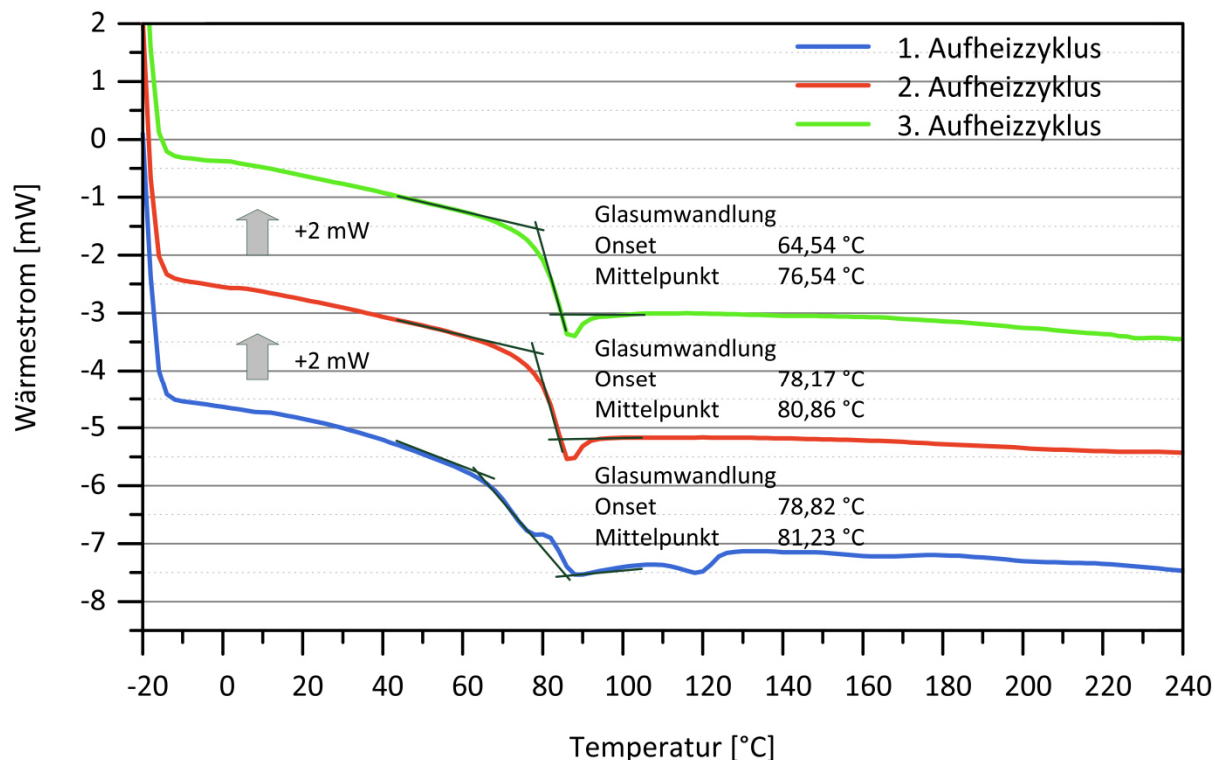


Abbildung 4.21: DSC-Analyse des Huntsman XB 3366 Bindermaterials

Die in Tabelle 4.3 dargestellte Phasenänderung, in welcher die Enthalpie aufgrund der Erwärmung steigt, spiegelt die Glasübergangstemperatur des Bindersystems wider.

Die Anhaftung der Binderpartikel auf dem Roving ist das Hauptziel während der Offlineherstellung. Dabei ist es wichtig, das Eindringen des schmelzflüssigen Binders in die Rovingtiefe zu kontrollieren. Aufgrund der Beschleunigungsenergie der Binderpartikel durch den Luftstrom, als auch der Kapillareffekte des Rovings, ist es also vorteilhaft, die Binderpartikel nur an der Außenhülle bei der Offline-Bebinderung anzuschmelzen. Die so nicht komplett aufgeschmolzenen Partikel können nicht in die Tiefe des Rovings fließen. Dies führt zu einer besseren Haftung der Lagen bei der Herstellung der Preform. Durch das beim späteren Ablegen nochmalige Erwärmen des Binderrovings, werden die Binderpartikel komplett aufgeschmolzen und verbinden den abgelegten Roving mit der bestehenden Preform oder dem Werkzeug. Hierbei wird auch ein Eindringen des Binders in die Tiefe des Rovings, durch ein komplettes Aufschmelzen mit anschließender Kompaktierung, erreicht.

Zusätzlich zu den Temperaturversuchen innerhalb der Binder-Applizierungseinheit wurde ein Thermoelement vom Typ K auf einem Roving in Prozessgeschwindigkeit durch die Appliziereinheit bei Variation der Heißluftföneinstellung gefördert. Der Versuch wurde jeweils fünfmal wiederholt um ein Verdrehen des Rovings und damit eine Positionsänderung des Thermoelementes statistisch abzusichern. Exemplarische Temperaturverläufe für vier unterschiedliche Heißluftföneinstellungen (Stufe 5 – 8) werden in Abbildung 4.22 dargestellt.

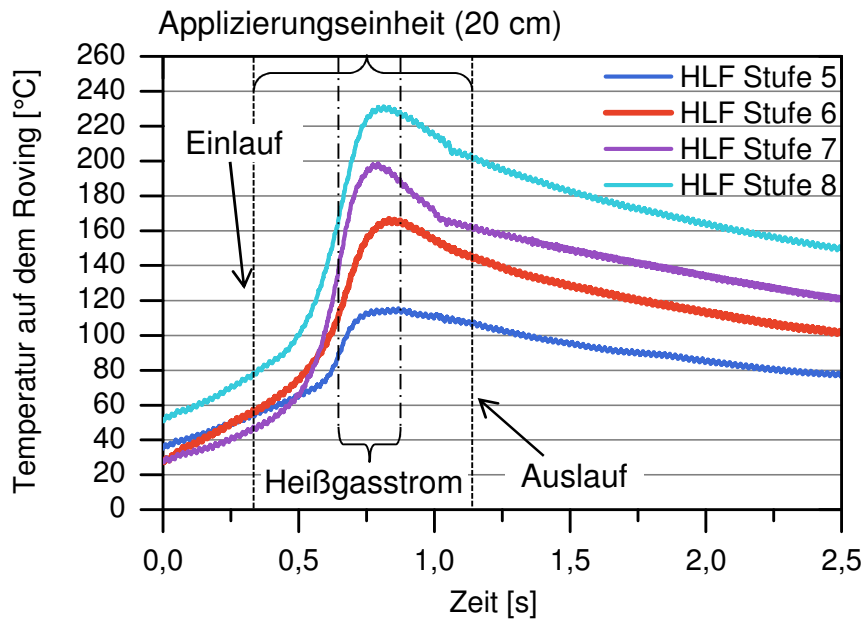


Abbildung 4.22: Temperatur auf dem Roving beim Durchlaufen der Applizierungseinheit

Deutlich zu erkennen ist der Einlauf des Temperaturelements in die Applizierungseinheit als auch der Auslauf aus der Einheit. Der Temperaturanstieg vor dem Einlauf in die Einheit kann mit einer Luftströmung der erwärmten Luft durch die Einlassöffnung des Rovings in die Appliziereinheit begründet werden. Die langsam sinkende Temperatur nach dem Auslauf ist mit der Wärmekapazität der Kohlenstofffaser gekoppelt. Hierbei ist zu beachten, dass die Temperatur vor dem Wiederaufspulen unterhalb der Schmelztemperatur des Binders liegt um ein Verkleben innerhalb der Spule zu verhindern.

Die eingebrachte Energie in Form eines erhitzten Luftstromes ist in Abhängigkeit der Intensität des Heißluftfönes variabel einstellbar. Der Temperaturanstieg je Heißluftfönstufe beträgt auf dem Roving dabei im Peak ≈ 40 °C. Im Vergleich zu den statisch ermittelten Temperaturkennwerten (Abbildung 4.20) liegt die reale, dynamische Ma-

ximaltemperatur am bzw. auf dem Roving deutlich unterhalb. Die Temperaturspeicherung des Rovings, das heißt die Zeit in welcher die Temperatur des Rovings oberhalb des Binderschmelzpunktes ist, ist mit für die Anhaftung und das Aufschmelzen der Binderpartikel verantwortlich.

- **Binder-Applikations-Modul mit Heißgasdüse**

Das Binder-Applikations-Modul mit der zweiten analysierten Energiequelle ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Die an der IVW GmbH entwickelte Heißgasdüse [76, 131] wurde für das Ablegen von verstärkten thermoplastischen Halbzeugen konstruiert. Durch die Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis 9:1 und der Beimischung von komprimierter Umgebungsluft, 1,67-fache des Brenngasgemisches, erreicht der Heißgasstrom eine maximale Temperatur von $> 2500\text{ °C}$ [132]. Typischerweise liegen die Temperaturen des Heißgasstromes bei der Verarbeitung von Thermoplasttapes zwischen 800 und 1300 °C [76]

Die Binderpartikel können bei der Nutzung der Heißgasdüse sowohl seitlich dem Heißgasstrom zugeführt oder mit dem Heißgas der Heißgasdüse direkt aufgetragen (patentiert [133]) werden. Für die direkte Auftragung der Binderpartikel mit dem Heißgasstrom werden die Binderpartikel dem zugeführten Luftstrom beigemischt.

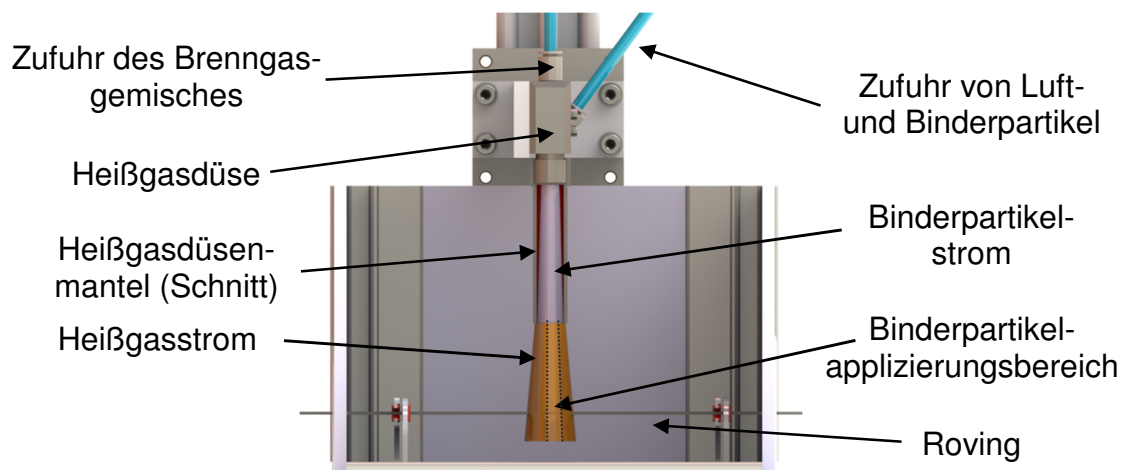


Abbildung 4.23: Binder-Applikations-Modul mit Heißgasdüse und direkter Binderzuführung

Die Nutzung dieser Energiequelle als Erwärmungsmethode der Binderpartikel setzt eine Temperaturreduktion des Heißgasstromes voraus. Die Temperatur des Heißgasstromes kann durch Modifikation der Gasmengen variiert werden. Zur Validierung der Temperaturverteilung des Heißgasstromes wurde ein Versuchsaufbau analog

Abbildung 4.24 aufgebaut. Mit Hilfe dieses Versuchsaufbaues können die geometrischen Rahmenbedingungen des Tapelegekopfes, ohne die Einschränkungen am Ablegeprüfstand, nachgebildet werden. Hierbei ist die Heißgasdüse mit einer Außenkühlung ummantelt und ortsfest fixiert. Die Temperatursensoren sind mittels eines Kreuztisches in der Ebene verfahrbar. Zur Analyse der Temperatur sind sowohl ein Einfarbenpyrometer²³ Messbereich: 800 C – 2200 °C als auch ein Typ S Thermoelement im Messbereich zwischen der Raumtemperatur und 1600 °C, welches mittels eines Messverstärkers²⁴ angesteuert wird, verbaut. Für die Messung mittels Pyrometer von Temperaturen > 1400 °C wurde ein Molybdänplättchen mittig in die Flamme für den Fokussierungspunkt des Pyrometers eingebracht. Dabei wurden die Temperaturen erst dokumentiert, nachdem sie ein konstantes Niveau erreicht hatten. Um die Temperaturbelastung des Heißgasdüsenmantels im Dauerbetrieb zu reduzieren, wurde dieser mit einer aktiven Luftzufuhr versehen.

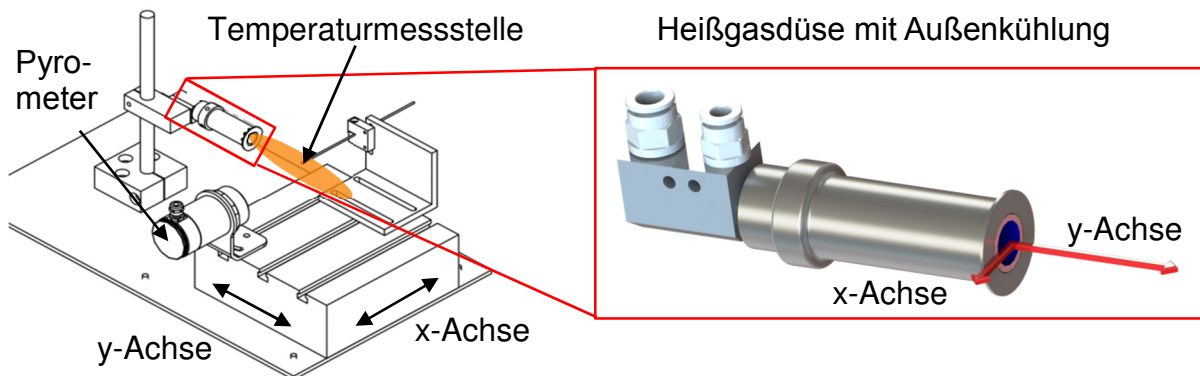


Abbildung 4.24: Versuchsaufbau zur Validierung der Heißgasdüsentemperatur

Als Basiseinstellung wurde ein niedriger Standardvolumenstrom mit 6 Normliter verwendet. Die Bezeichnung 6 Normliter bezieht sich dabei auf die Summe der eingesetzten Brenngasvolumina. In Abbildung 4.25 ist die Temperaturverteilung der Heißgasdüse dargestellt. Die Messdaten wurden am Nullpunkt der x-Achse gespiegelt, um eine Strömungsveränderung des Heißgasstromes durch das Messelement inkl. Wolframhalter zu verhindern. Der zu untersuchende Messraum wird durch die realen Abmessungen am TLK definiert. Hierbei ist der Abstand zwischen Ausgang Heißgasdüse und dem „Nip-Point“ ausschlaggebend. Dieser beträgt zwischen 30 mm und 50 mm. Temperaturen oberhalb von 1100 °C sind für die Aufheizung von Binderpar-

²³ Micro Epsilon, Hochleistungspyromter Typ: CTLM-1H1CF2-C3

²⁴ HBM, QuantumX MX840A

tikeln bei einer Geschwindigkeit, beim offline Applizieren der Binderpartikel, von 15 m/min zu hoch, sodass ein komplettes Aufschmelzen der Binderpartikel und damit ein tieferes Eindringen der Binderpartikel in den Roving die unerwünschte Folge wäre.

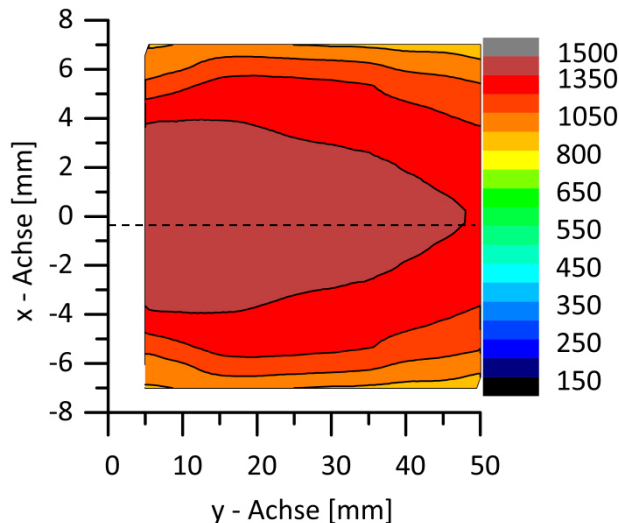


Abbildung 4.25: Temperaturverteilung der Heißgasdüse mit 6 NI Brenngas

Für eine Reduktion der Heißgasdüsentemperatur muss das Masseverhältnis der zugeführten Gase variiert werden. Ein Berechnungsprogramm der Firma ASH²⁵ zur Bestimmung der Heißgasdüsentemperatur wurde verwendet, um die jeweiligen Gasmengen gezielt zu variieren (Abbildung 4.26).

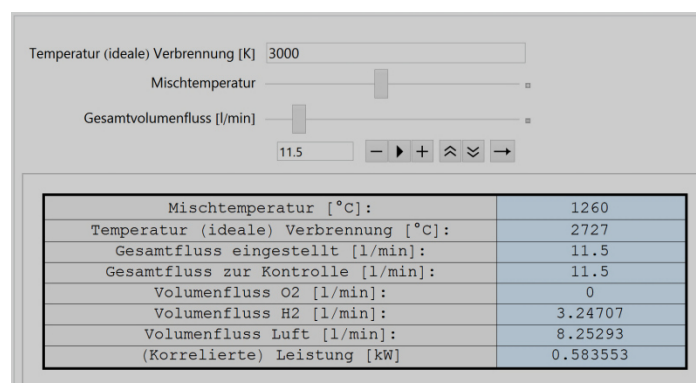


Abbildung 4.26: Benutzeroberfläche des Programms zur Bestimmung der Heißgasdüsentemperatur

Nach erfolgreicher Validierung des Programmes wurde die Heißgasdüsentemperatur (Mischtemperatur) schrittweise reduziert, die daraus resultierenden Werte am Prüfstand eingestellt und der Versuch gestartet. In Abbildung 4.27 sind zwei Temperatur-

²⁵ Automation Steeg & Hoffmeyer GmbH; www.automation-gmbh.com

verläufe dargestellt. Das linke Bild zeigt die niedrigste Temperatur die mit der Heißgasdüse erreicht werden konnte, welche im Zentrum ca. 350 °C beträgt. Auf dem rechten Bild ist eine Temperaturverteilung für einen erhöhten Gasstrom (vgl. Tabelle 4.4) dargestellt. Dies kommt dabei mit einer maximalen Temperatur von 600 °C dem Temperaturverlauf des elektrischen Heißluftföns sehr nahe.

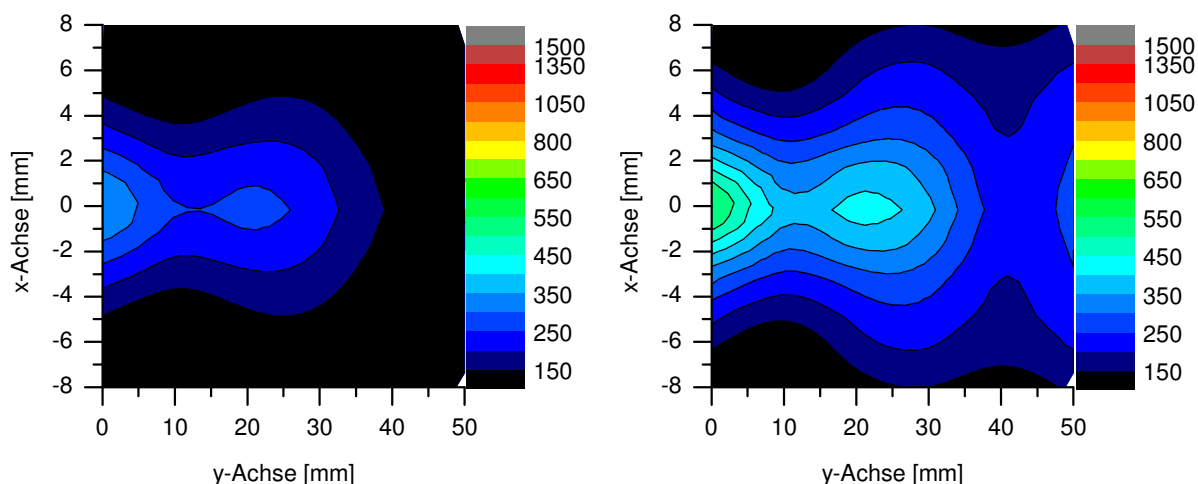


Abbildung 4.27: Temperaturverlauf 350 °C und 600 °C (Einstellungen Tabelle 4.4)

In Tabelle 4.4 ist für unterschiedliche Maximaltemperaturen des Heißgasstromes die berechnete Zusammensetzung der Gasmenge als auch die resultierende Isttemperatur eingetragen. Das Gasmisch setzt sich hierbei nicht mehr aus Wasserstoff, Sauerstoff und Luft zusammen, sondern nur noch aus Wasserstoff und Luft. Der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff wird aus der zugeführten Druckluft (Zusammensetzung: 78,08 % N₂; 20,95 % O₂; 0,93 % Edelgase; 0,04 % Kohlendioxid und andere Gase [134]) entnommen. Die maximale Abweichung der berechneten Temperatur und der gemessenen Isttemperatur liegt bei $\approx 8,1$ %.

Tabelle 4.4: Soll-/ Isttemperaturvergleich bei Variation der Brenngasvolumenströme

Solltemperatur [°C]	Volumenstrom H ₂ [NI / min]	Volumenstrom Luft [NI / min]	Isttemperatur [°C]
350	0,9	14,1	365
400	1,3	18,7	370
500	1,7	18,3	540
600	2,0	18,0	590

Für die Herstellung der offline bebinderten Rovings wurde nach Analyse beider Energiequellen der Heißluftfön eingesetzt. Grund hierfür ist die ausreichende Wärmeenergie bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 15 m/min sowie das vereinfach-

te Handling im Vergleich zur Heißgasdüse. Hierbei ist vor allem die reduzierte Temperatur als auch das einfache Ein- und Ausschalten bei Komplikationen zu nennen. Der Einsatz der Heißgasdüse liefert erst bei höheren Ablegegeschwindigkeiten größer als 30 m/min und bei einem Start / Stopp Prozessverlauf einen Mehrwert, da hier keine Aufheizzeit für das Erreichen der maximalen Temperatur erforderlich ist.

4.2.3 Qualitätsüberwachungssysteme

Der in Abbildung 4.7 dargestellte Offline-Bebinderungsprozess kann durch unterschiedliche QS-Systeme überwacht werden. Eine reine Breitenvermessung des Rovings erfolgt durch einen optischen Mikrometer²⁶ berührungslos. In Abbildung 4.28 ist ein exemplarischer Verlauf der Rovingbreitenvermessung nach der Breiteneinstellungseinheit und vor dem B-A-M aufgezeigt. Aufgrund der hohen Auflösung des Breitenfassungssystem (1 μm) werden abstehende Filamente oder herunterfallende Faserbruchstücke detektiert, weswegen zusätzlich zur realen Messkurve eine geglättete Messkurve (rot) dargestellt ist. Die eingestellte Breite betrug bei diesem Versuch 17 mm, welche im Mittel um $\pm 1,5$ mm schwankt. Die Sollbreite betrug 16 mm bei einer Toleranz - 0 mm und + 3 mm. Grund für die erhöhte Positivtoleranz liegt in der vereinfachten Breitenreduktion im Vergleich zur Rovingspreizung.

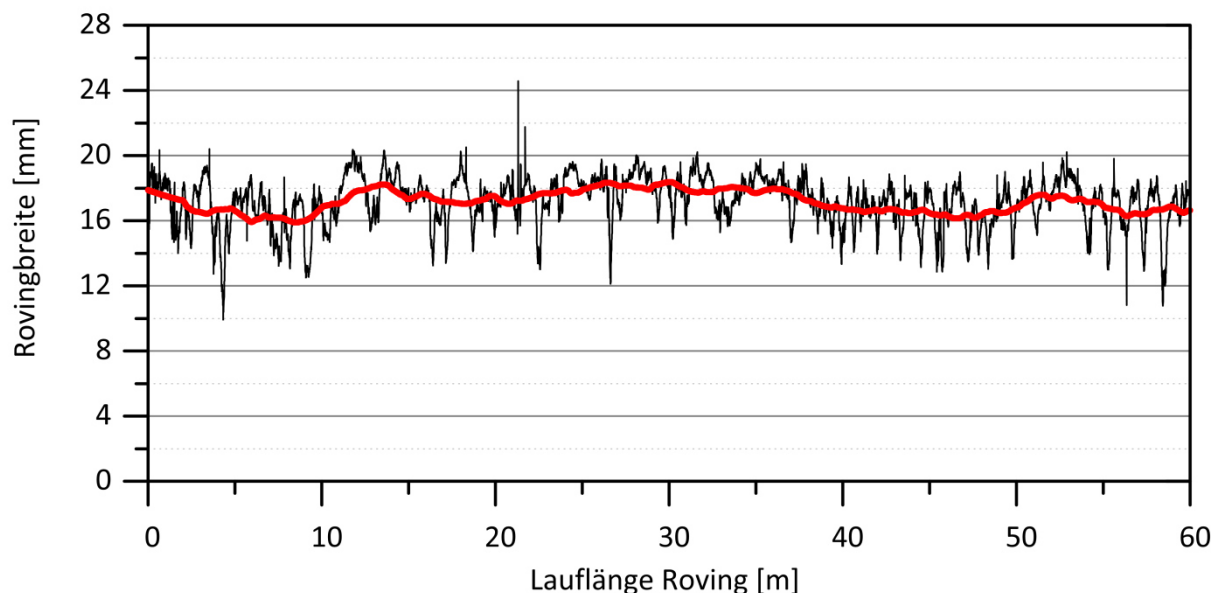


Abbildung 4.28: Rovingbreitenvermessung nach der Breiteneinstellungseinheit

Die Breite des Rovings nach dem Spreizen ist in Verbindung mit der homogenen Binderförderungs- und Binderverteilung für eine gleichbleibende Materialquali-

²⁶ Micro-Epsilon, Laser Mikrometer optoCONTROL 2500

tät essenziell. Die Erfassung der Rovingbreite gibt somit einen Parameter für die Zuverlässigkeit des Spreizprozesses wider. Wird ein Roving nur unzureichend gespreizt, verringert sich die Bebindungsfläche innerhalb des Binder-Applikations-Moduls, wodurch weniger Binderpartikel an dem Roving haften, was zu einem unregelmäßigen Bindergehalt führt. Durch die Funktionsweise der Breitenerfassungssysteme (Detektion der linken und rechten Kante des Rovings) kann es jedoch auch zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen, wenn sich der Roving nicht homogen spreizt oder durch Verschmutzungen (Faserbrüche / Faserstaub) beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund wurde ein optisches Erfassungssystem entwickelt, welches eine 100 % Erfassung der Rovingoberfläche ermöglicht. Hierzu wird eine Industriekamera²⁷ mit einem in LabView erstellten Datenerfassungssystem verwendet. Die Industriekamera verfügt über einen sogenannten „Global-Shutter“ welcher im Gegensatz zu einem „Rolling-Shutter“ eine verzerrungsfreie Aufnahme des Rovings erlaubt. In Abbildung 4.29 ist die Benutzeroberfläche des LabView-Programmes mit den wichtigsten Parametern zur Erfassung und Auswertung der Daten dargestellt. Ein Originalbild (Graustufen) wird per einstellbaren Schwarz-Weiß-Schwellwert in ein reines SW-Bild umgewandelt. Der resultierende Schwarzwert (Prozent des Bildanteils) wird in einer Datei dokumentiert. Sowohl die Originalbilder als auch der Schwarzwert werden für jeden Bildabschnitt gespeichert.

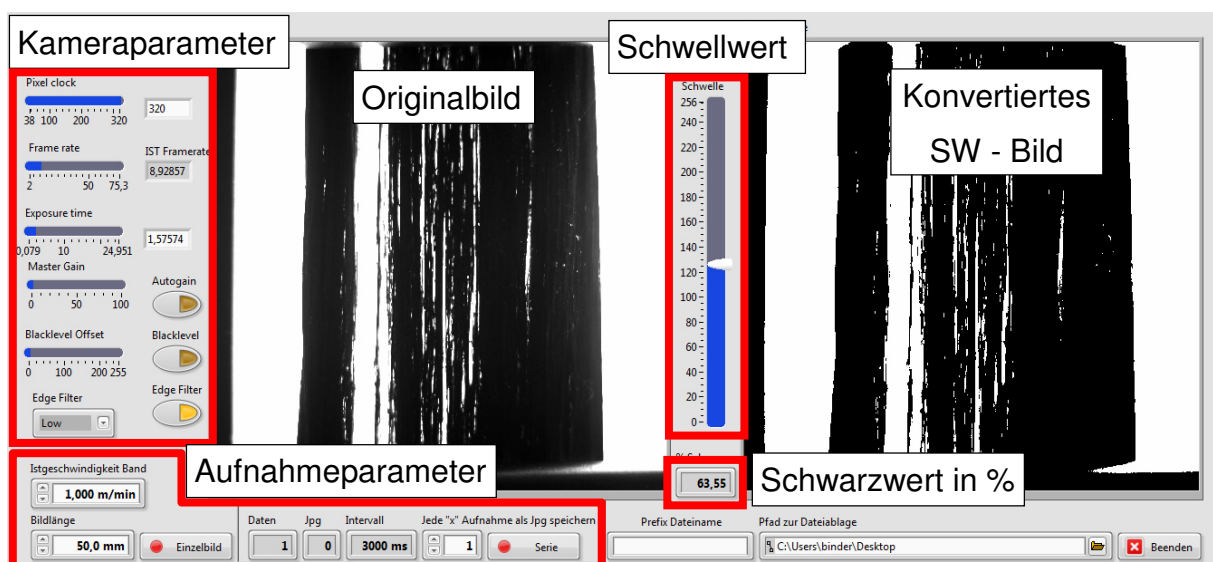


Abbildung 4.29: Optisches QS-System (Bedienoberfläche LabView)

²⁷ IDS Imaging Development Systems GmbH; UI-3370CP-M-GL

Zwei beispielhafte Aufnahmen von zwei Rovings sind in Abbildung 4.30 dargestellt. Auf der linken Seite ist eine flächige Spreizung ersichtlich, wohingegen auf der rechten Seite die Bedeckung Lücken aufweist. Im Vergleich zur ersten Aufnahme ist die Rovingbreite in der zweiten Aufnahme um 3,5 % geringer. Die tatsächlich zu bebindende Fläche sinkt jedoch aufgrund der Lücken im Roving um ca. 17 %. Die Aufnahmelänge beträgt 36,7 mm. Die Breitenanalyse wird mittels einer vorhandenen Software zur optischen Breitendetektion analysiert [135]. Die Aufnahme­frequenz ist an die Geschwindigkeit des Rovings gekoppelt und beträgt bei 15 m/min $\approx 6,8$ Bilder pro Sekunde.



Abbildung 4.30: Analyse der Spreizung eines Rovings (vollständige / partielle Spreizung)

Das System ist sowohl für die Offline- als auch für die Online-Bebinderung verwendbar. Für die Online-Bebinderung kann das System innerhalb des Endeffektors integriert werden. Durch das System ist eine Qualitätskontrolle der Spreizung bzw. der Erkennung von Lücken während des Ablegeprozesses möglich. Ein Vergleich beider Systeme (Abbildung 4.31) verdeutlicht den Nutzen des neuen kamerabasierten Systems. Die Bestimmung des „Schwarzanteiles“ ist homogen über die Umspullänge verteilt mit einer Abweichung von $63,9 \% \pm 4,3 \%$, wohingegen die reine Breitenverteilung eine Abweichung von $21,82 \text{ mm} \pm 3,37 \%$ aufweist. Prozentual gesehen ist die Abweichung des kamerabasierten Systems um den Faktor $\approx 2,3$ besser, wobei hier noch nicht der Informationsmehrwert durch die Flächenbestimmung berücksichtigt ist.

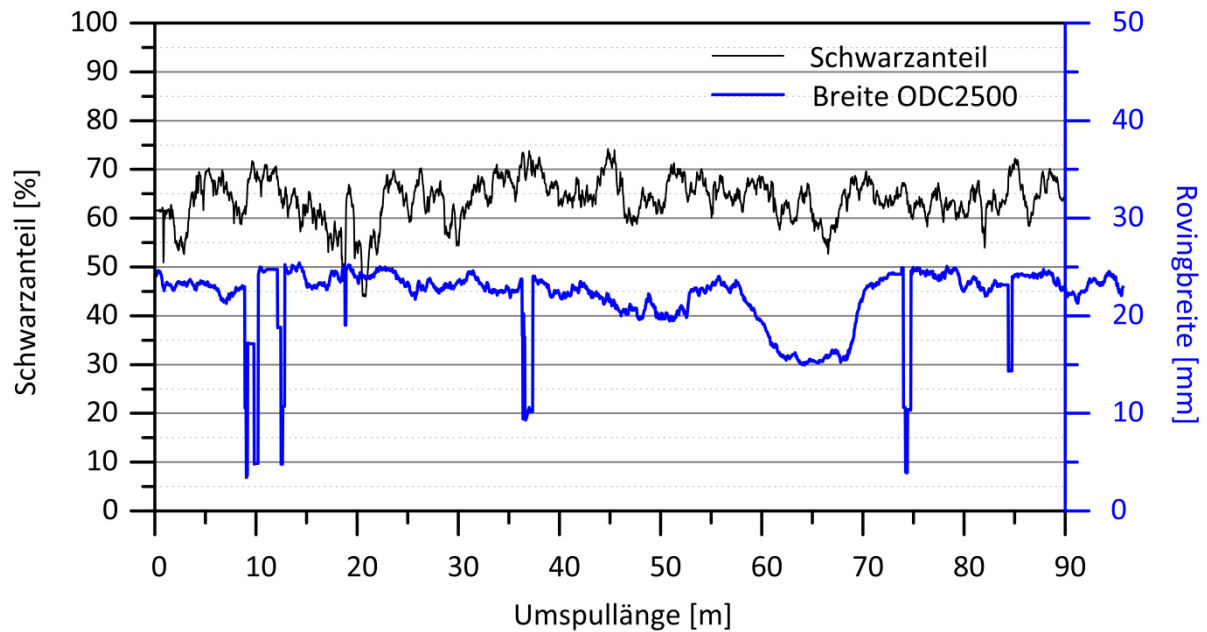


Abbildung 4.31: Parallele Analyse der Rovingbreite und der Oberfläche

❖ Fazit zur Entwicklung einer Methode zur Applizierung von Bindermaterial auf Rovings

Innerhalb dieses Kapitels wird die Methodik zur Applizierung von pulverförmigen Bindermaterialien auf einem unidirektionalen Roving entwickelt. Hierfür sind mehrere Module, wie die Spreizmodule oder das Binder-Förder-Modul, konstruiert und aufgebaut worden. Anhand von vorgegeben Sollwerten konnten die einzelnen Module verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden. Mit den in diesem Kapitel beschriebenen Systemen bzw. Modulen ist nun die Herstellung von Binderrovings sowohl „Offline“ (Kapitel 5) als auch „Online“ (Kapitel 6) möglich.

5. Herstellung und Analyse von offline bebinderten Preforms

Die Methoden zur Applizierung von Binderpartikeln auf einem Roving sind in Kapitel 4 aufgeführt. Die entwickelten Komponenten bzw. Module werden innerhalb dieses Kapitels für die Herstellung der offline bebinderten Preforms eingesetzt (Kapitel 5.1). Eine Analyse der Preform als auch des infiltrierten Verbundwerkstoffes erfolgt in Kapitel 5.2. Sowohl die mechanische Charakterisierung, das Kompaktierungsverhalten als auch die Permeabilität in Abhängigkeit des Bindergehaltes bzw. des Bindertyps wird innerhalb dieses Unterkapitels untersucht.

5.1 Herstellung von offline bebinderten Preforms

Anhand eines definierten Versuchsplanes sind Binderrovings mit unterschiedlichen Sperrradumdrehungen des Binder-Förder-Moduls hergestellt worden. Ziel war ein Bindergehalt von maximal 10 Gew.-%. Anhand der Erkenntnisse der Voruntersuchungen wurde die gleiche Stufung der Sperrradumdrehungen (6; 15; 30; 45; 60 min⁻¹) eingesetzt. Die Parameter zur Herstellung der Binderrovings wurden mithilfe der in den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse festgelegt:

- Herstellgeschwindigkeit: 15 m/min
- Temperatur bei der Binderapplizierung: 180 °C (entspricht HLF Stufe 6,5)
- Rovingbreite bei der Applizierung: 20 mm
- Rovingbreite beim Aufspulen (Soll): 14 mm
- Bindergehalt: ≈ 3,5 - 10 Gew.-%

Für die Ermittlung der Bindergehalte wurden bei der Herstellung der Binderrovings mehrere Proben mit einer definierten Länge entnommen. Anhand der in Abbildung 3.1 gravimetrisch bestimmten Rovinggewichte kann durch erneutes Wiegen der reale Bindergehalt auf der Probe ermittelt werden. Während des Umspulens bzw. der Spreizung des Rovings als auch während des Bebindungsprozesses wird das Rovingmaterial mechanisch beansprucht, was zu einer Reduktion des Gewichtes durch Materialverlust, z. B. durch Faserflusen, führt. Durch Entfernung des Materials mittels Vakuumtechnik kann eine gezielte Analyse des realen Gewichtes nur durch eine Vergleichsmessung stattfinden. Hierfür wurden verschiedene Gewichtsproben sowohl von der originalen Faserspule als auch nach dem Durchlaufen der gesamten Prozesskette, nach der Rovingspreizung und Binder-Applizier-Einheit, vermessen.

Eine Reduktion des Rovinggewichtes von 1,9 Gew.-% mit einer Standardabweichung von $\pm 0,50$ Gew.-% konnte ermittelt werden. Diese prozentuale Massenreduktion wurde bei allen Versuchsreihen berücksichtigt (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Preform Versuchsreihen inkl. der resultierenden Bindergehalte

Bezeichnung der Versuchsreihe	Sperrradgeschwindigkeit [min ⁻¹]	Ø Bindergehalt [Gew.-%]	Standardabw. Bindergehalt [Gew.-%]	Bindermaterial	Fasertyp
06-XB-50-4,07	6	4,07	0,508	Huntsman XB 3366	50k SGL C030
15-XB-50-6,23	15	6,23	0,305		
30-XB-50-7,06	30	7,06	0,531		
45-XB-50-9,28	45	9,28	0,106		
60-XB-50-9,76	60	9,76	1,064		
30-Mo-50-6,66	30	6,66	0,502	Momentive EPR 05311	12k Tenax HTS
Ref-Mo-12-2,25 ²⁸	-	2,25	0,75		

Die Rovingbreite nach der Breitenreduktion, also kurz vor dem Aufspulen des Materials auf die Spule des Typs BSH 315²⁹, wurde exemplarisch an einer Materialkombination (30-XB-50-7,06) mittels eines optischen Mikrometers ermittelt und ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Der hierbei ermittelte Mittelwert liegt bei 14,27 mm bei einer mittleren Standardabweichung von 0,84 mm.

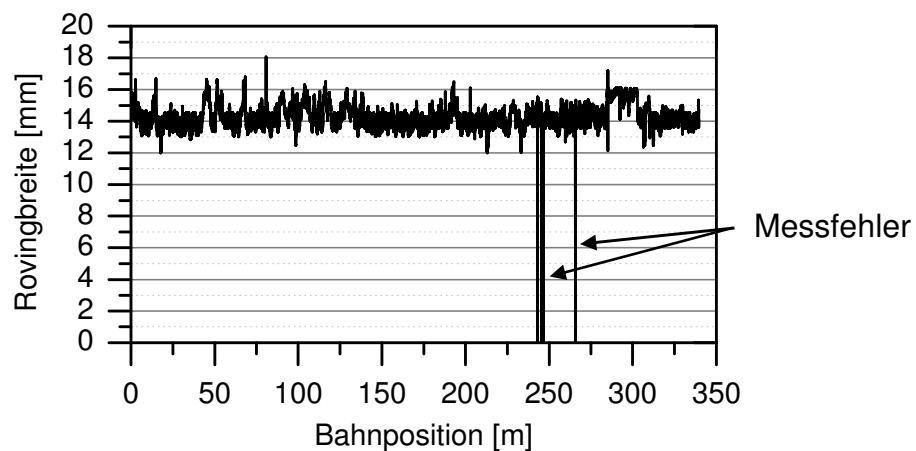


Abbildung 5.1: Rovingbreite nach der Breitenreduktion bzw. vor dem Aufspulen

²⁸ Angaben gemäß Lieferschein von der Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Deutschland

²⁹ Häfner & Krullmann GmbH

In Abbildung 5.2 ist ein Abbild der Oberfläche eines bebinderten Rovings beispielhaft dargestellt. Die Aufnahme wurde mittels eines Computertomographen³⁰ erstellt. Hierbei sind sowohl die Fasern als auch die angeschmolzenen Binderpartikel (Momentive 05311) zu erkennen. Zusätzliche Oberflächenbilder weiterer Materialkonfigurationen sind im Anhang abgebildet.

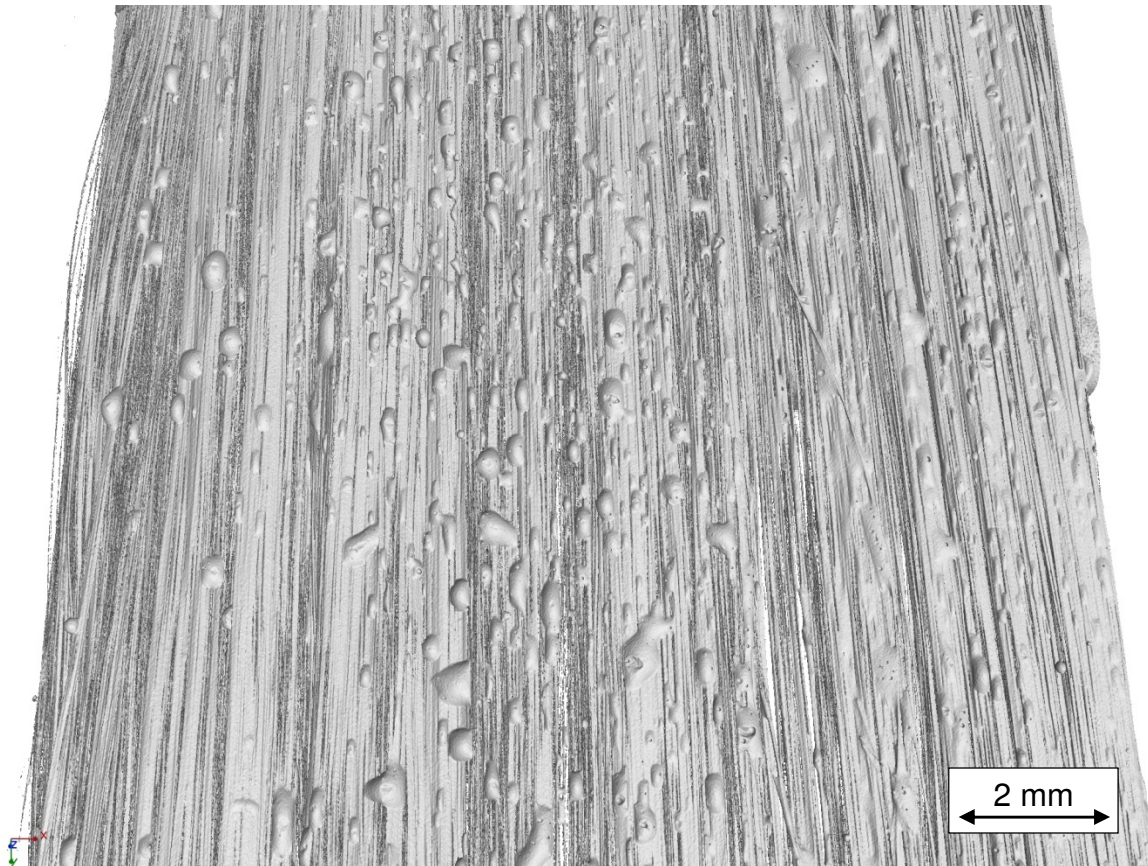


Abbildung 5.2: Oberfläche eines bebinderten Rovings (30-Mo-50-6,66)

Zur Bestimmung der optimalen Ablegeparameter im Ablegeprozess wurden die Ablegeparameter sowohl für das Referenzmaterial (Hightex) als auch für das selbst bebinderte Material (15-XB-50-6,23) variiert und anschließend getestet. Die grundlegenden Funktionsweisen und Komponenten des automatisierten Tapelegens werden in Kapitel 2.3 aufgezeigt. In Abbildung 5.3 ist der für die Versuche verwendete Tapelegekopf Evo 1 der IVW GmbH beim Ablegen von offline bebinderten Rovings dargestellt. Der hergestellte Roving wird auf einer Rovingspule dem TLK zugeführt. Ein Führungssystem mit einer Breite von 13 mm leitet das Material durch den Endeffektor zur Heißgasdüse. Hierbei wird die Materialbreite von durchschnittlich 14,27 mm nochmals reduziert um eine eventuelle Breitenverringerng durch die Materialführung

³⁰ Phoenix X-Ray Nanotom von General Electric

zu kompensieren. Die Wärmeenergie der Heißgasdüse erwärmt den Binderroving und schmilzt die darauf vorhandenen Binderpartikel auf. Der nun erwärmte Binderroving wird durch eine Anpressrolle, aufgrund der Vorschubbewegung des TLK, auf das Werkzeug oder eine bereits abgelegte Preform fixiert. Die Anpressrolle mit einer Breite von 20 mm ist hierbei auf 40 °C temperiert um eine Erwärmung während des Ablegens zu vermeiden und eine Anhaftung der Binderpartikel zu verhindern. In Abhängigkeit des eingesetzten Materials werden die Prozessparameter wie Ablegebreite, Heißgasstrom und Anpressdruck variiert.

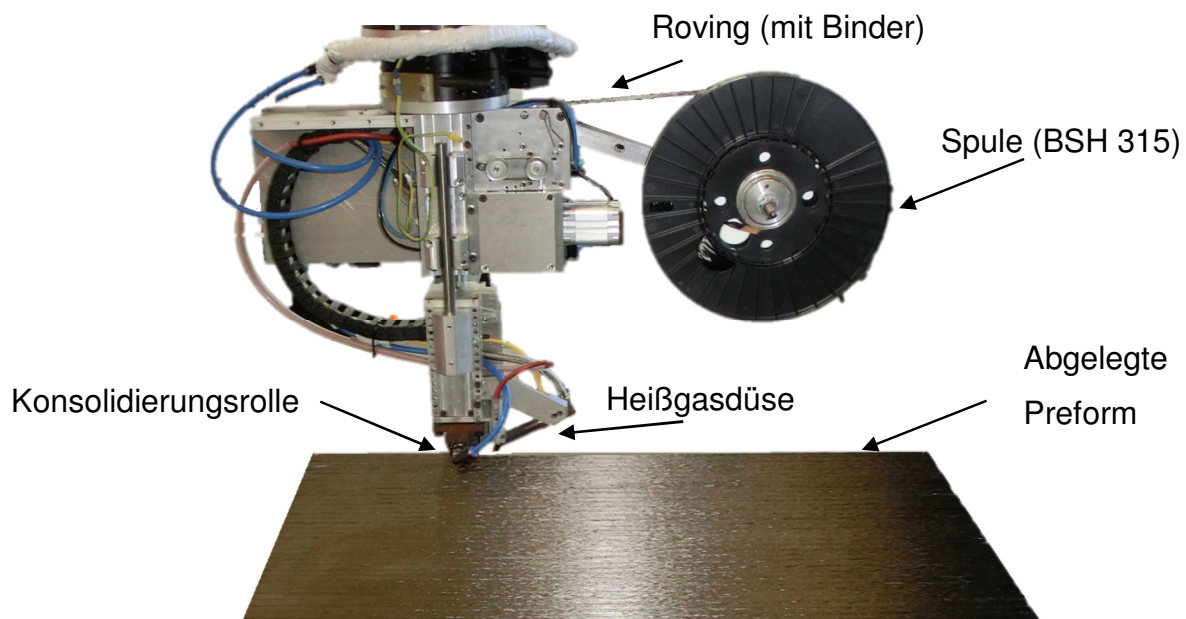


Abbildung 5.3: Ablegen von Binderrovings mit dem IVW Tapelegekopf Evo 1

Aufgrund der Aufheizsystematik beim Ablegen der Binderrovings mittels eines Tapelegesystemes mit Heißgasdüse kann es, aufgrund der Heißgastemperatur von $\approx 1100^\circ\text{C}$ bei 6 NI Brenngasvolumen, zu einer Schädigung des Rovings bzw. der Schlichte / Oberfläche des Rovings kommen. Um eine Schädigung zu verifizieren wurde ein nicht bebindertes Roving durch den Wärmestrom des Binder-Roving-Prüfstandes bei Prozessgeschwindigkeit von $v = 15 \text{ m/min}$ transportiert und anschließend mit dem Tapelegesystem mit der Standardablegegeschwindigkeit von 10 m/min und einer verlangsamten Geschwindigkeit von 1 m/min abgelegt. Zur Analyse des abgelegten Rovings wurden Detailaufnahmen mit hoher Vergrößerung an einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) erstellt. Diese sind in Abbildung 5.4 A-C dargestellt.

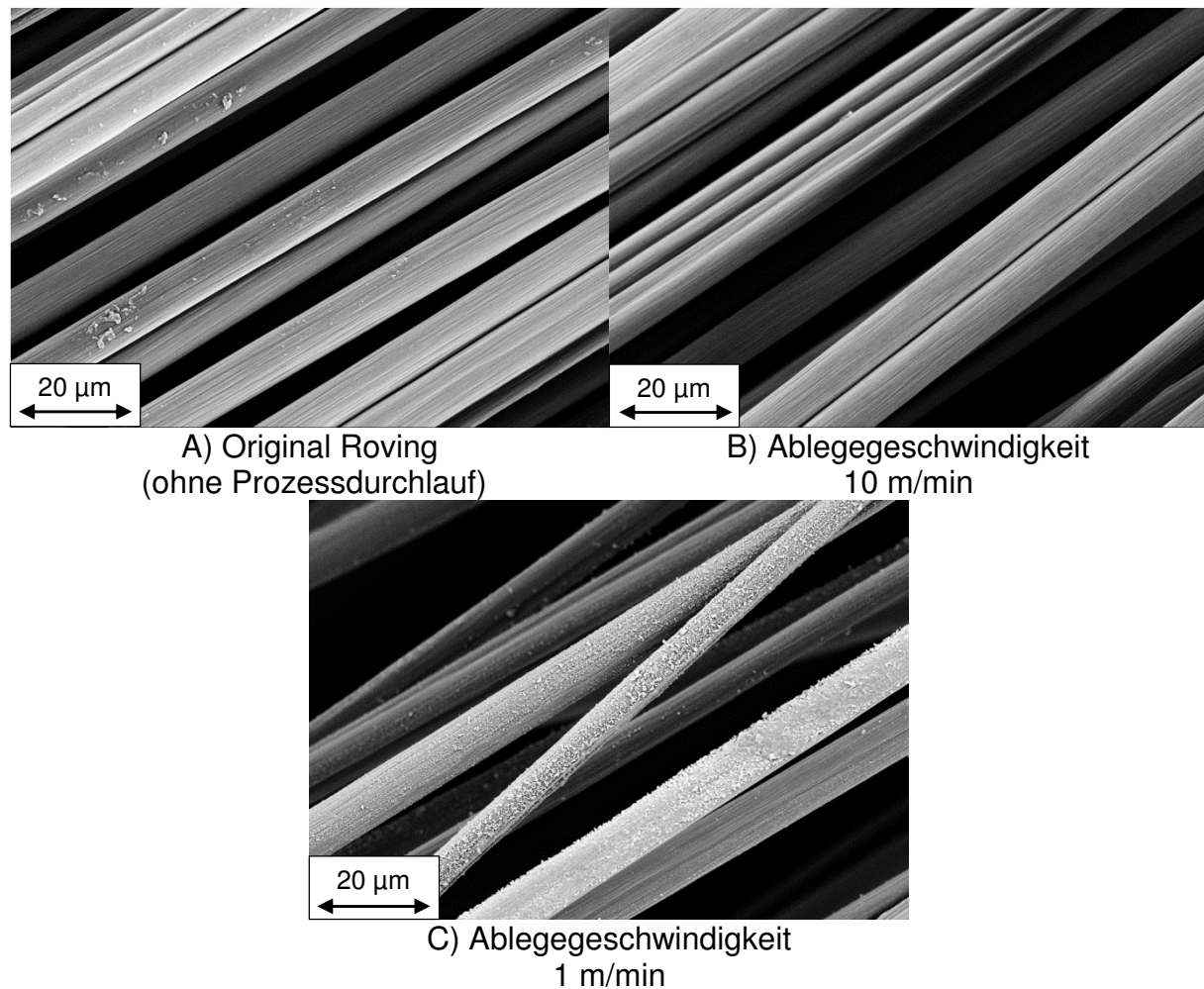


Abbildung 5.4: Roving bei Durchlauf der Prozesskette & Referenz

In Abbildung 5.4 – A ist der original Roving, Entnahme direkt von der Faserspule, abgebildet. Die auf der Kohlenstofffaser während des Herstellungsprozesses aufgebraute Epoxidschichte mit einem Gewichtsanteil von 1 % ist nicht angegriffen. Ein nahezu identischer Zustand der Oberfläche auf den Rovings ist in Abbildung B zu erkennen, nachdem die Rovings mit einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 10 m/min und einem Heißgasvolumenstrom von 6 NI abgelegt wurden. Bei Reduktion der Ablegegeschwindigkeit auf 1 m/min (vgl. Abbildung C) ist eine deutliche Veränderung der Schichte / Oberfläche zu erkennen. Die Epoxid-Schichte ist von dem Heißgasstrom über die Einsatztemperatur erwärmt worden, sodass diese anfängt sich zu zersetzen. Die Aufgabe der Schichte ist es, die Anhaftung der Matrix an der Verstärkungsfaser zu verbessern. Durch das Beschädigen der Schichte bzw. Oberfläche ist dies nicht mehr gewährleistet, wodurch ein Abfall der mechanischen Kennwerte zu erwarten ist. Bei der Herstellung von Preforms nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Herstellungsprozess, mit einer Ablegegeschwindigkeit von 10 m/min, ist keine Schä-

digung der Verstärkungsfasern und somit keine Reduktion der mechanischen Kennwerte zu erwarten. Nach Ausschluss der Beeinträchtigung der Kohlenstofffaser-schichte bzw. -oberfläche durch die Heißgasdüse kann mit der Herstellung der offline bebinderten Rovings am Binder-Roving-Prüfstand (Kapitel 4.2) begonnen werden.

Zur Auswahl der Ablegeparameter wurde die Preformsteifigkeit als Entscheidungsparameter festgelegt. Für die Charakterisierung der Preformsteifigkeit wurden unterschiedliche Analysemethoden im Vorfeld untersucht und bewertet. In der nachfolgenden Tabelle sind die unterschiedliche Preformanalyseverfahren aufgezeigt.

Tabelle 5.2: Bewertung der Preformanalyseverfahren

Verfahren nach Cantilever (DIN 53362)	
+	Einfacher Aufbau, Messequipment vorhanden
-	Nur für Kunststofffolien und textile Halbzeuge
Begründung	Voruntersuchungen ergaben nur eine bedingte Aussagefähigkeit von UD-Prüfkörper aufgrund eines abrupten Versagensmusters im Gegensatz zu Geweben.
Keil-Schältest (horizontale Messung) analog dem „Wedge Peel Test“ der NASA (vertikale Messung) [136]	
+	Einfacher Aufbau, Messequipment vorhanden
-	Messsystem erfasst nur die Kräfte zwischen zwei Lagen
Begründung	Nur Binderpartikel an der Oberfläche eines Rovings (in der Messzone zwischen zwei abgelegten Rovings) werden getestet, eine Steifigkeit der Proben kann nicht abgeleitet werden.
Biegesteifigkeit nach Schlenker (DIN 53864:1978-08)	
+	Messung des Biegesteifigkeit
-	Komplexer Aufbau
Begründung	Messequipment zur Analyse des sehr geringen Kraftverlaufes nicht vorhanden
Biegekraftmessung nach Firma Frank³¹	
+	Messung des Biegesteifigkeit
-	Komplexer Aufbau
Begründung	Messequipment nicht vorhanden
3 Punkt Biegeversuch	

³¹ Firma Frank-PTI GmbH, Weinheim, Deutschland

+	Messung der Biegesteifigkeit, standardisierter Aufbau
-	Universalprüfmaschine muss für geringe Kräfte ausgelegt sein
Begründung	Messequipment nicht vorhanden
T- Schältest [137]	
+	Standardisierter Aufbau
-	Messsystem erfasst nur die Kräfte zwischen zwei Lagen
Begründung	Nur Binderpartikel an der Oberfläche eines Rovings (in der Messzone zwischen zwei abgelegten Rovings) werden getestet, eine Steifigkeit der Proben kann nicht abgeleitet werden.
Dynamisch mechanische Analyse DMA	
+	Standardisierter Aufbau, sehr genaue Analyse der Proben, Temperaturabhängigkeit kann ebenso gemessen werden
-	Probengeometrie beschränkt, Probenvorbereitung mit trockenen Fasern schwierig
Begründung	Geeignete Testmethode zum Vergleich der Biegesteifigkeit mehrerer Materialien.

Zur Charakterisierung der Preforms wird im Rahmen dieser Arbeit eine dynamisch mechanische Analyse³² verwendet. Grund hierfür sind die im Vergleich zu den anderen Verfahren ermittelbaren Genauigkeiten. Diese Methode analysiert das mechanische Verhalten eines Probekörpers unter geringer, periodisch wechselnder Beanspruchung. Das Messsignal wird als Funktion der Temperatur, Zeit und/oder Frequenz aufgezeichnet. Hieraus können sowohl Aussagen über das thermomechanische Verhalten eines Kunststoffes im Glaszustand, im Glasübergangsbereich inkl. der Bestimmung der Glasübergangstemperatur T_g als auch im elastischen Bereich getroffen werden. Die resultierenden Kennwerte der DMA sind:

- Speichermodul E' (elastischer Anteil)
- Verlustmodul E'' (plastischer Anteil)
- Verlustfaktor $\tan(\delta)$ (Verhältnis zwischen Speicher- und Verlustmodul)

Für die Bestimmung der Kennwerte mittels DMA wird der Single Cantilever Modus mit einer Frequenz von 10 Hz, einer Amplitude von 120 μm und einer Temperatur von 25 °C verwendet.

³² DMA Q 800 der Firma Thermal Analysis®

Die eingestellten Ablegeparameter für die Preformherstellung mittels offline hergestellten Binderrovings sind nachfolgend aufgelistet:

- Ablegegeschwindigkeit: 10 m/min
- Anpresskraft der Konsolidierungsrolle: 3 bar Luftdruck \triangleq 285 N³³
- Volumenstrom der Heißgasdüse: 4 NI bzw. 5 NI
- Bahnabstand Referenzmaterial: 3,4 mm
- Bahnabstand selbsthergestellter Binderroving: 13 mm

Die Probengeometrie beträgt dabei 25 mm x 13 mm 1,5 mm. Eine beispielhafte Probe ist in Abbildung 5.5 abgebildet. Aus einer abgelegten UD-Preform mit einer Länge von > 200 mm und einer Breite von 13 mm wurden jeweils 35 mm lange Streifen entnommen, welche an den Enden mit Klebeband fixiert worden sind. Dies dient dem besseren Handling beim Schneiden und beeinflusst die Messergebnisse, aufgrund der Einspannung des Versuchsaufbaus innerhalb der Klebestreifen, nicht.



Abbildung 5.5: DMA Single Cantilever Probe

Die Ablegegeschwindigkeit beim Ablegen wurde im Vorfeld auf 10 m/min festgelegt. Der Anpressdruck wurde von 1 bar – 3 bar und das Gasgemisch der Heißgasdüse von 3 NI – 5 NI variiert. Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigen sowohl das Speichermodul als auch das Verlustmodul der untersuchten Proben. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien ist ein direkter Vergleich der beiden Materialien nur bedingt aussagekräftig. Ausgehend von dieser Tatsache sind die Werte für beide Abbildungen normiert dargestellt. Als Normierungswert wurde jeweils der höchste gemessene Wert innerhalb einer Versuchsreihe angenommen.

³³ Berechnung der realen Kompaktierungskraft ist im Anhang „Berechnung der Flächenpressung unterhalb der Konsolidierungsrolle“ aufgeführt.

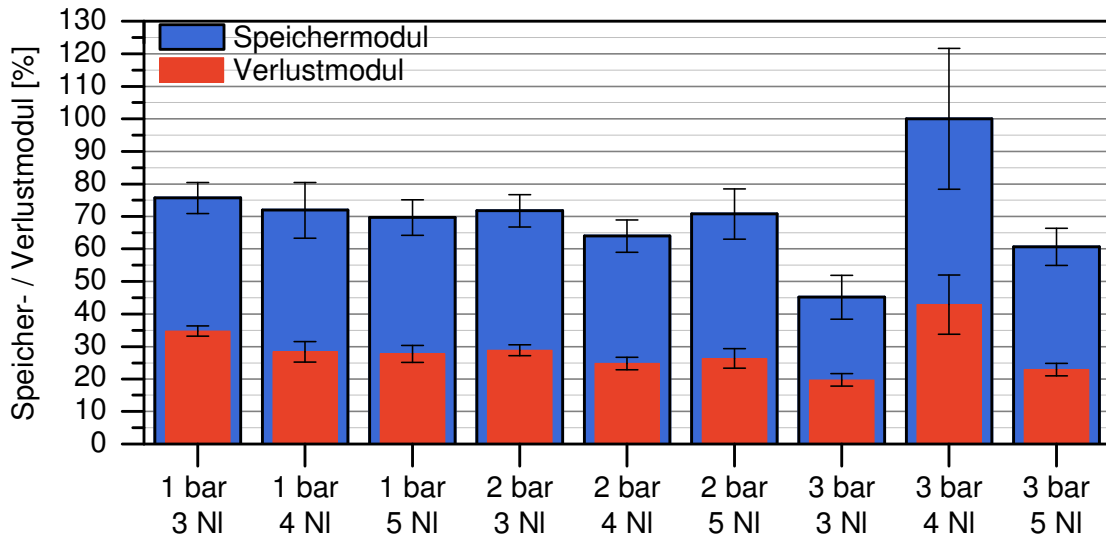


Abbildung 5.6: Analyse des Speicher- und Verlustmoduls für das Referenzmaterial bei Parametervariation im Ablegeprozess

Die Speicher- bzw. Verlustmodule für das untersuchte Referenzmaterial (Ref-Mo-12-2,25) in Abbildung 5.6, mit 1 bar und 2 bar Anpressdruck, sind für alle Gasmengen auf einem ähnlichen Niveau. Für einen Anpressdruck von 3 bar zeigen sich jedoch deutliche Varianzen in Abhängigkeit der Gasmenge. Die Versuchsproben mit den Parametern 3 bar und 4 NI haben ein deutlich höheres Speicher- sowie Verlustmodul.

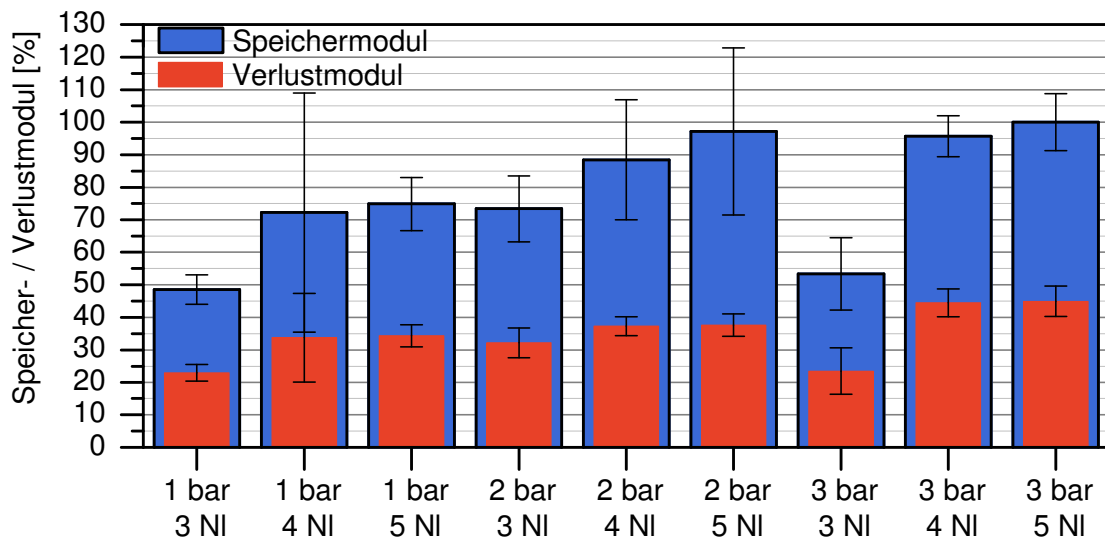


Abbildung 5.7: Analyse des Speicher- und Verlustmoduls (15-XB-50-6,23) bei Parametervariation im Ablegeprozess

Für den offline bebinderten Roving (15-XB-50-6,23) sind die Speicher- und Verlustmodule in Abbildung 5.7 abgebildet. Hierbei ist, im Gegensatz zu dem Referenzmate-

rial, mit zunehmender Wärmeenergie eine Steigerung der Speicher- und Verlustmodule auch bei geringen Anpressdrücken zu erkennen. Diese ergeben sich aus den Prozessparametern, bei denen die jeweils höchsten Speicher- und Verlustmodule gemessen wurden. Die für alle nachfolgenden Versuche fixierten Parameter sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst dargestellt. Hierbei wird der Anpressdruck als auch das Heißgasvolumen für alle Bindergehalte und Bindertypen konstant gehalten um die Aussagefähigkeit rein auf den Binderanteil bzw. Bindertyp zu beschränken und keine prozesseitigen Parametereinflüsse mit zu berücksichtigen.

Tabelle 5.3: Festgelegte Ablegeparameter

	Referenzmaterial Hightex	Binderroving 15-XB-50-6,23
Anpressdruck [bar]	3	3
Heißgasvolumen [NI]	4	5

Bei einem Vergleich beider Bindersysteme (nicht normiert) zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede im Speicher- bzw. im Verlustmodul. Hierbei ist das Speichermodul des Referenzmaterials für die beste Konfiguration um den Faktor 8 höher, als bei dem selbst offline bebinderten Roving. Die höheren Werte beim Referenzmaterial sind zum einen auf das eingesetzte Bindermaterial von Momentive und zum anderen auch auf das Rovingausgangsmaterial zurückzuführen. Letzteres hat im Vergleich zu dem offline bebinderten Roving nur eine 12k Faser anstelle einer 50k Kohlenstofffaser. Die Ablegebreite ist somit geringer und das Material wird 4,17 mal so oft erwärmt und mit der Konsolidierungsrolle kompaktiert. In Abbildung 5.8 ist dieser Zusammenhang nochmals graphisch dargestellt.

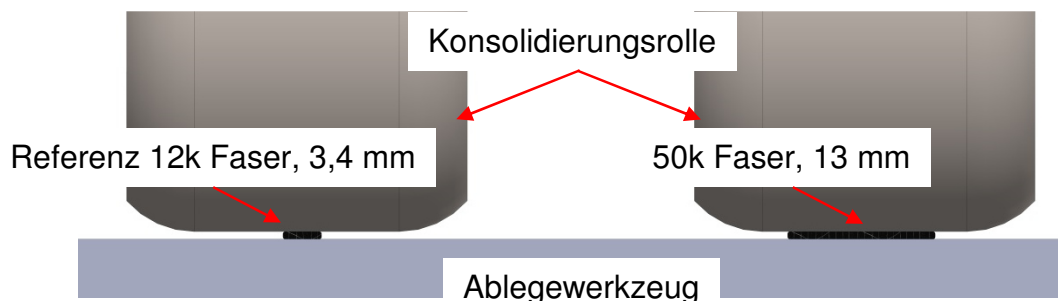


Abbildung 5.8: Querschnittsvergleich der 12k und der 50k Faser

Die Parameter für das Speicher- / Verlustmodul müssen in Abhängigkeit des jeweiligen Verarbeitungsprozesses, der Transporttechnologie durch z. B. Vakuum- oder Nadelgreifer, des Lagenaufbaus und der verwendeten Faser festgelegt werden. Die

hier ermittelten Parameter sind nur als Richtwerte für die Preformstabilität geeignet. Für die Durchführung der Versuchsreihen mit einer Variation des Bindergehaltes bzw. des Bindertyps sind unterschiedliche Preformgeometrien als auch Lagenanordnungen notwendig. Die Plattenabmessungen sowie der Lagenaufbau ist in nachfolgender Tabelle 5.4 aufgeführt:

Tabelle 5.4: Geometrie, Faserorientierung und Lagenanzahl der Versuchspreforms

	Länge [mm]	Breite [mm]	Faserorientierung	Lagenanzahl gesamt [Stk.]
Geometrie I	900	900	(0/90) ⁴	8
Geometrie II	700	350	(0/90) ⁴	8
Geometrie III	250	100	0°	12

Aus Geometrie I werden vier Proben für Kompaktierungstests (rund \varnothing 100 mm) und eine 260 mm x 260 mm Fläche für eine Infiltrierung und anschließende mechanischen Charakterisierung entnommen. Die Proben wurden mittels eines CNC Cutters³⁴ zugeschnitten. Drei Proben für die Bestimmung der Dickenpermeabilität mit einer elliptischen Geometrie mit 156 mm x 196 mm Achsenlänge, als auch weitere vier Kompaktierungsproben (rund \varnothing 50 mm) sind aus Geometrie II gestanzt, welche einen identischen Lagenaufbau wie Geometrie I besitzen. Geometrie III wurde ebenso wie ein Teilzuschnitt aus Geometrie I zuerst infiltriert und anschließend zehn Proben für die Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit entnommen.

5.2 Analyse der Binderpreforms in Abhängigkeit des Bindergehaltes / -typs

Die entwickelten Komponenten zur Herstellung der bebinderten Rovings wie auch das verwendete Ablegesystem wurden in Kapitel 4 und Kapitel 5 beschrieben. In Kapitel 5.1 wurden unterschiedliche, bebinderte Rovings offline hergestellt und zu Preforms weiterverarbeitet. Innerhalb dieses Kapitels werden die hergestellten Preforms sowohl hinsichtlich ihrer Kompaktierung als auch der Infiltrierbarkeit untersucht. Die Kompaktierungsfähigkeit ist eine Kenngröße für die Kompaktheit einer Probe und für die Auslegung eines Injektionswerkzeuges von hohem Interesse. Die Infiltrierbarkeit der trockenen Preforms werden durch Permeabilitätsversuche überprüft.

³⁴ PROCUT L 5001LV von Assyst Bullmer

5.2.1 Analyse der trockenen Preform / Kompaktierungstests

Innerhalb der LCM-Prozesskette wird die Preform während des Imprägnierungsprozesses auf den finalen Faservolumengehalt kompaktiert. Das Kompaktierungsverhalten ist sowohl für die Bestimmung der Schließkräfte des Werkzeuges als auch für simulative Abbildungen notwendig. So zeigen z. B. Kompaktierungstests an Geweben, aufgrund der Ondulation der Fasern, ein gewisses Nestingverhalten [138], welches ein Ineinanderlegen von Fasern beschreibt und bei der die Kompaktierkraft bei mehrmaliger Wiederholung nachlässt.

Für die durchgeführten Versuche wurden zwei unterschiedliche runde Geometrien (\varnothing 100 mm & \varnothing 50 mm) als Versuchsproben aus abgelegten Preforms (Geometrie I & II mit acht Lagen $0^\circ/90^\circ$) entnommen. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei parallel schließenden Stahlscheiben, die in einer Universalprüfmaschine³⁵ eingespannt werden. Hierbei wird sowohl der Traversenweg der Maschine (Kavitätshöhe zwischen den beiden Scheiben) als auch die resultierende Kraft mittels Kraftmessdose (100 kN) aufgezeichnet. Die verwendeten Versuchsparameter sind nachfolgend aufgelistet:

- | | |
|---|----------|
| - Vorkraft (erste Kompaktierung) | 5 N |
| - Vorkraft (ab der zweiten Kompaktierung) | 20 N |
| - Maximalkraft | 20.000 N |
| - Prüfgeschwindigkeit | 1 mm/min |
| - Kompaktierungswiederholungen | 5 Stück |
| - Anzahl der Messproben (je Geometrie und Material) | 4 Stück |

Der Versuchsaufbau der Kompaktierungstests ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Um Messfehler durch die Kompaktierung des Versuchsaufbaues zu vermeiden wurde zur Ermittlung der reinen Kompaktierung der Versuchsprobe zu Beginn der Versuchsreihe eine Leerkurve der Verformung des Versuchsaufbaues durchgeführt. Diese wurde in allen nachfolgend durchgeführten Versuchsreihen von der ermittelten Kurve subtrahiert. Die Analyse der Leerkurve ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

³⁵ Zwick GmbH & Co. KG: Typ Zwick 1474

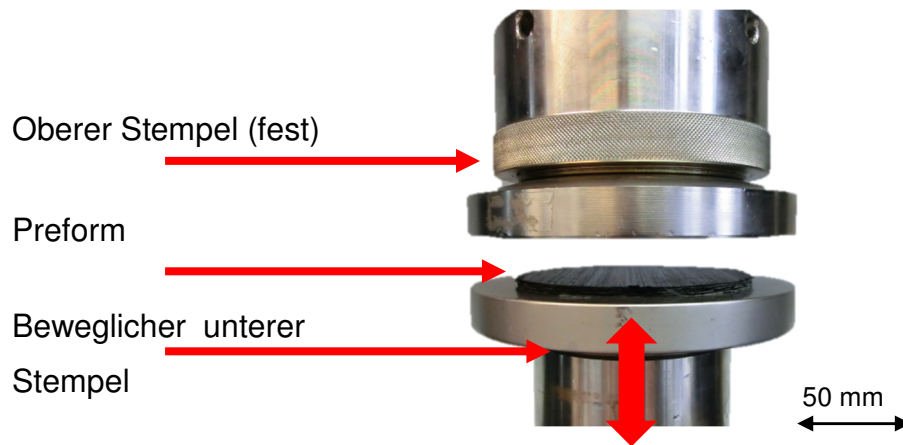


Abbildung 5.9: Runder Versuchsaufbau zur Kompaktierungsmessung von Preforms

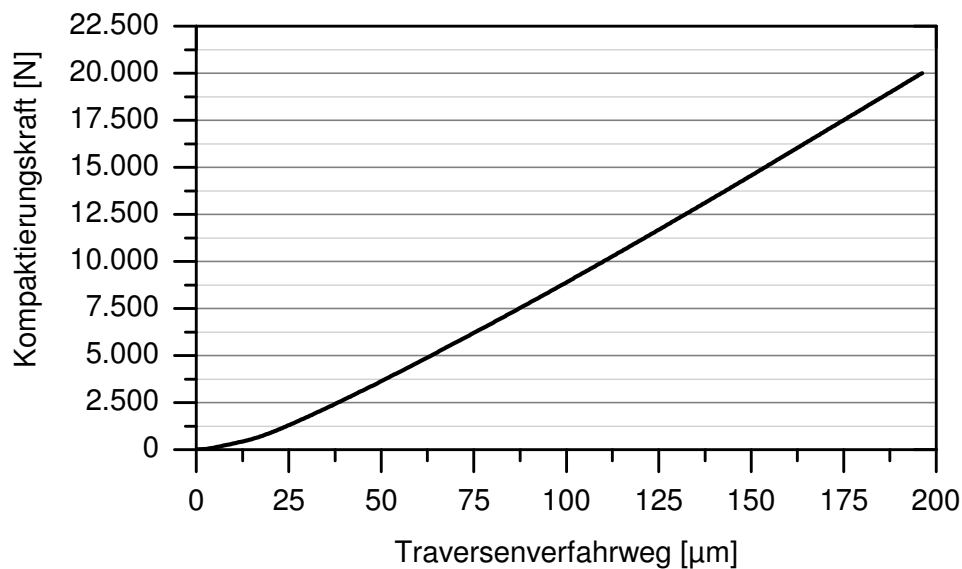


Abbildung 5.10: Kraft- / Dehnungskurve für das Kompaktierungswerkzeug (Leerkurve)

Die Messung startet bei einer Vorkompaktierungskraft von 5 N. Während der Messung wird die Kompaktierungskraft auf die Maximalkraft von 20.000 N erhöht ($v = 1 \text{ mm/min}$) und für eine Minute gehalten, bevor der minimale Abstand der Anpressscheiben wieder vergrößert und somit die Anpresskraft reduziert wird. Die Vorkraft für den zweiten Zyklus wird auf 20 N angehoben um einen stetigen Kraftverlauf während der Messung zu gewährleisten. Dieser Kompaktierungs- / Dekompaktierungsvorgang wird insgesamt fünf Mal nacheinander durchgeführt. Ein exemplarischer Verlauf eines Kompaktierungsversuches ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Hierbei wird der maximal mögliche Kompaktierungsweg und somit der Faservo-

lumengehalt, in Abhängigkeit der Kompaktierungsanzahl größer (siehe vergrößerter Abschnitt in Abbildung 5.11 rechte Seite).

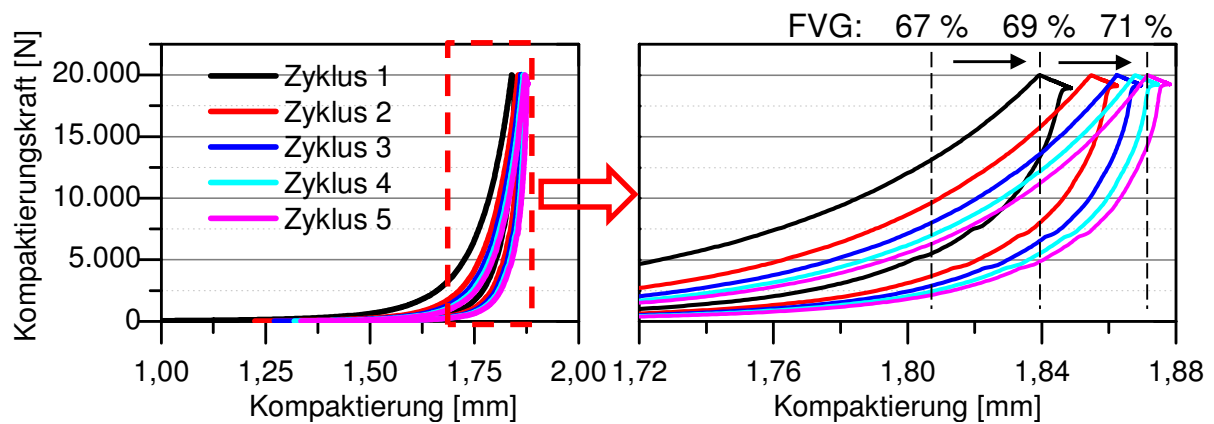


Abbildung 5.11: Kompaktierungsverlauf ($\varnothing 100$ mm 30-XB-50-7,06-Probe4)

In Abbildung 5.12 ist die Kompaktierungskraft für einen Faservolumengehalt von 60 % für alle untersuchten Parametervariationen (Bindergehalt, -typ, Referenzprodukt) in Abhängigkeit der Kompaktierungsanzahl aufgetragen. Die Kompaktierungskraft wird je Kompaktierungsanzahl geringer, was aus einer Kompaktierung der Preform resultiert. Bei der Analyse der Kompaktierungskraft innerhalb des ersten Zyklus ist eine Steigerung der Kompaktierungskraft in Abhängigkeit des Bindergehaltes sichtbar. Dies resultiert aus der Tatsache, dass der Bindergehalt und damit das Flächengewicht der Versuchssprobe steigt, die Faseranzahl jedoch identisch bleibt. Je mehr Binderpartikel somit in einer Preform enthalten sind, desto höher ist die erforderliche Kompaktierungskraft um auf einen definierten Faservolumengehalt zu kommen.

Das Verhältnis der Kompaktierungskraft der verschiedenen Versuchsmaterialien zueinander ist für jede Kompaktierungsanzahl nahezu identisch. Nur die Versuchsreihe (06-XB-50-4,07) weist eine sehr geringe Kompaktierungskraft auf. Es ist außerdem kein Einfluss der verschiedenen Binder, Huntsman XB 3366 oder Momentive Epikote 05311 auf die Kompaktierungskraft zu erkennen. Im direkten Vergleich der Proben 06-XB-50-4,07 und Ref-Mo-12-2,25 zeigt die Referenzprobe mit einer 12K Kohlenstofffaser und 2,25 Gew.-% Binderanteil eine deutlich höhere notwendige Kompaktierungskraft für das Erreichen des gewünschten Faservolumengehaltes als mit den vorwiegend verwendeten 50k Fasern und 4,07 Gew.-% Binderanteil.

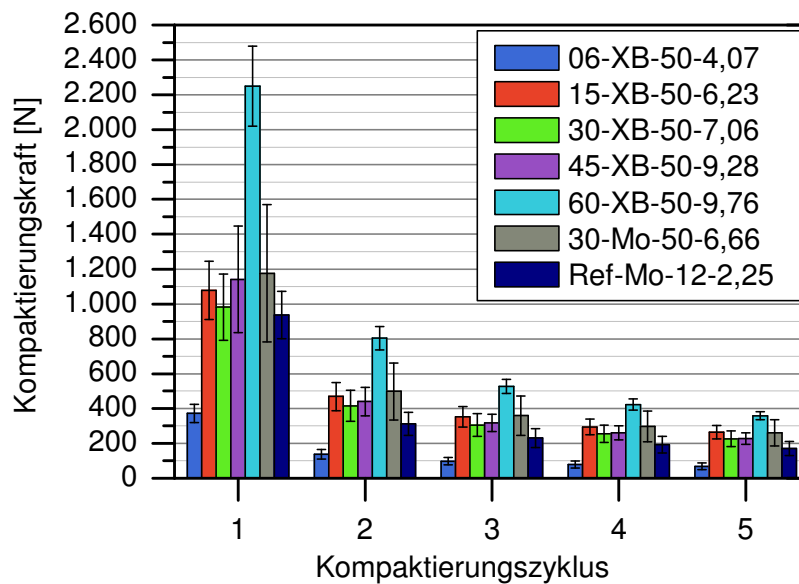


Abbildung 5.12: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Kompaktierungsanzahl für einen definierten FVG von 60 %

Dies liegt zum einen an dem verringerten Querschnitt des 12k Rovings, wodurch bei Ablage ein kompakteres Laminat in der Ebene entsteht und zum anderen an der daraus resultierenden mehrfachen Kompaktierung der Fasern aufgrund der reduzierten Ablegebreite. Dies erhöht die Preformkompaktheit durch mehrmaliges Aufschmelzen und Kompaktieren des Bindermaterials zusätzlich.

5.2.2 Preforminfiltrationsversuche

Die mechanische Analyse von trockenen Preforms, wie sie in Kapitel 5.2.1 durchgeführt wurde, ist nur ein Aspekt der Preformcharakterisierung und dient der Handhabung der Preform sowie der Werkzeugauslegung. Für die Herstellung von FKV Bauteilen im LCM Prozess ist jedoch die Preforminfiltration von größerer Bedeutung. Mit Hilfe der Kennzahlen der Permeabilität (K_1 , K_2 und K_3) ist es möglich den Infiltrationsprozess für unterschiedliche LCM-Prozesstechnologien zu simulieren, womit z. B. die Imprägnierzeit, die Imprägnierungsgüte oder aber auch der Fließfrontverlauf darstellbar ist. Die Infiltration der Preform mit dem ausgewählten Matrixsystem kann durch Permeabilitätsversuche (vgl. Kapitel 2.4) analysiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden gesättigte transversale Permeabilitätsversuche durchgeführt. Für beide Analysemethoden wurde eine acht-lagige Preform mit einem $(0/90)^4$ Lagenaufbau hergestellt. Zur Permeabilitätsmessung kommt als Testfluid Rapsöl zum Einsatz, dessen Einsatz Rieber [139] für Permeabilitätsmessungen für Verbundwerkstoffe überprüft hat. Rapsöl hat dabei eine ähnliche Viskosität (0,07 Pa s bei 20 °C) und

Oberflächenspannung wie ein Epoxid-Injektionsharz, jedoch mit dem Vorteil, dass es nicht aushärtet. Die Abhängigkeit der Viskosität des Messfluides von der Temperatur wird durch Formel (5.1) aufgezeigt.

$$\eta(T) = -0,002 T^3 + 0,262 T^2 - 11,508 T + 214,709 \quad (5.1)$$

Durch das entwickelte Messverfahren der gesättigten hydrodynamischen Kompaktierung nach Becker et. al [97, 140, 141] ist keine Erfassung des Harzfortschrittes / Fließfront während der Messung der Verstärkungsfasern durch Sensoren [142-144] notwendig. Der zur Berechnung benötigte Druckgradient $\vec{\nabla}p$ wird vor als auch nach dem Durchströmen des Verstärkungstextiles direkt am Fluidstrom gemessen. Die Permeabilität wird nach dem Gesetz von Darcy (Kapitel 2.4) unter Berücksichtigung des Druckgradienten $\vec{\nabla}p$ berechnet (5.2).

$$v = -\frac{K}{\eta} \times \vec{\nabla}p \quad (5.2)$$

In Abbildung 5.13 ist die verwendete Messzelle im Schnitt dargestellt. Hierbei ist der Prüfkörper, also die Preform, zwischen zwei Fluid-Homogenisierungsscheiben (Lochscheiben) eingeklemmt. Diese ermöglichen bei einem mittigen Anguss einen konstanten Fluidfluss durch die gesamte Preform. Die untere Lochscheibe ist beweglich auf einem Federsystem gelagert, um ein dauerhaftes Anliegen an der Preform zu gewährleisten. Der Faservolumengehalt wird über das Flächengewicht der Probe und der Kavitätshöhe eingestellt. Die Kavitätshöhe wird durch Passscheiben an der Außenseite des Deckels definiert. Die Messung der Dickenpermeabilität startet nachdem die trockene Preform mit Messfluid gesättigt ist und ein konstanter und luftfreier Fluidstrom die Permeabilitätszelle verlässt. [97]

Durch Variation des Fluiddruckes zwischen 1 und 6 bar wird der Faservolumengehalt durch ein Kompaktieren der Preform erhöht. In Abhängigkeit der Nachgiebigkeit, also der Kompaktierungsmöglichkeit der Preform (Abbildung 5.12), variiert dieser Zusammenhang. In Abbildung 5.14 sind Messergebnisse der untersuchten Materialkonfigurationen (Tabelle 5.1) in Abhängigkeit des Differenzdruckes logarithmisch aufgetragen. Die höchste Permeabilität der selbsthergestellten Materialien hat die Probe 30-Mo-50-6,66, gefolgt von 30-XB-50-7,06 und 60-XB-50-9,76. Die Versuchsmaterialien 06-XB-50-4,07, 15-XB-50-6,23 und 45-XB-50-9,28 liegen nahezu gleichauf.

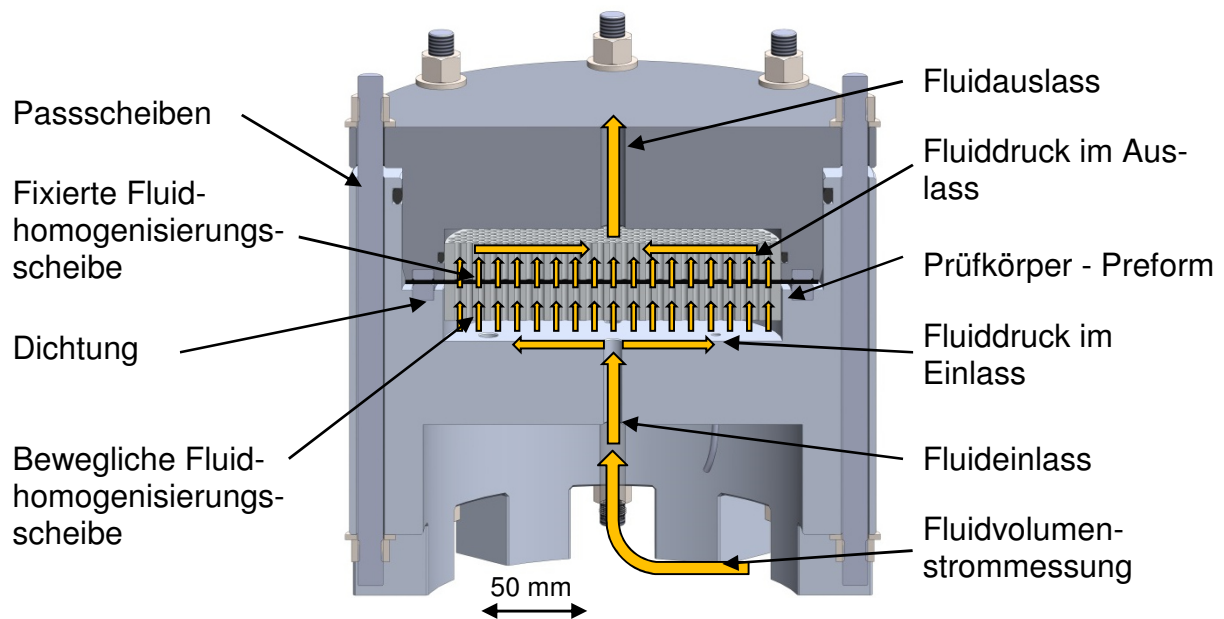


Abbildung 5.13: Gesättigte Permeabilitätsmesszelle für die Bestimmung der Dickenpermeabilität [97]

Die Versuchsreihe mit dem Binder von Momentive zeigt hierbei die höchste Permeabilität. Unter Berücksichtigung der Referenzprobe (Ref-Mo-12-2,25), welche parallelverschoben zur 30-Mo-50-6,66 bei einer Permeabilität von $\approx 2,1E-14$ startet, wird der Einfluss des Bindermaterials nochmals verdeutlicht. Die Versuchsreihe mit dem Bindermaterial XB 3366 von Huntsman liegt unabhängig des Bindergehaltes (4,07 - 9,76 Gew.-%) unterhalb der beiden mit Momentive bebinderten Versuchsreihen. Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass das eingesetzte Bindermaterial einen Einfluss auf die Permeabilität und somit auf die Imprägnierbarkeit hat. Hierbei ist außerdem zu erkennen, dass sich eine Preform bestehend aus einem 12k Roving einfacher infiltrieren lässt, als mit einem 50k Roving, wobei auch der Unterschied des Bindergehaltes des Referenzmaterials mit $2,25 \pm 0,75$ Gew.-% und $6,66 \pm 0,5$ Gew.-% für 30-Mo-50-6,66 nicht vernachlässigt werden darf. Die Permeabilitätsveränderungen sind im Vergleich zu Geweben bzw. Gelelen mindestens eine Dekade niedriger. Die Partikelgrößenverteilung der beiden Bisphenol-A basierten Bindersysteme (vgl. hierzu Abbildung 3.2) zeigen deutlich den Größenunterschied. Die kleineren Binderpartikel des eingesetzten Momentive 05311 Bindermaterials im Vergleich zu denen des Huntsman XB 3366 sind somit verantwortlich für den Permeabilitätsunterschied.

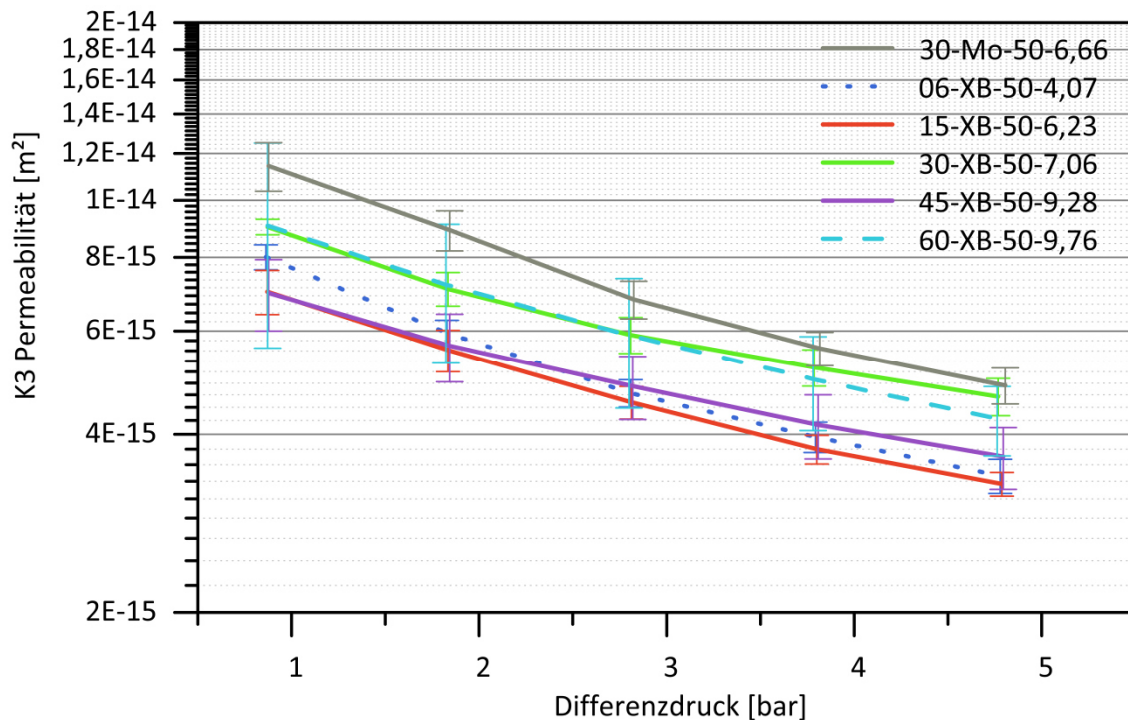


Abbildung 5.14: K3 Permeabilität in Abhängigkeit des Differenzdruckes und des Bindergehaltes bzw. des Bindertypes

In Abbildung 5.15 ist die Permeabilität der Preforms über den Faservolumengehalt aufgetragen. Hierbei ist eine Abhängigkeit des Materialverhaltens zum Bindergehalt zu erkennen. Die hohe Varianz der Faservolumenhalte liegt zum einen in der grundsätzlichen Annahme, dass die Binderpartikel mit zu dem Faservolumengehalt gezählt werden, zum anderen an der verwendeten Messzelle. In Abhängigkeit des Flächengewichtes kann die Kavitätshöhe der Messzelle, analog der „2D-Capa-Perm“ Messzelle, eingestellt werden. Hierbei ist jedoch die Auswahl verfügbarer Abstandhalter begrenzt. Die Abstufung kann bis zu einer Dicke von 2,5 mm fertigungsbedingt nur in 0,5 mm Schritten erfolgen. Zielvorgabe war ein Faservolumengehalt von 50 bis 55 %, welcher bedingt durch die Rahmenbedingungen der Abstufungen real bei einem FVG von 51,5 bis 55,8 % liegt. Je nach Bindergehalt und Bindermaterial sind charakteristische Kurvenverläufe ersichtlich.

Sowohl die Versuchsreihe 30-Mo-50-6,66 als auch alle Bindergehalte oberhalb von 6,23 Gew.-% weisen eine geringere Steigerung des FVG in Abhängigkeit des Differenzdruckes auf als diejenigen mit einem geringeren Bindergehalt. Die Probe 30-Mo-50-6,66 hat nur 0,42 Gew.-% mehr Binderanteil als 15-XB-50-6,23 und zeigt jedoch ebenso nur eine kleine Änderung des FVG.

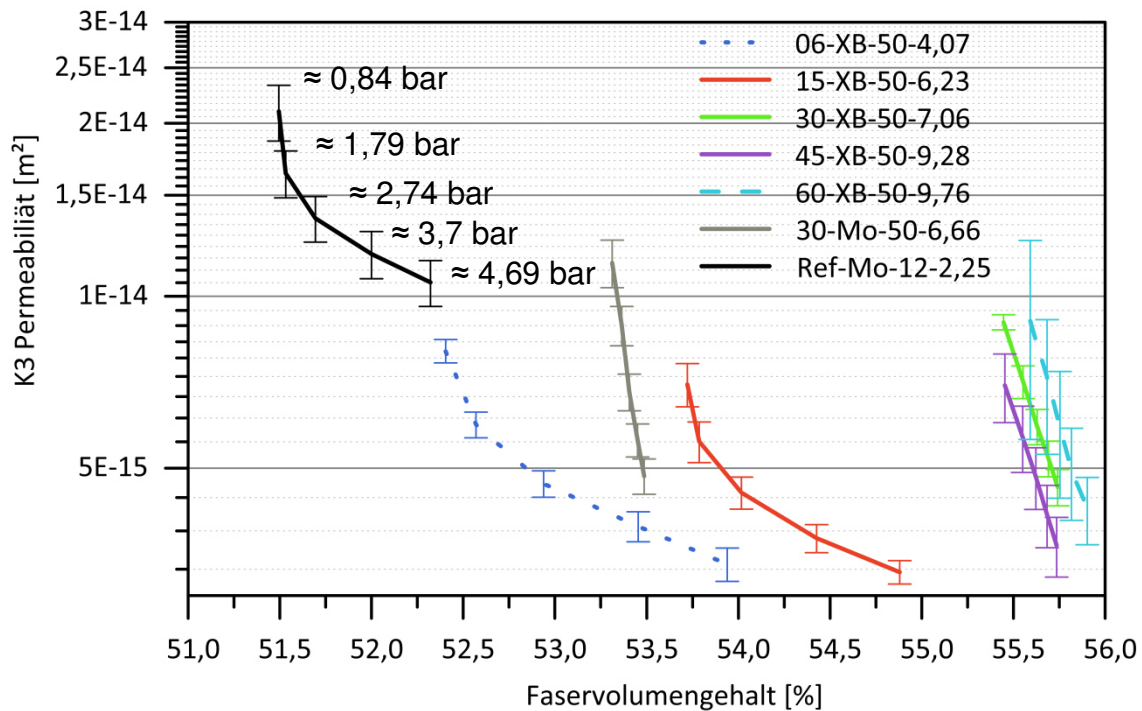


Abbildung 5.15: K3 Permeabilität in Abhängigkeit des FVG und des Bindergehaltes bzw. des Bindertypes

Aufgrund der nur geringen Steigerung des Bindergehaltes ist eine Kombination aus Bindergehalt und Bindertyp naheliegend für die Verfestigung der Preform. Tabelle 5.5 stellt die prozentuale Steigerung des FVG innerhalb einer Permeabilitätsmessung dar.

Tabelle 5.5: Preformkompaktierung während der Permeabilitätsmessung

Probenbezeichnung	Anfangsfaservolumengehalt [%]	Prozentuale Steigerung anfangs- zu finalem FVG [%]
06-XB-50-4,07	52,40	2,93
15-XB-50-6,23	53,72	2,16
30-XB-50-7,06	55,44	0,53
45-XB-50-9,28	55,45	0,51
60-XB-50-9,76	55,59	0,56
30-Mo-50-6,66	53,31	0,33
Ref-Mo-12-2,25	51,49	1,61

Um dieses Verhalten besser verstehen zu können, ist in Abbildung 5.16 die Kompaktierungskraft in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes aufgetragen, wobei die Messung analog der Kompaktierungstests aus Kapitel 5.2.1 erfolgte. Im Gegensatz

zu Abbildung 5.15 ist hierbei die Kompaktierungskraft (erstmaliges Kompaktieren) der Preform in Abhängigkeit des FVG aufgetragen, sodass alle Versuchsproben über den Faservolumengehalt miteinander verglichen werden können. Die kleinste Kompaktierungskraft ist bei 06-XB-50-4,07, die maximale bei 60-XB-50-9,76 zu verzeichnen. Das Referenzmaterial (Ref-Mo-12-2,25) hat die zweitniedrigste Kompaktierungskraft unabhängig des FVGs. Die Reihenfolge der restlichen Proben bleibt über den FVG inkl. Binder identisch, bis auf die Versuchsserie 30-Mo-50-6,66 mit Momentive Epikote 05311 Binder. Innerhalb dieser Serie steigt der Kompaktierungsdruck ab 56 % stärker an als bei den Proben mit dem Huntsman Bindersystem.

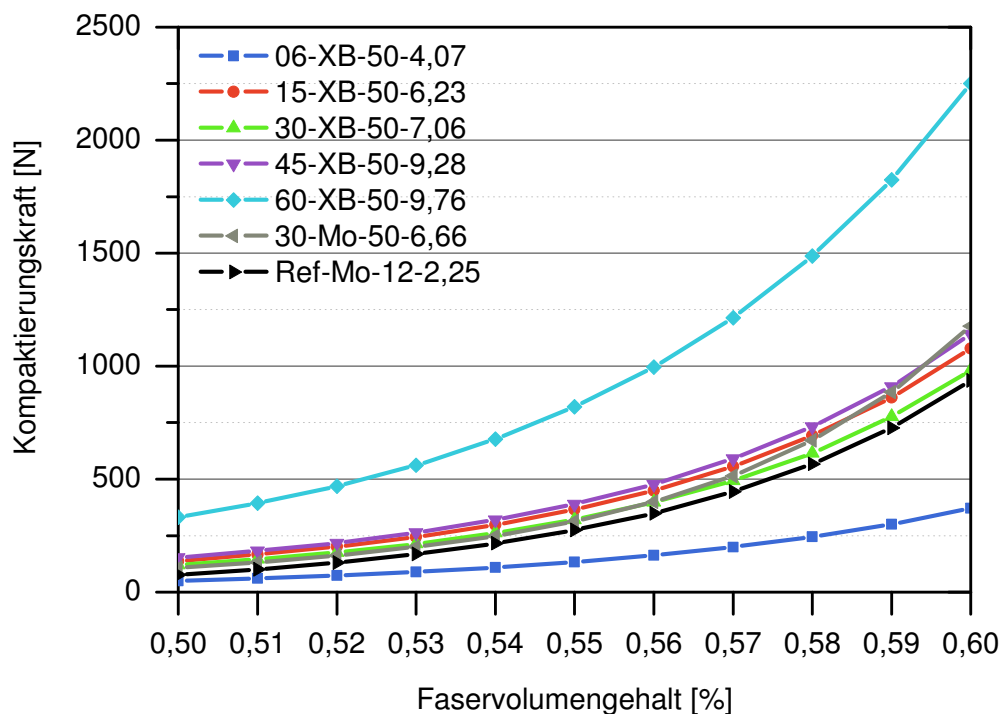


Abbildung 5.16: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes

5.2.3 Bestimmung der Verbundwerkstoffeigenschaften

Für die Bestimmung der Verbundwerkstoffeigenschaften in Abhängigkeit des Bindergehaltes bzw. des Bindertypes ist eine Infiltration der hergestellten Preforms erforderlich. Die Infiltration erfolgt mit der in Kapitel 3.4 dargestellten Matrix von Momentive vom Typ RIMR 935 und RIMH 936. Als Herstellungsmethode wurde das VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion) Verfahren verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Eine Besonderheit gegenüber Standardinfusionsverfahren ist der beidseitige Einsatz von Abreißgeweben, wobei die beiden unteren Lagen getrennt von der oberen Lage abgesaugt werden. Die Versuchsanordnung erlaubt es

auch eine Preform mit niedriger Permeabilität mittels einer Vakuuminfusion zu infiltrieren.

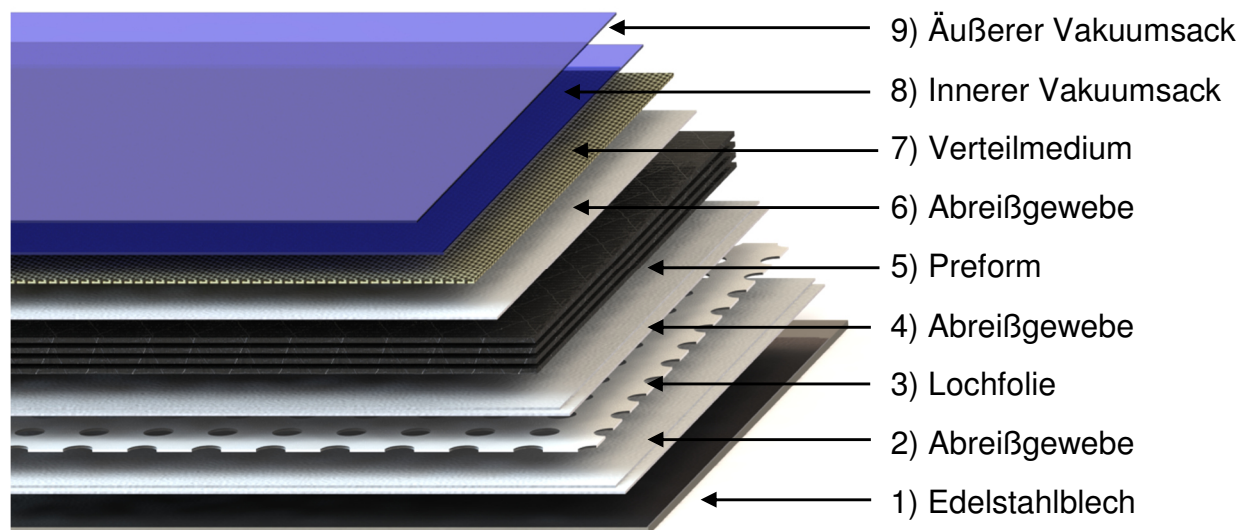


Abbildung 5.17: Schematischer Vakuuminfusionsaufbau

In Tabelle 5.6 sind die verwendeten Materialien des Lagenaufbaues (siehe Abbildung 5.17), von unten nach oben, detailliert beschrieben.

Tabelle 5.6: Aufbau der Vakuuminfusion

Lage	Bezeichnung	Hersteller / Lieferant
1) Edelstahlblech (3 mm)		
2) Abreißgewebe (2 Lagen)	Peelex 96	Flugzeug - Union Süd GmbH
3) Lochfolie	Trennfilm A5000P	Richmond
4) Abreißgewebe (2 Lagen)	Peelex 96	Flugzeug - Union Süd GmbH
5) Lagenaufbau / Preform		
6) Abreißgewebe (1 L) / w	Peelex 96	Flugzeug - Union Süd GmbH
7) Verteilmedium	Fließmedia (15063)	Gustav Gerster GmbH & Co. KG
8) Innerer Vakuumsack	Ipplon® DP1000	Airtech Europe Sarl
9) Äußerer Vakuumsack	Ipplon® DP1000	Airtech Europe Sarl

Nach der Fertigstellung des Vakuumaufbaues wird sowohl im inneren als auch im äußeren Vakuumsack die Luft evakuiert. Hierbei beträgt das Vakuum im äußeren Vakuumsack $< 0,1$ mbar, im inneren Vakuumsack wird das Vakuum auf 5 mbar geregelt und konstant gehalten. Das Vakuum liegt vor der Infusion für mindestens

60 min an, sodass in der Preform gespeichertes Wasser aus der Luftfeuchtigkeit entfernt werden kann. Die Preform wird hierfür zusätzlich auf 40 °C erwärmt. Die Infusion startet durch Öffnen der Harzinfusionsleitung. Die Injektionsdauer liegt bei allen Versuchen < 10 min. Der innere Vakuumaufbau wird nach vollständigem Durchfluss der Preform mit der Matrix abgeklemmt und die Aushärtung beginnt. Der Aushärtezyklus ist an das Datenblatt der Matrix angelehnt. 180 Minuten nach dem Infusionsende wird der Vakuumaufbau auf 70 °C erwärmt. Dies dient zur beschleunigten Aushärtung der Matrix und zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Nach einer Haltezeit von ca. drei Stunden wird die Temperierung gestoppt und langsam abgekühlt. Die Entformung findet bei Raumtemperatur > 12 Stunden nach der Infusion statt. In Abbildung 5.18 ist exemplarisch ein Temperaturverlauf einer Vakuuminfusion inklusive der Aushärtungsphase aufgezeigt.

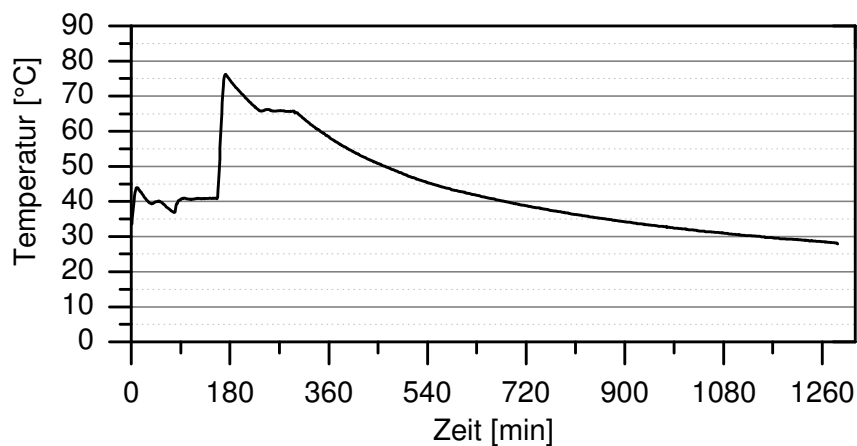


Abbildung 5.18: Temperaturverlauf einer Vakuuminfusion

Für die Ermittlung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (Kapitel 5.2.3.1) als auch der Bestimmung der Biegeeigenschaft (Kapitel 5.2.3.2) wurden Preforms mit unterschiedlichem Bindergehalt sowie mit unterschiedlichen Bindermaterialien hergestellt. Schliffbilder der hergestellten UD-Proben für die ILSS Versuche sind im Anhang abgebildet. Der Einfluss der Bindermenge, des Bindermaterials als auch der eingesetzten Fasern (12k vs. 50k) sind zu erkennen.

5.2.3.1 Versuche zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS)

Die Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS) wurde nach der Norm: DIN EN 2563 „Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit für unidirektionale Laminate aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen“ ermittelt.

Hierfür wurden jeweils zehn Prüfkörper aus den in Kapitel 5.1 beschriebenen und anschließend infiltrierten unidirektionalen Prüfplatten hergestellt. Um Unebenheiten der UD-Prüfplatten, welche während des Vakuum Infiltrationsprozess entstanden sind, zu reduzieren, wurde die Dicke der Prüfkörper zuerst maschinell mittels eines Fräsmaschine mit HM-Fräser bearbeitet, und anschließend mit Schleifpapier der Körnung 600 geschliffen. Abbildung 5.19 zeigt die Unebenheit der Platte, welche mit einem Weißlichtprofilometer³⁶ aufgenommen wurde.

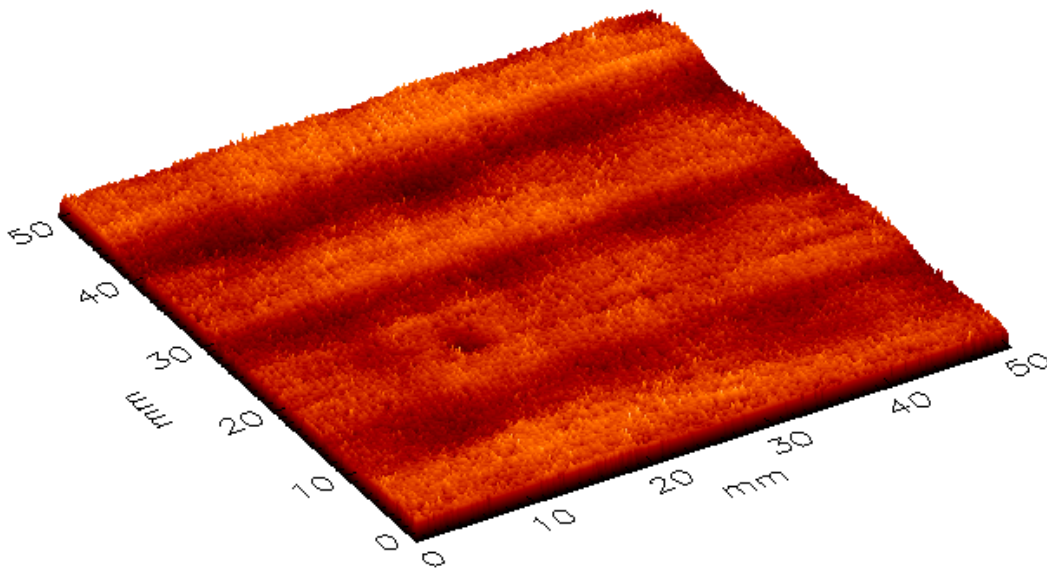


Abbildung 5.19: Unebenheit einer infiltrierten UD-Prüfplatte (Z-Auflösung 0-200 μm)

Die Geometrie der Prüfplatte sowie der Versuchsaufbau sind in Abbildung 5.20 dargestellt (Länge: 20 mm; Breite: 10 mm; Höhe: 2 mm). Die Prüfkörpergeometrie wurde zunächst mittels einer Labortrennsäge³⁷ ausgeschnitten und anschließend die Kanten ebenso wie in der Dicke mit Schleifpapier nachbearbeitet. Mittels eines digitalen Messschiebers mit einer Genauigkeit $\pm 0,01$ mm wurden die Abmessungen dokumentiert. Die Prüfungsgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine³⁸ betrug $v = 1$ mm/min.

³⁶ FTR GmbH, Höhenauflösung 3 nm, Lateralaufklärung 1 μm

³⁷ MUTRONIC Präzisionsgerätebau GmbH & Co. KG; Typ: Mutronic DIADISC 5200

³⁸ Zwick/Roell, Typ: 1474

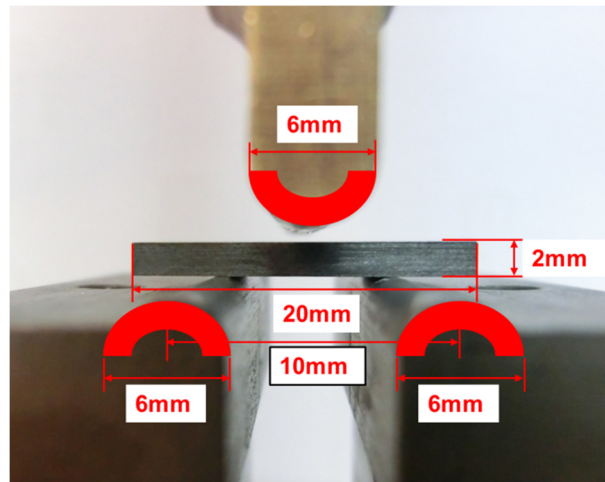


Abbildung 5.20: Geometrie und Prüfaufbau nach DIN EN 2563

In Abbildung 5.21 sind die Kraft-Weg-Verläufe für die Versuchsreihe 06-XB-50-4,07 dargestellt. Innerhalb der Versuchsreihe fällt nur Probe 7 mit einem frühzeitigen Versagen bei einer Verformung von 0,343 mm heraus.

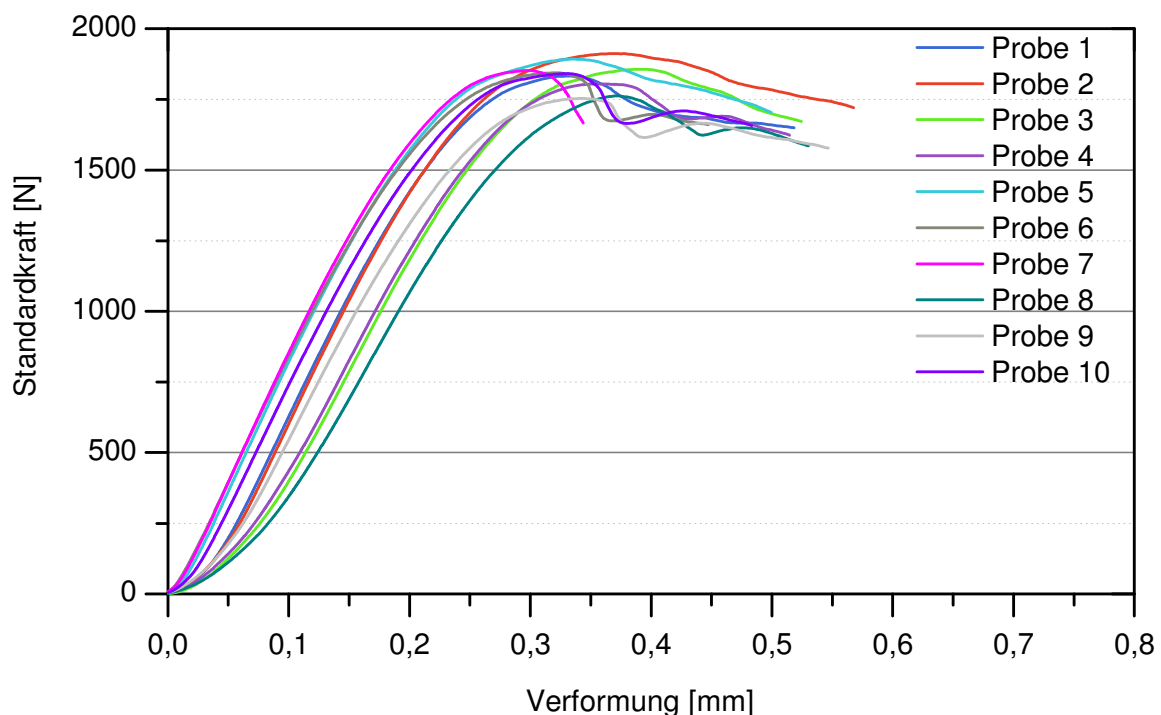


Abbildung 5.21: Kurvenschar der Versuchsreihe 06-XB-50-4,07

Für einen Vergleich aller Kraft-Weg-Verläufe wurden zunächst die Kraft-Weg-Verläufe jeder einzelnen Versuchsreihe (Tabelle 5.1) gemittelt. Hierzu wurden die Messdaten nach einer definierten Anfangsverformung ($0,165 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$) sortiert und anschließend die Messdaten der hergestellten Proben gemittelt. Die Ergebnisse

sind in Abbildung 5.22 dargestellt. Die Verläufe als auch die Maximalwerte der Versuche verdeutlichen die Unterschiede der Materialien. Sowohl die maximale Standardkraft als auch das E-Modul ($E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$) aller Materialkombinationen sind mit Binder XB 3366 von Huntsman geringer als mit dem eingesetzten Momentive Binder (Typ 05311). Zusätzlich zeigt sich, dass das Referenzmaterial mit Momentive Binder und einer 12k HTS Kohlenstofffaser den höchsten E-Modul aufweist, bei gleichem Faser-E-Modul (gemäß Datenblätter). Die Kompatibilität des Bindermaterials mit der infiltrierten Matrix ist somit, nach der Auswahl der Verstärkungsfaser, ausschlaggebend für die mechanische Belastbarkeit.

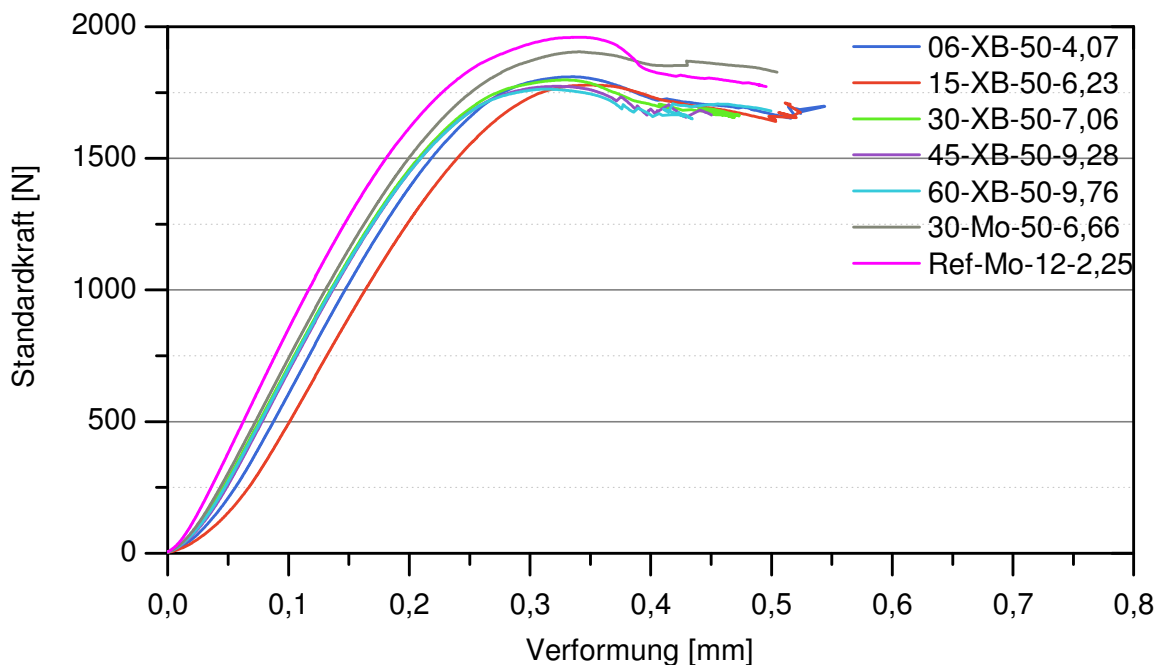


Abbildung 5.22: Gemittelte Kraft-Weg-Verläufe für alle Versuchsmaterialien

In Anlehnung an die Norm ist nach einer Analyse aller Kraftverläufe und anschließender Überprüfung der Prüfkörper, kein reines Schubversagen in der Ebene, sondern ein plastisches Versagen sichtbar. Aufgrund des Versagensmodus ist nach DIN EN 2563 nur eine Vergleichbarkeit innerhalb eines exakt gleichen Materiales erlaubt. Aufgrund der unterschiedlichen Bindergehalte wäre eine Aussage selbst für die Variation des Bindergehaltes nicht möglich. Im Hinblick auf die Aussagefähigkeit zum Einfluss des Bindermaterials wurden die gemittelten Ergebnisse daher normiert aufgetragen. Die Schubspannung τ jeder Probe wurde anhand der Messdaten (P_R = Maximalkraft bei Versagen, b = Probenbreite, h = Probenhöhe) mittels Formel (5.3) berechnet.

$$\tau = \frac{3 \times P_R}{4 \times b \times h} \quad (5.3)$$

Die Einzelwerte der Versuchsproben wurden zu einem Versuchsdurchschnitt, unter Berücksichtigung der Ausreißer-Methodik nach Nalimov [145], zusammengefasst. Die normierten Ergebnisse für einen 95 % Vertrauensbereich sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

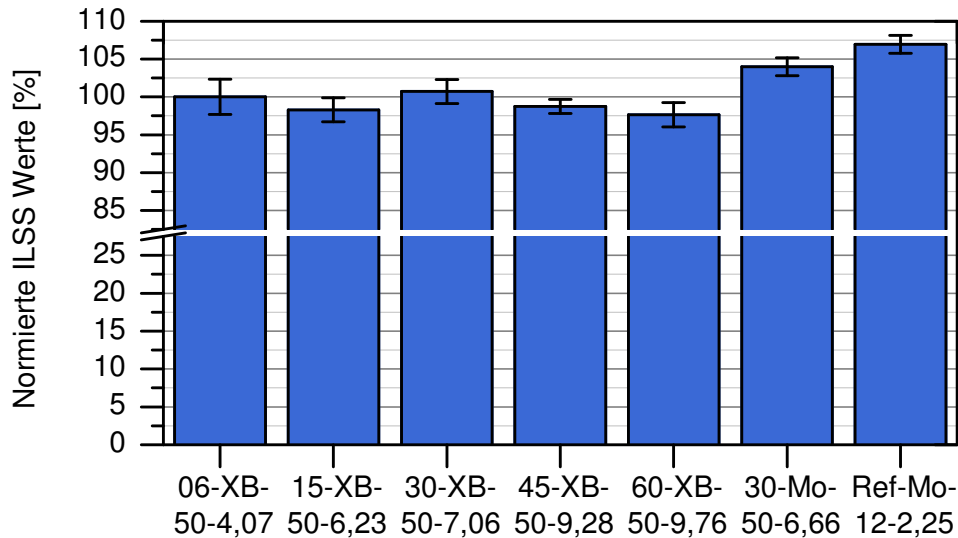


Abbildung 5.23: Übersicht der normierten Prüfkräfte (normiert auf 06-XB-50-4,07)

Die Prüfergebnisse zeigen, dass eine Vergrößerung des Bindergehaltes, ausgehend vom Normierungsmaterial (06-XB-50-4,07), die Werte maximal um 2,34 % ins Negative und 0,72 % ins Positive beeinflusst. Der Einsatz eines anderen Bindermaterials (Momentive) zeigt eine Steigerung von 3,99 % im Vergleich zum Normierungsmaterial. Das Referenzmaterial mit der 12k Kohlenstofffaser zeigt auch hier den höchsten prozentualen Zuwachs von 6,96 %. Die Auswahl des Bindermaterials ist somit von Bedeutung für die spätere Bauteilperformance und sollte an die Infiltrationsmatrix angepasst werden. Der Einfluss des Anteiles des pulverförmigen Bindermaterials ist nur von geringerer Bedeutung. Mit Ausnahme der Versuchsreihe 30-XB-50-7,06 sinken die Werte im ILSS Verfahren mit steigendem Binderanteil. Eine Reduktion der Binderpartikel steigert somit die Bauteilleistungsfähigkeit.

5.2.3.2 Versuche zur Bestimmung des 3-Punkt-Biege-Verhaltens

Für die Bestimmung des 3-Punkt-Biegeverhaltens nach DIN EN ISO 14125 wurde ein Teil der Preform aus Geometrie I (Kapitel 5.1) mit einer Größe von 260 mm x 260 mm infiltriert. Die Probengeometrie wird durch die Norm für unidirekti-

onale und multidirektionale Verbundwerkstoffe festgelegt, wobei die Länge der Prüfkörper 100 mm, die Breite 15 mm und die Höhe 2 mm beträgt. Die Prüfkörper wurden analog der ILSS Versuche mit einer Labortrennsäge ausgeschnitten. Die bei der Messung berechnete Biegespannung für große Durchbiegungen $> 0,1$ der Länge wird anhand Formel (5.4) berechnet.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \left\{ 1 + 6 \left(\frac{s}{L} \right)^2 - 3 \left(\frac{sh}{L^2} \right) \right\} \quad (5.4)$$

Hierbei ist F die maximal erreichbare Kraft, L der Auflagerabstand, b die Probenbreite, h die Probenhöhe, und s die Durchbiegung in der Balkenmitte. Für die Durchbiegungsversuche wurde, wie für die Kompaktierungsversuche, eine Referenzkurve der Maschinenverformung erstellt und bei den Messungen berücksichtigt. Für die Dehnung wurde, identisch wie für die Durchbiegung, eine korrigierte Gleichung nach der Norm DIN EN ISO 14125, verwendet.

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \left\{ 6,00 \frac{s}{L} - 24,37 \left(\frac{s}{L} \right)^3 + 62,17 \left(\frac{s}{L} \right)^5 \right\} \quad (5.5)$$

Ebenso wie die Versuchsergebnisse der scheinbaren interlaminar Scherfestigkeit wurden auch diese Versuchsergebnisse mit dem Ausreißertest nach Nalimov [145] untersucht, um einen Vertrauensbereich (99 % Sicherheit) zu erhalten. Die Normierung wurde (identisch mit dem ILSS Test) nach der ersten Versuchsreihe (06-XB-50-4,07) durchgeführt. In Abbildung 5.24 ist sowohl die normierte Biegespannung als auch die normierte Dehnung aufgetragen.

Die Dehnung der Versuchsreihen ist, bis auf das Ergebnis der Versuchsreihe 06-XB-50-4,07, auf einem konstanten Niveau. Die Biegespannung variiert im Mittel um $\pm 2,25$ %, wobei auch hier die beiden Versuchsreihen mit Momentive-Binder (30-Mo-50-6,66 und Ref-Mo-12-2,25) am besten abschneiden. Eine eindeutige Aussage zu dem Einfluss des Bindergehaltes für den XB 3366 Pulverbinder von auf die Biegespannung kann jedoch aufgrund der geringen positiven und negativen Schwankungen nicht getroffen werden

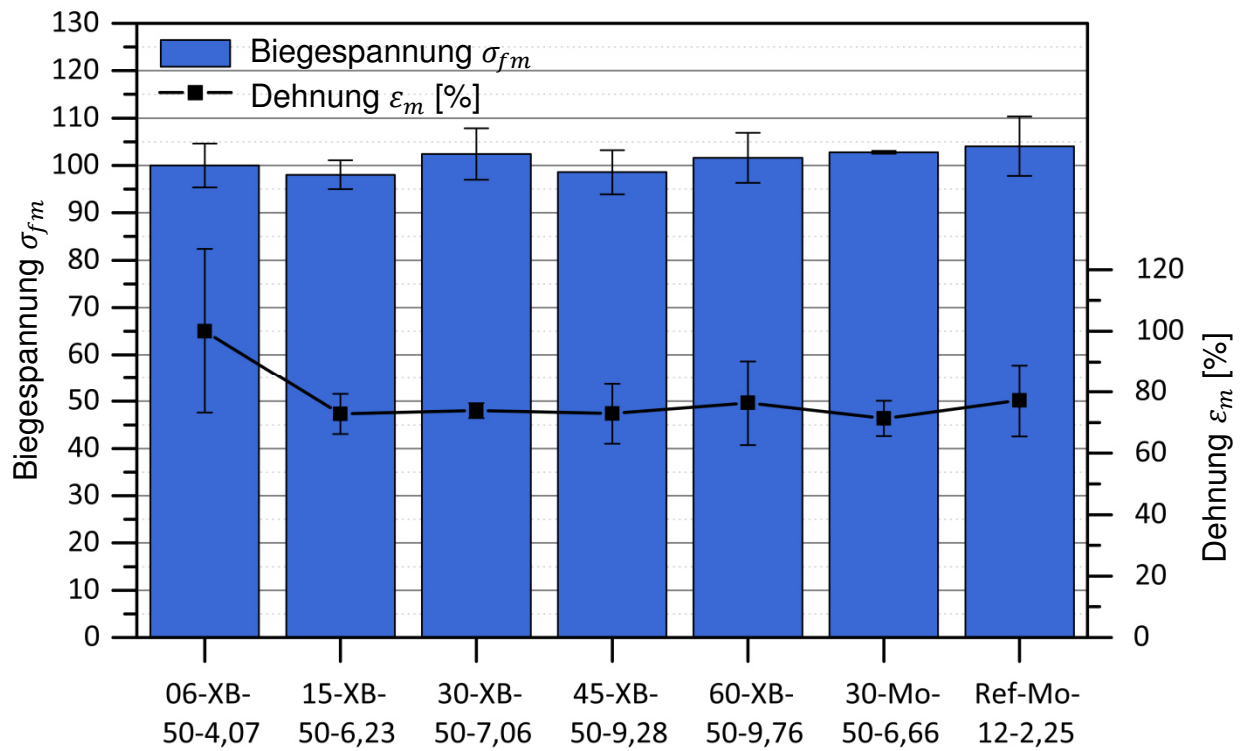


Abbildung 5.24: Normierte Biegespannung und Dehnung (3-Pkt.-Biegung)

6. Prozessbeschreibung Online-Bebinderung

Die Vorarbeiten, welche innerhalb der Kapitel 4 und 5 dargestellt werden, können nun innerhalb dieses Kapitels zur Online-Bebinderung von Rovings eingesetzt werden. Hierbei werden die im offline Modus getesteten Funktionsmodule an einem Industrieroboter mit Ablegeendeffektor montiert, womit sich die Restriktionen der Prozesskette reduzieren und sich die Einstellmöglichkeiten von Prozessparametern erhöhen. So ist beispielsweise durch eine variable Breiten-Einstellungs-Einheit (Kapitel 4.2.1) die Rovingbreite online an die Ablegepfade anpassbar oder aber auch der Binderanteil während des Prozesses einstellbar. Die Vor- und Nachteile der Online-Bebinderung verdeutlicht Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Vorteile der Online-Bebinderung [146]

Online-Bebinderung (Beispiele: Aktuell in der Entwicklungsphase)	
<ul style="list-style-type: none"> + Lokale Bebinderung + Reduktion der Prozessschritte durch Online-Bebinderung + Unabhängigkeit von Halbzeugherstellern (Materialauswahl) + Binderparameter einstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Anlagentechnologie muss entwickelt werden - Qualitätssicherung - Anlagenkomplexität und Rüstaufwand

Die Vorgehensweise bzw. die untersuchten Parameter innerhalb dieses Kapitels veranschaulicht Abbildung 6.1. Nach der Ermittlung der Fördermenge wird ein neues Modul zur gezielten Steuerung der Binderpartikel vorgestellt, bevor die 2D Herstellung und 3D Umformung einer Preform am Tapelegesystem (Abbildung 6.2) erfolgt.

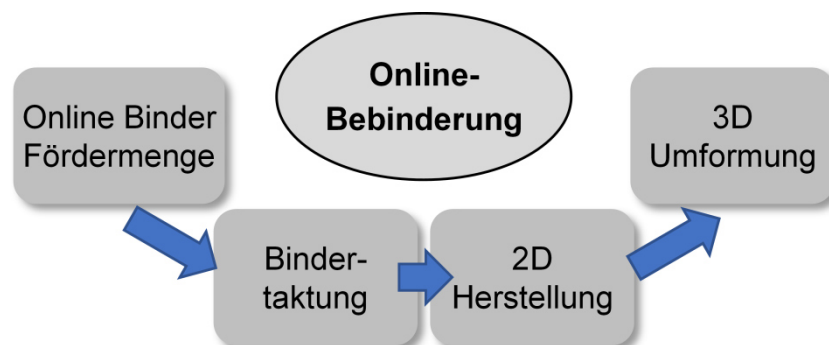


Abbildung 6.1: Vorgehensweise bei der Online-Bebinderung

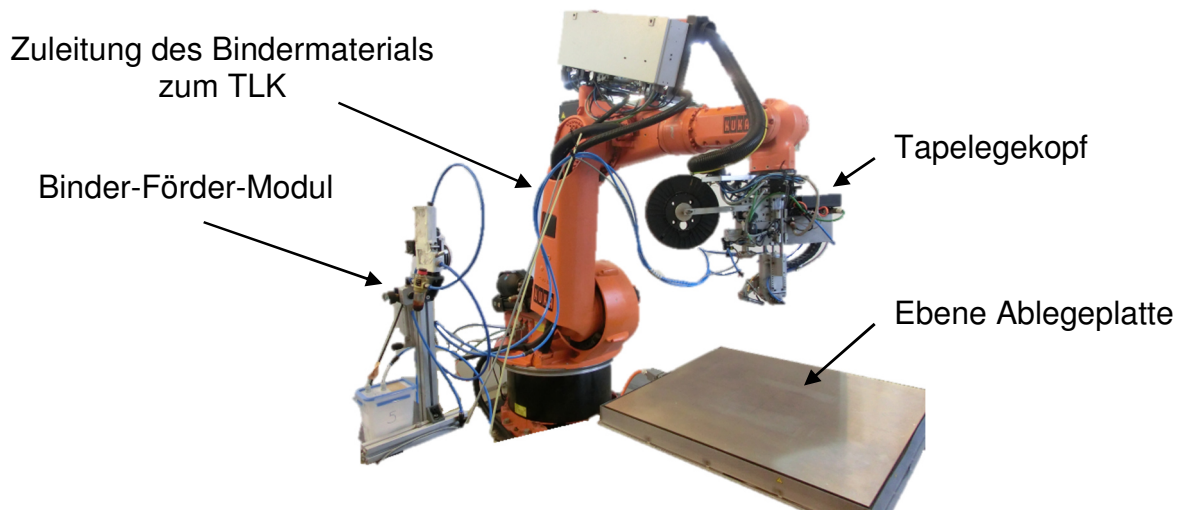


Abbildung 6.2: Aufbau der Online-Bebinderung am Tapelegesystem

Die Einsatzmodule wurden für die Online-Bebinderung an das Tapelegesystem (Kapitel 5.1) adaptiert. Die Anforderungen für die Online-Bebinderung vor allem für das Binder-Förder-Modul (B-F-M) weichen von den Anforderungen der Offline-Bebinderung ab. Während bei der Offline-Bebinderung das Binder-Förder-Modul starr, in der Nähe der Binderapplizierung befestigt war, ist es bei der Online-Bebinderung aufgrund der schnellen Bewegungsabläufe des TLK außerhalb des Roboters befestigt. Eine Montage des B-F-M am TLK oder an einer der Achsen des Ablegeroboters würde aufgrund der rotatorischen und translatorischen Bewegungsabläufe zu einer inhomogenen Binderfördermenge führen. Um dies zu verhindern wurde das B-F-M neben dem Ablegeroboter aufgebaut und mittels einer beweglichen Zuleitung mit dem TLK verbunden. Die im Vergleich zur Offline-Bebinderung verlängerte Schlauchlänge muss hierbei bei der Binderförderung berücksichtigt werden. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille (6.1) beschreibt hierbei den Zusammenhang eines Volumenstromes (\dot{V}) in Abhängigkeit des Rohrendurchmessers (r), der Druckdifferenz (Δp), der dynamischen Viskosität des Fluides (η) und der Länge des Rohres (l).

$$\dot{V} = \frac{\pi \times r^4 \times \Delta p}{8 \times \eta \times l} \quad (6.1)$$

Die Reduktion des Luftvolumenstromes infolge des erhöhten Gegendruckes reduziert auch, wie Abbildung 6.3 zeigt, die Binderfördermenge im Falle der Online-Bebinderung im Vergleich zur Offline-Bebinderung. Die Binderpartikelförderung muss in Abhängigkeit des Versuchsaufbaues neu ermittelt werden. Eine durchschnittliche

Reduktion der Binderfördermenge für Versuche am TLK um $\approx 14\%$ im Vergleich zur Offline-Bebinderung verdeutlicht die Auswirkung des verlängerten Zufuhrschlauches.

Neben der Verlängerung der Schlauchlänge für die Online-Bebinderung ist eine stetige Binderförderung, wie bei der Offline-Bebinderung, nicht zweckmäßig. Im Falle der Offline-Bebinderung wurde eine stetig, homogene Binderförderung über eine Dauer von ≈ 20 Minuten genutzt um eine Menge von je ca. 300 m Material (maximale Aufspulmenge einer BSH 315 Spule) herzustellen. Für die Online-Bebinderung ist die maximal kontinuierliche Ablegelänge jedoch durch das Ablegen einzelner Pfade auf ein Werkzeug bzw. auf eine Preform deutlich geringer. Die eingesetzte Versuchsanlage hat hierbei eine maximale Ablegelänge von 1,5 m, in welcher eine gleichmäßige Ausbringungsmenge erforderlich ist.

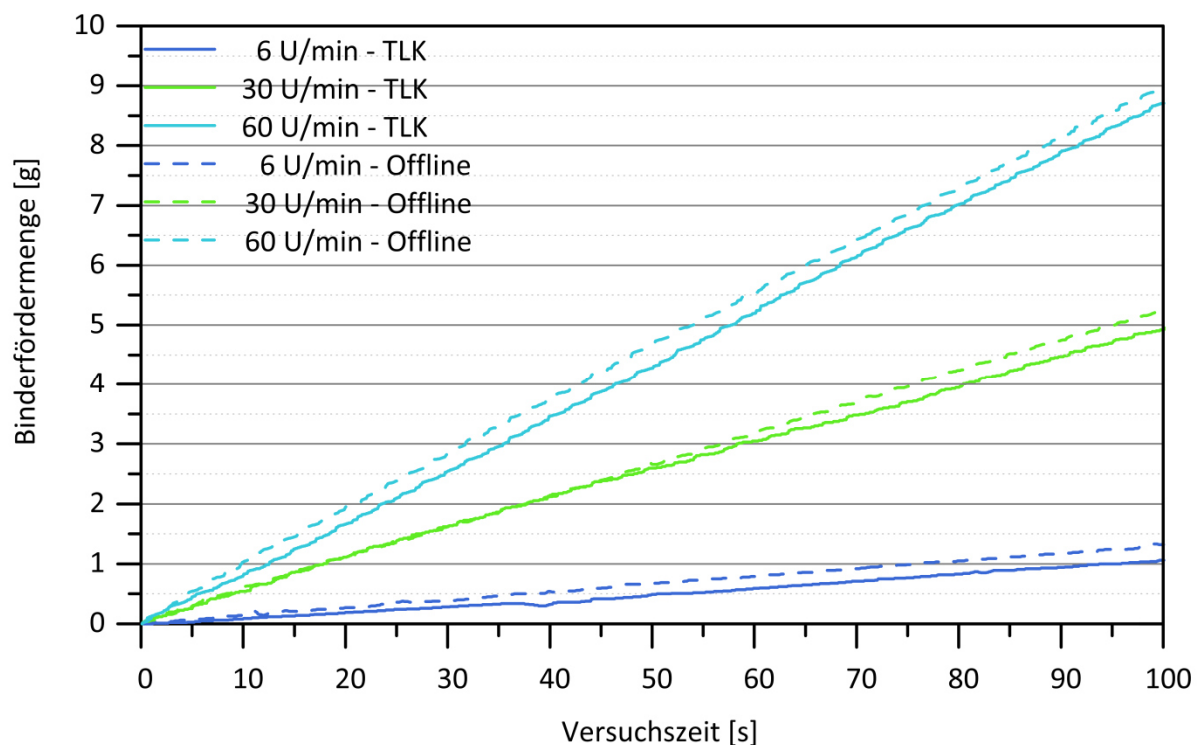


Abbildung 6.3: Vergleich der Binderfördermenge (offline vs. online)

Für eine gezielte Bebinderung eines Rovings ist ein variables Start / Stopp System der Binderförderung essentiell. Erste Tests zeigten jedoch, dass ein Stoppen des Sperrades zu einem sehr trägen Stoppen der Binderförderung führt, aufgrund der Bindermenge innerhalb des Luftschlauches. Zur Lösung dieses Problemes wurde zwischen dem Binder-Förder-Modul und der Applizierung der Binderpartikel auf dem Roving im „Nip-Point“ ein weiteres, regelbares Modul installiert. Das Binder-Start-Stopp-Modul (B-S-S-M) besteht aus einem pneumatisch betätigten, doppeltwirkenden

den 3-Wege-Kugelhahnventil³⁹, welches das Luft-Bindergemisch aus dem B-F-M wahlweise zur Applizierung oder in einen Auffangbehälter lenkt. Somit ist ein homogener Bindergehalt innerhalb des Förderschlauches zu jeder Zeit gewährleistet. Der Binderfluss kann mittels des B-S-S-M temporär zur Bebinderung der Kohlenstofffasern (Roving) umgeleitet werden. Eine Veränderung des lokalen Bindergehaltes ist in diesem Fall mit einer frequenzbasierten Taktung möglich. Durch eine Verdopplung der Fördereinheiten inklusive der Bindertransportschläuche und des B-S-S-M, mit jeweils zwei unterschiedlichen Bindergehalten, könnte ebenso eine lokale veränderte Bindermenge auf einem Roving aufgebracht werden.

In Verbindung mit einem Multifunktions-Zeitrelais lässt sich die Binderzufuhr zum einen über einen Taster bzw. Impuls starten bzw. stoppen, zum anderen ist über dieses Modul auch eine Taktung der Binderförderung möglich. Durch die variable Taktung kann der Binderstrom nach dem Starten in Intervallen auf dem Roving platziert werden. In Abbildung 6.4 sind drei Versuche mit unterschiedlichen Intervallzeiten von 1,0; 2,5 und 5,0 Sekunden am Offline-Bebinderungsprüfstand abgebildet. Hierbei wurde ebenfalls der in Kapitel 4.2.2 dargestellte Versuchsaufbau für die Messung der Binderfördermenge mit einer Präzisionswaage verwendet. Die angegebene Intervallzeit bedeutet, dass das Ventil in diesem Zeitraum offen bzw. geschlossen ist. Die Taktung des Binders ist homogen über allen Intervallsequenzen.

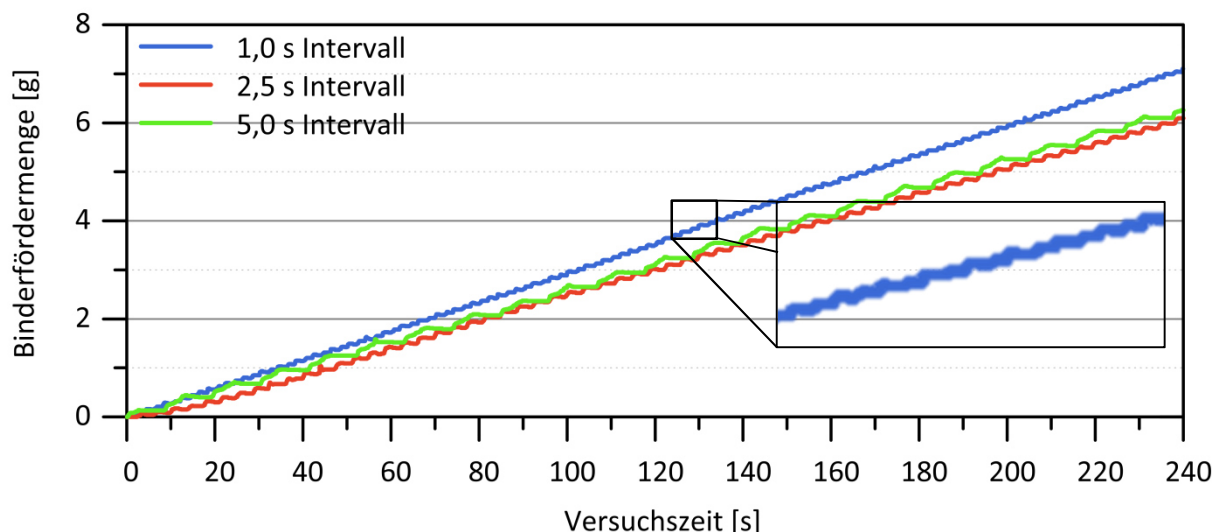


Abbildung 6.4: Auftragsmenge des B-F-M am Offline-Bebinderungsprüfstand mit Taktung der Binderförderung (XB 3366) und einer Sperrradgeschwindigkeit von 30 U/min

³⁹ KH 3/38 L P

Eine Analyse der Taktung der Binderzufuhr am Online-Tapelegekopf ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die geförderte Bindermenge für zwei unterschiedliche Umdrehungsgeschwindigkeiten des Sperrades (15 und 30 U/min) wurde bei gleicher Intervallzeit von 1,5 Sekunden gegeneinander aufgetragen. Deutlich ist sowohl die homogene Taktung als auch die stetige Bindierzunahme zu erkennen. Dies zeigt zugleich die Funktionsfähigkeit des B-S-S-M auf. Hiermit können neue Funktionen der Online-Bebinderung, nämlich den Bindergehalt lokal auf die Erfordernisse (z. B. Preformsteifigkeit) anzupassen, für eine optimierte Preformherstellung genutzt werden.

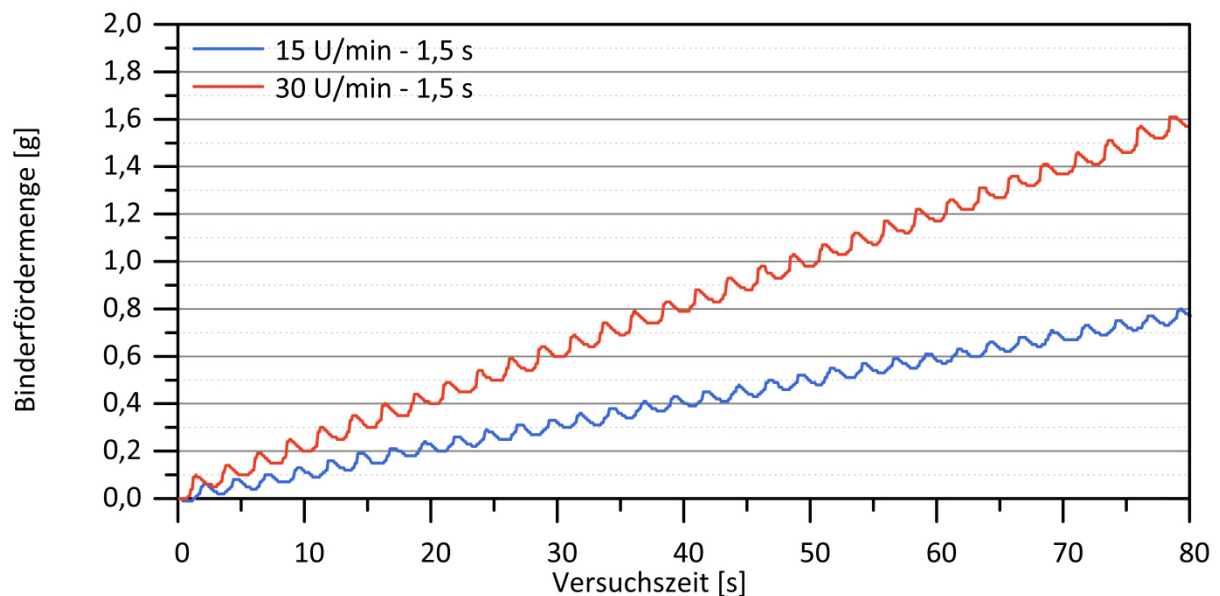
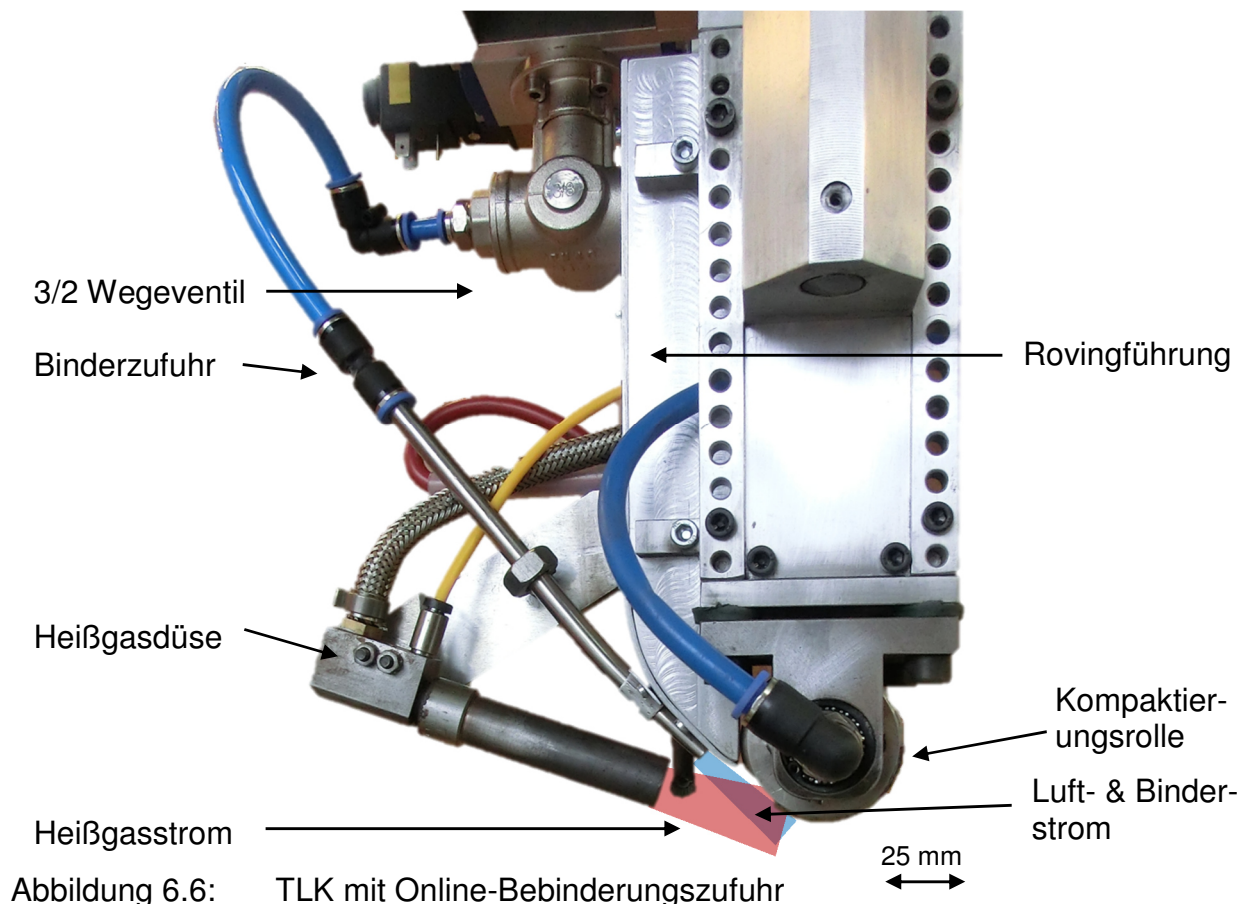


Abbildung 6.5: Austragsmenge des Online B-F-M mit Taktung der Binderfördermenge (XB 3366) mit gleicher Intervallzeit (1,5 s) bei unterschiedlichen Sperraddrehzahlen

Ebenso wie bei der Förderung der Binderpartikel unterscheiden sich die Anforderungen an die Energiezufuhr zur Partikelerwärmung zwischen Offline- und Online-Applizierung. Die Erwärmung der Binderpartikel innerhalb der Offline-Bebinderung erfolgte stationär mittels eines Heißluftfönes. Dieser wurde für die Versuche 1 ½ Minuten vor dem Versuchsstart eingeschaltet um einen homogenen Temperaturverlauf über die gesamte Versuchszeit zu gewährleisten. Bei der Online-Bebinderung ist eine dauerhafte Warmluftzufuhr des Heißluftfönes (Triac S), aufgrund der Erwärmung aller im Heißluftstrom befindlichen Bauteile, vor allem der Halter der Konsolidierungsrolle des TLK, nicht sinnvoll. Ein variables Takten des Heißluftstromes analog der des Binder-Start-Stop-Moduls ist nur mit einer Neukonstruktion bzw. Vergrößerung der Störkontur am TLK möglich. Ebenso vergrößert sich

durch den Einsatz des identischen Heißluftfönes die Außenkontur des TLK, welches bei Ablage von komplexen Geometrien zu Behinderungen führen kann. Durch den Einsatz eines schnell regelbaren Luftherhitzers, wie z. B. ein Sylvania AirHeater⁴⁰ wird ein dynamischer Luftstrom im Start-/ Stoppbetrieb ermöglicht. Dies erfordert jedoch ebenso wie ein stationärer Luftherhitzer eine Neukonstruktion des TLK. Um die geometrischen Restriktionen innerhalb des Ablegeprozesses nicht zu verändern wurde die Heißgasdüse an die Anforderungen des Ablegens von Binderrovings angepasst.

Für die Online-Bebinderung wird der in Kapitel 2.3 beschriebene TLK EVO 1 verwendet. Der untere Teil des TLK ist in Abbildung 6.6 mit den einzelnen Bestandteilen dargestellt. Die Binderpartikel sind im Vergleich zur Offline-Bebinderung nur ≈ 30 mm vom „Nip-Point“ entfernt. Um im Vergleich zur Offline-Bebinderung eine gleiche Wärmeenergie zur Erwärmung der Binderpartikel bei einer Strecke von ≈ 20 mm zu erreichen, wird die zugeführte Wärme erhöht. Aufgrund der verringerten Länge des Wärmeeintrages werden die Binderpartikel nicht zerstört.



⁴⁰ OSRAM SYLVANIA, Process Air Heaters, www.sylvania.com

Zur Verifikation der Funktionsfähigkeit der Online-Bebinderung wird eine aus Glaserfasergelege hergestellte Preform mit dem verwendeten 50k Kohlenstofffaserroving lokal verstärkt. Die fünf Lagen des Geleges⁴¹ sind mit einem flächigen Bindersystem⁴² fixiert. Die Parameter für die lokale Verstärkung sind nachfolgend aufgeführt.

- Ablegegeschwindigkeit: 10 m/min
- Anpresskraft der Konsolidierungsrolle: 3 bar Luftdruck \pm 285 N⁴³
- Volumenstrom der Heißgasdüse: 6 NI

In Abbildung 6.7 sind vier exemplarische Entstehungsstufen für eine lokal verstärkte, ebene Preform dargestellt. Die quasiisotrope Preform (I) wird mit einem kreuzförmigen Muster lokal verstärkt (II). Nach der mittigen Verstärkung erfolgt eine Verkleinerung der Kreuzungsabstände (III), bis der mittige Abstand der Kreuzungspunkte 135 mm beträgt (IV).

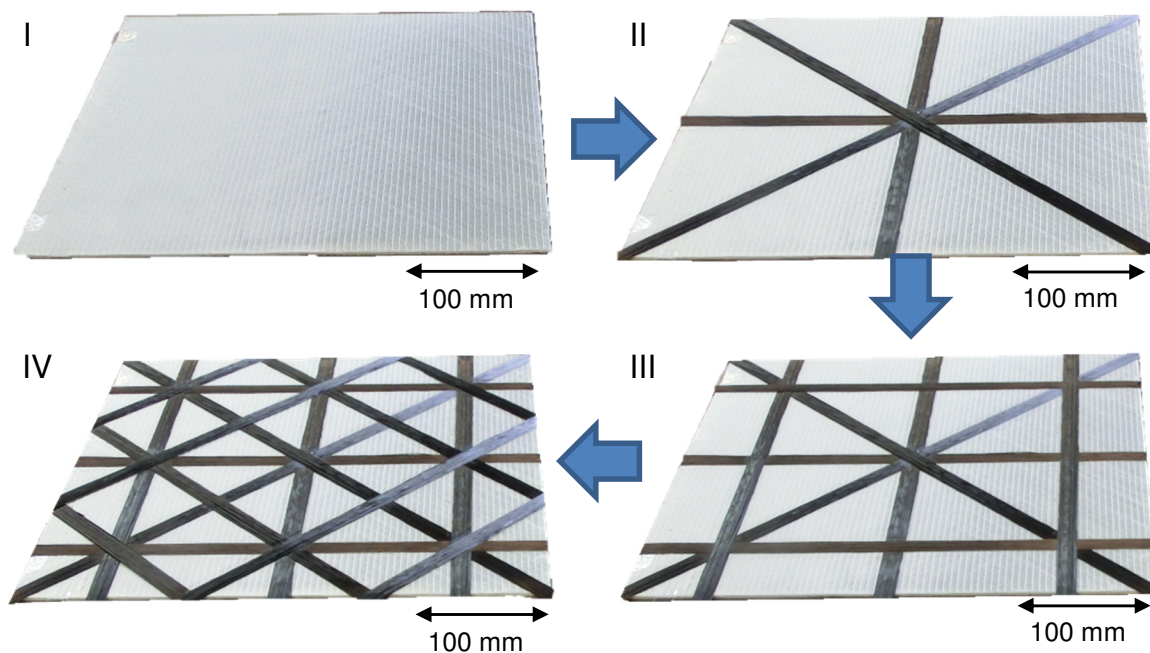


Abbildung 6.7: Online-Bebinderung zur lokalen Verstärkung einer Preform

Sowohl das Ablegen einer ebenen Geometrie als auch das Ablegen einer gekrümmten Struktur ist durch die Nutzung eines Ablegesystemes wie z. B. eines Industrieroboters oder eines Portalsystemes, in Verbindung mit der Online-Bebinderung möglich. Aufgrund der Restriktionen des Ablegeprozesses ist die maximal mögliche Able-

⁴¹ Saertex, Biax diagonal-Glas-Gelege ($\pm 45^\circ$), Flächengewicht, 610 g/m², Nähfaden PES

⁴² Spunfab, PA 1541A 12, 12 g/m², Co-Polyamid

⁴³ Berechnung der realen Kompaktierungskraft ist im Anhang „Berechnung der Flächenpressung unterhalb der Konsolidierungsrolle“ aufgeführt.

gegeschwindigkeit beim Konturabfahren meist durch den Winkelausgleich der Anlage begrenzt. Zur Steigerung des Durchsatzes, welches meist mit einer Optimierung der Wirtschaftlichkeit einhergeht, kann eine Preform in der Ebene hergestellt und anschließend in eine gekrümmte Struktur umgeformt werden. In Abhängigkeit der Komplexität des Bauteiles kann eine einfache Umformung (Abbildung 6.8) ausreichen. Bei der Drapierung von komplexen Preforms aus einer ebenen Preform kann es aufgrund von geometrischen Effekten zu einer Faltenbildung kommen. Unter Berücksichtigung der eingesetzten Materialparameter wie z. B. dem Bindungstyp der Grundpreform, Veränderungen an dieser, und/oder durch eine gezielte Lagenanordnung können diese Effekte reduziert werden [147, 148]. Beim Drapieren wird die Temperatur der ebenen Preform oberhalb des Erweichungspunktes des verwendeten Bindermaterials erwärmt und anschließend unter Druck, durch eine statische Presse oder einen Vakuumaufbau, umgeformt. Nach Abkühlung der Preform (Preform Temperatur < Bindererweichungstemperatur) ist die Preform für die Lagerung / Infiltration fertig. In Abhängigkeit des zu fertigenden Bauteiles (Geometrie, Stückzahl) ist eine Herstellung in der Ebene mit anschließendem Umformprozess oder ein direktes Ablegen in die Werkzeugform wirtschaftlich sinnvoll. In Abbildung 6.8 ist eine umgeformte Preform mit lokaler online bebinderten Verstärkung abgebildet.

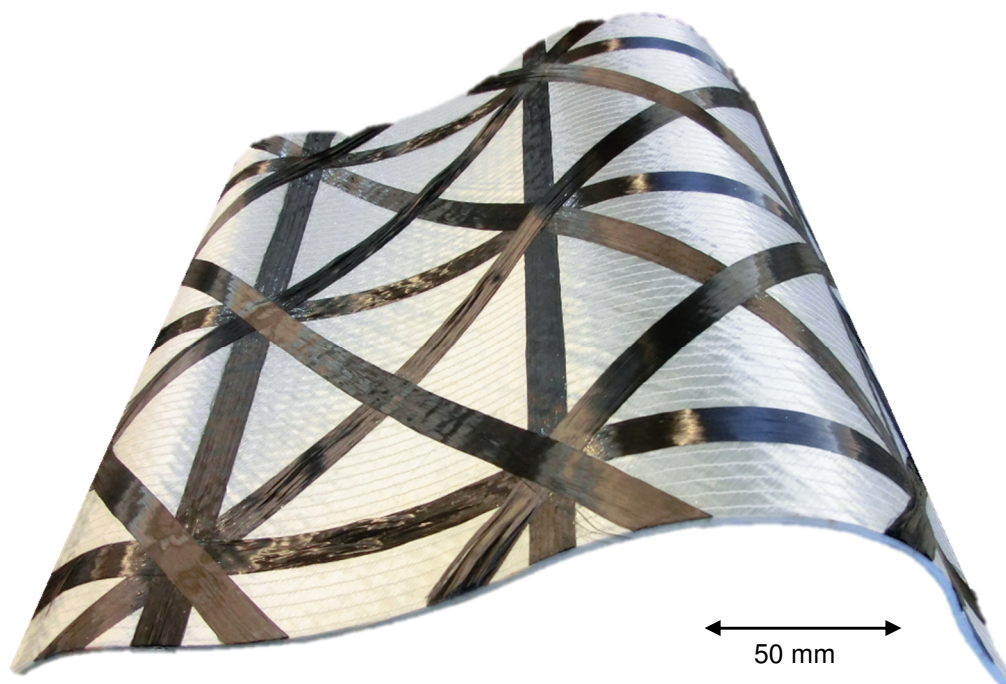


Abbildung 6.8: Ebene lokal verstärkte Preform nach der Umformung

7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit eines Produktionsprozesses ist maßgeblich für dessen Bauteilkosten und somit meistens auch für den Erfolg eines Produktes verantwortlich. Im Rahmen dieses Kapitels werden die Herstellungskosten für ein, im Liquid Composite Molding Verfahren (Kapitel 2.5) hergestelltes Bauteil verglichen, wobei hierbei die lokale Verstärkung von Preforms im Mittelpunkt steht. Die für den Gesamtprozess benötigten Parameter werden zu Beginn definiert. Hierbei wird eine Preform mittels unterschiedlicher Preformingmethoden (Konfektionstechnik Kapitel 2.1.1; Tailored-Fiber-Placement Kapitel 2.1.3; Online-Bebinderung – Kapitel 6) gegenübergestellt. Als herzustellende Bauteilgeometrie wird zu Beginn eine fiktive Geometrie definiert, welche sowohl eine Grundstruktur als auch lokale Verstärkungen aufweist.

In Abbildung 2.1 ist ein Modell der Prozessanalyse des Herstellungsablaufes aufgezeigt. Hierbei setzt sich der Gesamtprozess, im aufgezeigten Beispiel der LCM Prozess, aus mehreren Prozessschritten (z. B. Preforming, Infiltration usw.) zusammen. Diese Prozessschritte setzen sich wieder aus mehreren Tätigkeiten (z. B. Stacking der flächigen Halbzeuge) zusammen, welche wieder in einzelne Elemente aufteilbar sind. Eine Zuweisung von u. a. Kosten, Prozesszeiten, oder Personalbedarf kann auf der untersten Ebene der Elemente erfolgen. Hierdurch besteht die Möglichkeit unterschiedliche Verfahren oder Teilverfahren miteinander zu vergleichen. [84]

7.1 Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Vergleich unterschiedlicher Verfahrenstechnologien zur Herstellung eines spezifischen Produktes ist nur unter Definition von Randbedingungen möglich. Nachfolgend sind die wichtigsten Annahmen des Vergleiches aufgelistet:

- Interaktion des Produktionssystemes mit der Umwelt

Das Produktionssystem als Subsystem der Unternehmung agiert für alle untersuchten Verfahren identisch mit den sonstigen Subsystemen in der Unternehmung, so dass diese Parameter (Personalsystem, Finanzsystem, etc.) als gleich angenommen werden können [115].

- Personenbedingter Einsatz innerhalb des Produktionssystemes

Der Einsatz von unterschiedlichen Technologien erfordert meist auch ein entsprechend qualifiziertes Personal. Innerhalb des Kostenvergleiches wird, unabhängig von den Verfahren, von keiner personenbezogenen Lernkurve ausgegangen. Die Prozessgeschwindigkeit ist unabhängig von der Lernkurve eines Mitarbeiters.

- Bauteilherstellungsrate in Abhängigkeit der Anlagennutzung

Die maximale Kapazität einer Produktionsanlage ist in Realität eine Kenngröße, welche von der Auslastung und dem Verschleiß abhängt. Im Rahmen der Berechnung wird jedoch von einem konstanten Output bei einer 100 % Maschinenauslastung ausgegangen.

- Bauteilwartung / Abnutzung

Eine Grundwartung der Anlagen ist im Anlagenpreis inbegriffen, eine Abnutzung der Anlagen ist über die Abschreibungsdauer in der Berechnung beinhaltet.

- Bauteilperformance

Bauteilperformance und das Preformgewicht des herzustellenden Bauteils sind für das gewählte Bauteil innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gleichwertig. Jedes der Verfahren besitzt aufgrund der spezifischen Technologie in der Realität ein unterschiedliches Bauteilgewicht und Bauteilperformance, welches sowohl von den Bindungsarten (Nähfäden, Binderpulver) oder aber auch dem flächigen Halbzeugcharakter abhängt.

- Bauteilgeometrie

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird das in Abbildung 7.1 dargestellte Bauteil als Datenbasis herangezogen. Die Grundstruktur besteht aus einem Glasfasergewebe, die lokale Verstärkungsstruktur aus Kohlenstofffasern. Die angenommenen Maße sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

- Prozessverkettung

Die einzelnen Arbeitsschritte des Herstellungsprozesses sind mit automatisierten Transfereinheiten verkettet, sodass ein Einsatz eines Mitarbeiters sich auf die Anlagenbedienung beschränkt.

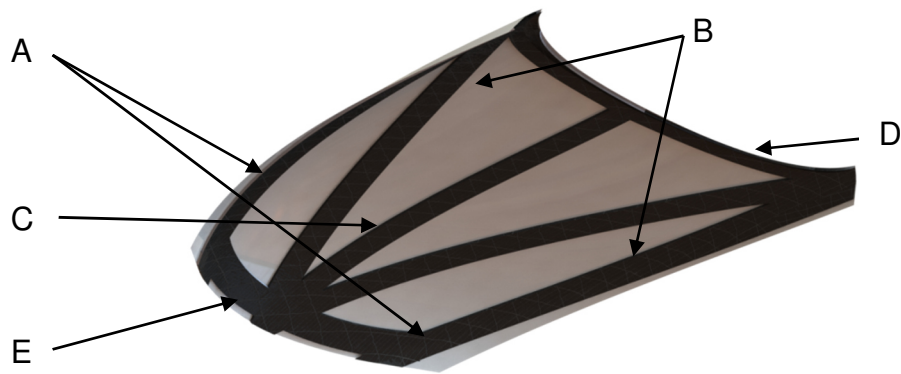


Abbildung 7.1: Bauteilgeometrie für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (Innenverstärkte Motorhaube)

Tabelle 7.1: Geometrische Annahmen des Referenzbauteiles

	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Material
Grundstruktur	1600	1370	0,6	GF – Gewebe
Verstärkung - A	2088	30	0,7	CF – UD
Verstärkung - B & C	4614	40	0,7	CF – UD
Verstärkung - D & E	2396	30	0,6	CF – UD

7.2 Vergleich der Preformingverfahren

Das LCM Verfahren ist exemplarisch in Abbildung 2.15 dargestellt. Im Nachfolgenden wird dieses Verfahren, soweit es für den zu analysierenden Prozess notwendig ist, in Prozessschritte untergliedert. In Abbildung 7.2 ist der Gesamtprozess der LCM-Kette, die relevanten und zu untersuchenden Prozessschritte (Preforming) als auch die daraus basierenden Elemente, aufgelistet. Aus dieser Auflistung können die Einzelprozesse abgeleitet werden und somit eine Kostenzuordnung erfolgen.

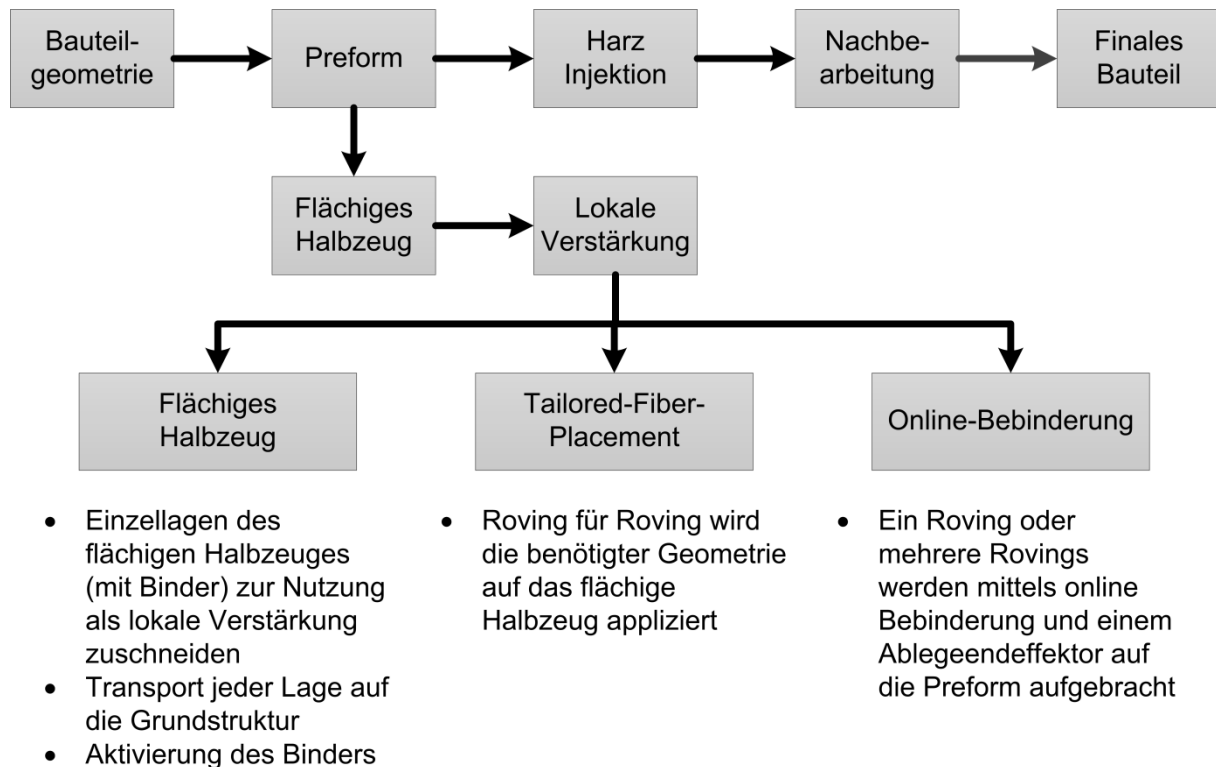


Abbildung 7.2: Modell der Prozessanalyse des Herstellungsablaufes

Die drei zu analysierenden Technologien zur lokalen Verstärkung eines flächigen Halbzeuges werden nachfolgend für das Referenzbauteil detailliert erläutert.

- Konfektionstechnik / flächig bebindertes Halbzeug

Für die Herstellung der Verstärkungsstrukturen wird ein handelsübliches Kohlenstoff-faser UD-Gelege mit bereits appliziertem Binder verwendet. Ein CNC Cutter schneidet die einzelnen lokalen Verstärkungsgeometrien aus, welche danach von einem „Pick and Place System“ auf der Grundstruktur platziert werden. Nach Abschluss des Stackingprozesses der lokalen Verstärkung müssen diese unter Einwirkung von Druck und Hitze aktiviert werden. Nur so kann ein automatisiertes Handling der Preform in die Kavität des Injektionswerkzeuges erfolgen. Die Anzahl der Lagen ergibt sich aus der berechneten Verstärkungsdicke in Verbindung mit der eingesetzten Einzellagendicke. Eine Überdimensionierung des Bauteiles ist somit durch die beschränkte Auswahl an Flächengewichten möglich. Ebenso ist durch das Verwenden von UD-Gelegen, die Drapierbarkeit als auch die Faserorientierung in Rundungen eingeschränkt. Eine Segmentierung der leicht gekrümmten Bereiche (Abbildung 7.1 E und D) kann notwendig werden. Der Einsatz von unterschiedlichen Flächengewichten ist prinzipiell möglich, erhöht jedoch die Rüstzeiten und Lagerhaltungskosten

deutlich. Zusätzlich ist der Verschnitt bei der Konfektionstechnik im Vergleich zu den beiden anderen betrachteten Technologien höher zu bewerten.

- Tailored-Fiber-Placement (TFP)

Die flächige Glasfasergrundstruktur wird nach der lokalen Verstärkung durch Aufnähen eines 50k CF-Rovings auf die Grundstruktur verstärkt. Die Anzahl der Nählagen ergibt sich aus der Geometrie des vernähten UD-Rovings (Annahme: Rovingbreite 7,5 mm / Rovingdicke 0,36 mm). Nach dem lokalen Verstärken wird die Preform zugeschnitten.

- Online-Bebinderung

Identisch mit den TFP Verfahren wird die flächige Grundstruktur zur lokalen Verstärkung auf ein Portal- / Robotersystem transportiert. Als Verstärkungsfaser wird ebenso wie beim TFP ein 50k CF-Roving eingesetzt. Die Breite des abzulegenden Halbzeuges kann durch die Kapitel 4.2.1 verwendete Spreiz- und Breiteneinstellungseinheit in definierten Grenzen variiert werden. Das Verhältnis zwischen Breite und Dicke des abgelegten Rovings ist durch das Rovingvolumen vorgegeben. Für die Verstärkungen der Elemente A, D und E wird der Roving mit einer Breite von 15 mm und einer Dicke von $\approx 0,23$ mm und für die Elemente B und C mit einer Breite von 20 mm mit einer Dicke von $\approx 0,18$ mm abgelegt. Durch die Online-Bebinderung wird das verwendete Binderpulver erwärmt in den „Nip-Point“ eingebracht. Die temperierte Konsolidierungsrolle kompaktiert den noch erwärmten Roving und reduziert gleichzeitig die Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes des Bindermaterials. Ein zusätzlicher Kompaktierungsschritt ist nicht erforderlich. Das Zuschneiden erfolgt ebenfalls wie beim TFP Verfahren nach der lokalen Verstärkung.

Zum Vergleich der Herstellungskosten des zu analysierenden Prozesses, d. h. für unterschiedliche Preformingverfahren innerhalb einer LCM Prozesskette für ein definiertes Bauteil, wird die Kostenvergleichsrechnung verwendet. Innerhalb der Kostenvergleichsrechnung werden die anfallenden Kosten (fixe Kosten & variable Kosten) des Prozesses durch die produzierte Bauteilmenge dividiert (7.2).

$$K_{Ges} = K_f + K_v \quad (7.1)$$

$$\text{Stückkosten} = \frac{K_{Ges}}{\text{Stück}_a} \quad (7.2)$$

Die **fixen Kosten** (K_f), sind Kosten welche auch ohne Produktion von Bauteilen anfallen und setzen sich aus folgenden Kostenpositionen für eine Produktionseinheit j zusammen (angepasst an den Herstellungsprozess): jährliche linearen Abschreibungen (AS_j) der Anlage; Zinskosten für das gebundene Kapital (ZK_j); Raumkosten (PS_j). Die Berechnungsformeln für die jeweiligen Kostenpositionen sind jeweils im Anhang (E.a) aufgeführt.

$$K_f = \sum_j AS_j + ZK_j + PS_j \quad (7.3)$$

Die **variablen Kosten** (K_v) stellen die Kosten des Produktionsprozesses dar, welche in Abhängigkeit des Outputs anfallen. Die variablen Kosten für einen untersuchten Verarbeitungsprozess (VP) setzen sich aus: Materialkosten (k_M); Produktionskosten (k_{Pr}); Energiekosten (k_E); Personalkosten (k_{PE}); sonstige Kosten (k_S) zusammen.

$$K_v = \sum_{VP} k_M + k_{Pr} + k_E + k_{PE} + k_S \quad (7.4)$$

In Abhängigkeit des eingesetzten Preformingverfahrens variieren sowohl die fixen Kosten, u. a. durch unterschiedliche Anlagenkosten als auch die variablen Kosten. Die Zusammensetzungen der Materialkosten für die betrachteten einzelnen Prozesse sind:

Konfektionstechnologie / flächige Halbzeuge:

$$k_{M;HZ} = VB_{HZ} + VL_{HZ} \quad (7.5)$$

Tailored-Fiber-Placement:

$$k_{M;TFP} = (FL_{TFP;fix;o} \times FL_{TFP;fix;u} \times L_{Naht;TFP} \times MK_{Garn}) + (L_{Naht;TFP} \times MK_{Fasern}) \quad (7.6)$$

Online-Bebinderung:

$$k_{M;I-DFP} = (VL_{Online} \times MK_{Fasern}) + MK_{Binder} \quad (7.7)$$

7.3 Analyse der Herstellungskosten

Die Herstellungskosten des Demonstrationsbauteiles für die drei bewerteten Preformingverfahren sind in Abbildung 7.3 dargestellt, wobei eine Normierung der Werte nach dem Online-Bebinderungsverfahren vorgenommen wurde. Die Herstellungskosten beziehen sich auf eine angenommene zu fertigende Stückzahl von 10.000 Stück

pro Jahr. Die Kostenparameter der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind im Anhang aufgeführt. Die Herstellung des Demonstrationsbauteiles mit lokaler Verstärkung aus flächigen Halbzeugen ist $\approx 3,7\%$, im Tailored-Fiber-Placement Verfahren $\approx 8,3\%$ teurer als bei dem in dieser Arbeit gezeigtem Online-Bebinderungsverfahren.

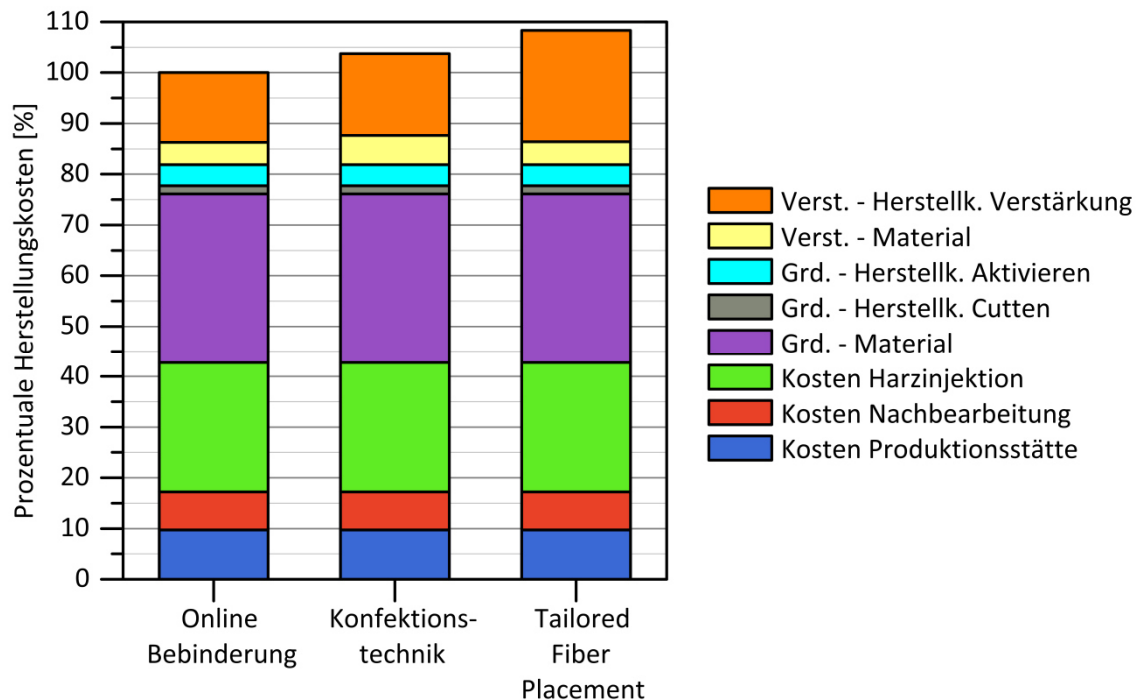


Abbildung 7.3: Vergleich der normierten Herstellungskosten für das definierte Bauteil

Ein detaillierter Blick auf die Herstellungskosten der Preformingprozesse zeigt die Ursachen für die Kostenreduktion durch die Online-Bebinderung. In Abbildung 7.4 sind die Material- als auch die Herstellungskosten aufgetragen, identische Rahmenbedingungen wie in Abbildung 7.3. Das Ausgangsmaterial ist bei der Online-Bebinderung am günstigsten, da hier die lokale Verstärkung direkt aus dem Ausgangsmaterial (Roving) und einer sehr geringen Bindermenge (5 Gew.-%) hergestellt wird. Beim TFP-Prozess kommt anstelle des Bindermaterials ein Nähfaden (PES) zur Fixierung des Rovings zum Einsatz. Dessen Grundpreis pro Ablegelänge ist um den Faktor 2,4 höher als der des verwendeten Pulverbindermaterials. Im Vergleich hierzu sind die Materialkosten der lokalen Verstärkung aus flächigen Halbzeugen um $\approx 31,5\%$ teurer, was an den Herstellungskosten für das Ausgangsmaterial und dem Materialverschnitt liegt. Aus einem Roving muss zuerst ein flächiges Halbzeug hergestellt werden, bevor dieses im nächsten Schritt der Herstellung auf die gewünschte Form zugeschnitten werden kann. Die Herstellungskosten liegen im Vergleich zur

Online-Bebinderung ebenfalls höher, da die einzelnen Lagen der lokalen Verstärkung separat geschnitten und auf der Grundstruktur platziert werden müssen. Zur Fixierung der Lagen muss ein zusätzlicher Aktivierungsschritt erfolgen, welches die Kosten nochmals erhöht. Der teuerste Herstellungsprozess ist der TFP Prozess, da hier die Ablegerate (Materialmenge pro Zeit) der Nähmaschine stark begrenzt ist.

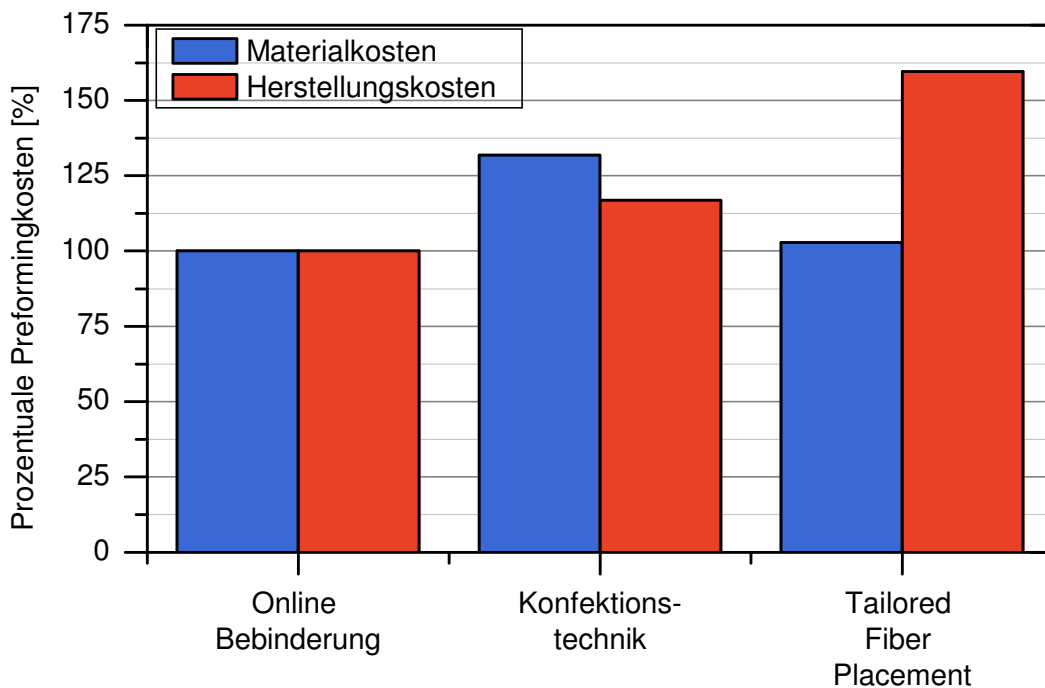


Abbildung 7.4: Prozentuale Verteilung der Preformingkosten

Die bisherige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde anhand einer zu fertigenden Stückzahl von 10.000 Stk. / a berechnet. Bei Variation der Stückzahl ist es möglich, dass sich die Unterschiede zwischen den Fertigungsmethoden oder auch die Reihenfolge der wirtschaftlichsten Fertigungsmethode ändern. In Abbildung 7.5 sind die prozentualen Stückkosten für das herzustellende Bauteil in Abhängigkeit der Produktionsmenge aufgetragen. Für die Normierung der Stückkosten wurde eine Stückzahl von 5.000 Bauteilen pro Jahr angenommen. Die drei unterschiedlichen Herstellungsmethoden zeigen einen identischen Kurvenverlauf auf, welcher sich asymptotisch einem Grenzwert, welcher dem der Materialkosten entspricht, nähert. In einer Detailbetrachtung der prozentualen Kostenverläufe ist beispielsweise die Kapazitätsgrenze für das TFP-Verfahren erreicht. Eine Erweiterung der Produktionskapazität ist nur mittels einer Erweiterung des Maschinenparks möglich, weswegen die Gesamtkosten sprunghaft ansteigen.

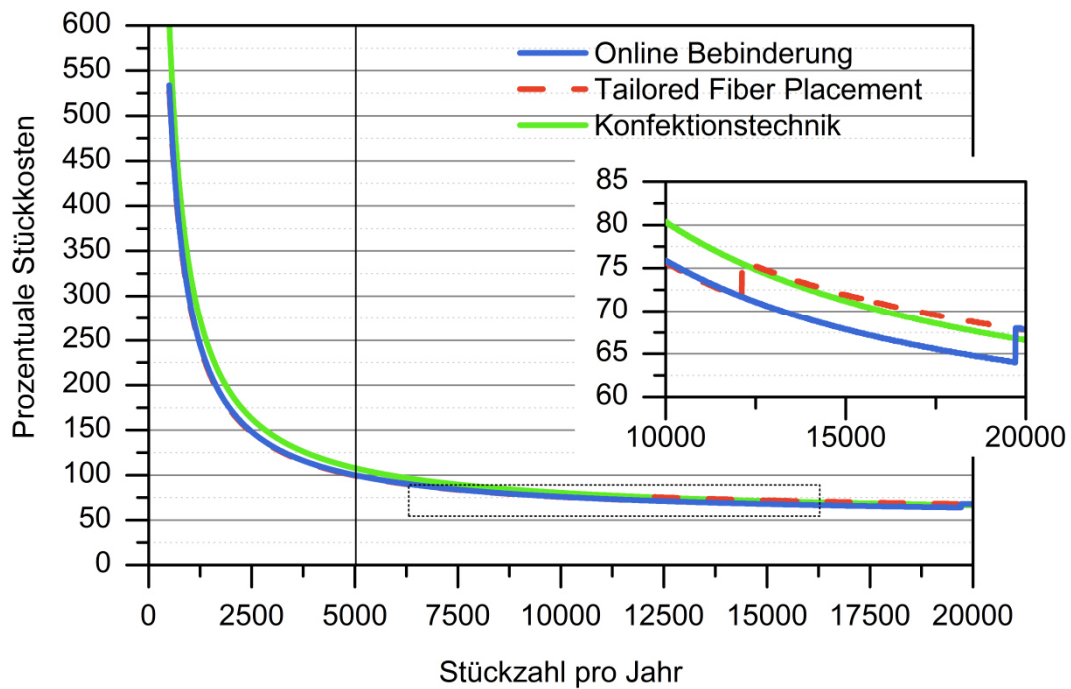


Abbildung 7.5: Prozentuale Stückkosten in Abhängigkeit der zu fertigenden Bauteile pro Jahr

Fazit: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Abhängigkeit des herzustellenden Bauteiles, der Stückzahl als auch der Menge der lokalen Verstärkung, können die Herstellungsmethoden in ihrer Wirtschaftlichkeit variieren. In dem hier gezeigten Beispiel ist die Herstellung mittels Online-Bewehrung die wirtschaftlichste Fertigungsmethode. Im Gegensatz hierzu wäre für ein lokal verstärktes Bauteil mit einer kleinen Anzahl an Verstärkungspunkten (z. B. eine Lochverstärkung) eine andere Methode, wie das TFP Verfahren wirtschaftlicher. Im Vorfeld einer Produktionsplanung ist dies für die Produktionsauswahl mit zu berücksichtigen.

8. Zusammenfassung

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur Online-Bebinderung von trockenen Verstärkungsfasern für die Herstellung einer Preform innerhalb der LCM-Prozesskette entwickelt und ökonomisch gegen zwei Alternativverfahren bewertet.

Während im Ausgangsverfahren des Dry-Fiber-Placements trockene Halbzeuge mit Binderpartikel zugekauft werden müssen, werden mit dem hier entwickelten Verfahren trockene Standardrovings direkt im Ablegeprozess mit Binderpartikel bebindert. Dies reduziert zum einen die Prozesskette, was eine Reduktion der Kosten und damit eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit bedeutet und zum anderen werden die Freiheitsgrade innerhalb des Ablegeprozesses erhöht. Sowohl die Variabilität der eingesetzten Materialien, d. h. eine beliebige Auswahl an Verstärkungsfasern und Binderpartikelsystemen, die Bindermenge als auch die Rovingbreite kann variabel den Anforderungen an das Bauteil angepasst werden. Die Bindermenge sowie die Rovingbreite können direkt im Ablegeprozess online verändert bzw. angepasst werden, womit die Bauteilperformance, die Infiltrationsfähigkeit und/oder der Bedeckungsgrad variabel innerhalb eines Bauteiles einstellbar ist.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden die einzelnen Module entwickelt, gefertigt und an einem Offline-Bebinderungsprüfstand getestet und optimiert. Mittels des Prüfstandes war es möglich Binderhalbzeuge mit unterschiedlichen Bindermengen und Bindertypen herzustellen. Ein robotergestütztes Ablegesystem wurde für die Herstellung der Preforms verwendet, welche sowohl trocken als auch infiltriert getestet wurden. Eine Abhängigkeit der mechanischen Performance vom Bindergehalt konnte festgestellt werden, wobei mit steigendem Bindergehalt die Bauteilperformance tendenziell reduziert wird. Einen größeren Einfluss auf die mechanischen Kennwerte hat die Auswahl des Bindertypes. Die mechanische Performance zeigte hierbei klar, dass bei Auswahl eines an das Harz angepassten Binders (ideale Kompatibilität) die besten Eigenschaften resultieren. Ebenso zeigte sich, dass eine 12k Kohlenstofffaser sowohl von der Infiltrierbarkeit als auch von der mechanischen Performance einer 50k Heavy-Tow Kohlenstofffaser überlegen ist, welches sich jedoch aufgrund der höheren Materialkosten und längeren Prozesszeiten negativ auf die Kosten auswirkt.

Innerhalb der Kostenbewertung wurde das entwickelte Verfahren für ein Demonstrationsbauteil mit zwei alternativen Herstellungsmethoden, der Konfektionstechnik und

dem Tailored-Fiber-Placement verglichen. Hierbei zeigte sich, dass durch eine Nutzung der Ausgangsmaterialien, also der Verstärkungsfasern und der Binderpartikel, die Kosten für den Gesamtprozess um $\approx 3,7\%$ gesenkt werden können. Das Ranking der Wirtschaftlichkeit zwischen den einzelnen Prozessen kann, je nach Art der lokalen Verstärkung sowie der Größe des Bauteiles bzw. der lokalen Verstärkung variieren. Für eine z. B. lokale Verstärkung von Bohrungen ist meist das aufgezeigte TFP-Verfahren wirtschaftlicher. Das hier aufgezeigte Verfahren der Online-Bebinderung ist für das lokale Verstärken von flächigen Strukturen oder das lastgerechte Herstellen einer kompletten flächigen Struktur aus Rovings wirtschaftlich einsetzbar. Die Anforderungen der Industrie nach kostengünstigen, flexiblen und belastungsorientierten FKV-Verarbeitungsverfahren kann durch das entwickelte Konzept der Online-Bebinderung erfüllt werden. Hauptverantwortlich für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses für flächige Bauteile ist die Produktherstellung aus Rovings, dem Grundmaterial der Faserverstärkung.

9. Literatur

- [1] Neitzel, M., Mitschang, P., Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [2] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Werkstoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [3] Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A., Schulte, R. T., Peters, F., Kühmann, T., Waldmann, T.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen - Perspektiven für den deutschen Maschinen-und Anlagenbau. Roland Berger Strategy Consultants, 2012.
- [4] Witten, E., Kraus, T., Kühnel, M.: In: Composites-Marktbericht 2014. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. 2014.
- [5] Friedrich, M.: Perspektiven einer automatisierten RTM-Fertigung. In: DLR Wissenschaftstag 2009, Braunschweig, 2009
- [6] Beier, U., Sandler, J. K. W., Altstädt, V., Hülder, G., Schmachtenberg, E., Spanner, H., Weimer, C., Roser, T., Buchs, W., Hassler, U.: Kosteneffiziente Preformprozesskette für komplexe Hochleistungs-Faserverbund-Strukturbauteile. Zeitschrift Kunststofftechnik, Vol. 5, Heft 4 (2009), S. 279
- [7] Dierssen, T., Bloedorn, C., Mehlenhoff, T.: Solution for Dry-Fiber-Placement with a Standard Articulating Robot System. SAE Technical Paper 2010-01-1853, 2010.
- [8] Mills, A.: Automation of carbon fibre preform manufacture for affordable aerospace applications. Composites Part A - Applied Science and Manufacturing, Vol. 32, Heft 7 (2001), S. 955-962
- [9] Drechsler, K.: Latest developments in stitching and braiding technologies for textile preforming. In: SAMPE 2004, Long Beach, CA, May 16-20, 2004.
- [10] Schneider, M., Weimer, C., Hagle, F., Bottcher, H. H.: Automated preform-RTM production. Kunststoffe-Plast Europe, Vol. 93, Heft 6 (2003), S. 40-+
- [11] Weimer, C.: Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde. IVW Schriftenreihe Band 31, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2002

- [12] Grieser, T.: Entwicklung eines Profil-Preforming Systems für die Herstellung von Versteifungsstrukturen. Maschinenmarkt: 2014.
- [13] Ichard, J.-C.: Development and substantiation of an innovative aircraft passenger door structure made with advanced preform and RTM Processes. In: JEC PARIS FORUMS, Paris, 2011
- [14] Weiland, F.: Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen. IVW Schriftenreihe Band 104, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2013
- [15] Rieber, G., Mitschang, P.: 2D Permeability changes due to stitching seams. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, Heft 1 (2010), S. 2-7
- [16] Ogale, A., Mitschang, P.: Tailoring of Textile Preforms for Fibre-reinforced Polymer Composites. Journal of Industrial Textiles, Vol. 34, Heft 2 (2004), S. 77-96
- [17] Ogale, A., Weimer, C., Mitschang, P.: Selection of sewing threads for preform manufacturing. Advanced Composites Letters, Vol. 13, Heft 4 (2004), S. 199-206
- [18] Grieser, T., Azizi, S., Mitschang, P.: INFLUENCE OF TEXTILE PARAMETERS ON THE MANUFACTURING OF CONTINUOUSLY FORMED PREFORM PROFILES. In: COMPOSITES WEEK @ LEUVEN AND TEXCOMP-11 CONFERENCE, Leuven, September 16-20, 2013
- [19] Grieser, T., Mitschang, P.: Development of a Continuous Profile Preforming System for FRPC. In: IVW Composite Colloquium 2012, Kaiserslautern, 2012
- [20] Grieser, T., Mitschang, P.: Kontinuierliches Profil-Preforming für Versteifungsstrukturen. Lightweight Design, Vol. 7, Heft 4 (2014), S. 24-29
- [21] Thoma, B., Weidenmann, K. A., Henning, F.: Chemical-Stitching, ein vielversprechender Ansatz für die automatisierte Preform- Fertigung. Zeitschrift Kunststofftechnik, Vol. 8, Heft 5 (2012), S. 491
- [22] Chen, J., Backes, D., Jayaraman, K.: Dynamics of binder displacement in liquid molding. Polymer composites, Vol. 17, Heft 1 (1996), S. 23-33
- [23] Rohatgi, V., Lee, L. J.: Moldability of tackified fiber preforms in liquid composite molding. Journal of Composite Materials, Vol. 31, Heft 7 (1997), S. 720-744

- [24] Shih, C.-H., Lee, L. J.: Tackification of Textile Fiber Preforms in Resin Transfer Molding. *Journal of Composite Materials*, Vol. 35, Heft 21 (2001), S. 1954–1981
- [25] Brody, J. C., Gillespie, J. W.: Reactive and non-reactive binders in glass/vinyl ester composites. *Polymer composites*, Vol. 26, Heft 3 (2005), S. 377-387
- [26] Tanoglu, M., Robert, S., Heider, D., McKnight, S. H., Brachos, V., Gillespie, J. W.: Effects of thermoplastic preforming binder on the properties of S2-glass fabric reinforced epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 21, Heft 3 (2001), S. 187-195
- [27] Töpker, J.: Das Megacity Vehicle. In: CCEV Automotive Forum 2011, Ingolstadt, 29. - 30. Juni 2011, 2011
- [28] Kümpers, F.-J.: Preforming als Schlüsseltechnologie für die Faserverbund-Serienproduktion. In: CCEV Automotive Forum 2011, Ingolstadt, 29. - 30. Juni 2011, 2011
- [29] CTC GmbH Stade: CTC Ausstattung. <http://ctc-gmbh.com/das-ctc/ausstattung/> (24.02.2012)
- [30] CTC GmbH Stade: CTC Technologie - Vorformen. <http://ctc-gmbh.com/technologien/> (24.02.2012)
- [31] SPUNFAB LIMITED; Product Overview. <http://www.spunfab.com/> (12.12.2014)
- [32] EMS-CHEMIE HOLDING AG; Produktübersicht. <http://www.emsgriltech.com/> (11.12.2014)
- [33] Henne, M.: IMPROVEMENT OF THE TOUGHNESS OF EPOXY RESIN SYSTEMS USING THERMOPLASIC BINDERS. In: Technical Colloquium „Advances in Composites“, Salzburg, 05.-06.07.2012, 2012
- [34] Gräf, T.: Alles außer Seide. *MONTAGEtechnik*, Vol. Heft 01 (2011), S. 4
- [35] Schutzrecht US 6,852,259 B2 (Sep. 18, 2002). Rajendran, S. M., Pr.: Feb. 8, 2005
- [36] Gries, T., Klingele, J.: Automatisierter Auftrag und Aktivierung von Bindern am ITA-Preformcenter. In: SAMPE-Symposium, Aachen, 17.02.2011, 2011
- [37] NLR Aerospace Vehicles Division: Automated Preform Fabrication by Dry Tow Placement. 2009.

- [38] Rudd, C. D., Turner, M. R., Long, A. C., Middleton, V.: Tow placement studies for liquid composite moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, Heft 9 (1999), S. 1105-1121
- [39] Mills, A., Patel, Z., Dell'Anno, G., Frost, M.: Resin transfer moulding: Novel fabrics and tow placement techniques in highly loaded carbon fibre composite aircraft spars. *Sampe Journal*, Vol. 43, Heft 3 (2007), S. 67-72
- [40] Shirinzadeh, B., Cassidy, G., Oetomo, D., Alici, G., Ang Jr, M. H.: Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23, Heft 4 (2007), S. 380-394
- [41] Yan, L., Chen, Z. C., Shi, Y., Mo, R.: An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, Heft 3 (2014), S. 277-286
- [42] Belhaj, M., Deleglise, M., Comas-Cardona, S., Demouveau, H., Binetruy, C., Duval, C., Figueiredo, P.: Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms. *Composites Part B: Engineering*, Vol. Heft 50 (2013), S. 107-111
- [43] Gliesche, K., Feltin, D.: Preforming und Tailored Fibre Placement. In: CCEV Arbeitsgruppentreffen Augsburg, 13. November 2009, 2009
- [44] Geßler, A.: The Industrialization of Advanced Composites through Textile Technology. In: SAMPE Swiss / Technical Conference, ETH Zürich, 26.01.2011, 2011
- [45] Compositesworld: Toho Tenax preform technology wins AVK conference award. <http://www.compositesworld.com/news/toho-tenax-preform-technology-wins-avk-conference-award> (07.07.2014)
- [46] Kraus, J. Bauteilgerechtes 3D-Preforming für die Serie. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/konstruktion/werkstoffe/articles/384074/> (07.07.2014)
- [47] Giesel Verlag GmbH: Strukturbauteile mal anders. <http://www.k-zeitung.de/strukturbauteile-mal-anders/150/1086/78525/> (07.07.2014)
- [48] Schneider, M.: Carbon Fiber Materials for Automated Processes. In: Toho Tenax Symposium Carbon Composite Innovations 2011, 2011
- [49] Arold, M. S. B., Beaumont, M.: Fertigung von Flugzeugspannen auf Basis der unidirektionalen Flechttechnologie. *Lightweight Design*, Vol. 3, Heft 5 (2010), S. 16-22

- [50] Tada, M., Uozumi, T., Nakai, A., Hamada, H.: Structure and machine braiding procedure of coupled square braids with various cross sections. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, Heft 10 (2001), S. 1485-1489
- [51] Potluri, P., Rawal, A., Rivaldi, M., Porat, I.: Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, Heft 6 (2003), S. 481-492
- [52] Neitzel, M., Mitschang, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 2004.
- [53] Henkel, F., Baumgart, G., Brockmanns, K.-J.: Automatisierte Fertigung von Spantpreforms mittels Flechttechnologie. In: 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland, Aachen, 17.02.2011, 2011
- [54] Meyer, O.: Fiber Patch Preforming. In: Bayern Innovation, Cluster Treff, München, 18.11.2008, 2008
- [55] Mattheij, P., Gliesche, K., Feltin, D.: 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, Heft 6 (2000), S. 571-581
- [56] Spickenheuer, A., Uhli, K., Gliesche, K., Heinrich, G., Albers, A., Majic, N.: Steifigkeitsoptimierung von Faserverbundbauteilen für den extremen Leichtbau. In: 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz, 30.09. - 01.10.2009 2009
- [57] Gliesche, K., Hübner, T., Orawetz, H.: Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an "open-hole" tension plate from carbon/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 1 (2003), S. 81-88
- [58] Crothers, P. J., Drechsler, K., Feltin, D., Herszberg, I., Kruckenberg, T.: Tailored fibre placement to minimise stress concentrations. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, Heft 7 (1997), S. 619-625
- [59] Schmucker, W. J.: TFP-RTM-Bindertechnologie in hochbelasteten Kohlefaserbauteilen. *Lightweight Design*, Vol. 1, Heft (2010), S. 6
- [60] Spickenheuer, A., Schulz, M., Gliesche, K., Heinrich, G.: Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. *Plastics Rubber and Composites*, Vol. 37, Heft 5-6 (2008), S. 227-232

- [61] Weimer, C., Preller, T., Mitschang, P., Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part II: holes. Composites Part a- Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, Heft 11 (2000), S. 1269-1277
- [62] Drechsler, K.: Automatisierte textile Vorformlingtechnologie - Automated textile Preforming Technologies. In: Bayern Innovativ - Cluster Treff, München, 03.03.2011, 2011
- [63] Compositence GmbH: <http://compositence.firma.cc> (31.10.2014)
- [64] Walter, A.: Innovative Ansätze für neue Herstellungsverfahren - Preforming -. In: Carbon Composites - Arbeitsgruppe Fertigungstechnik, Augsburg, 19.11.2010, 2010
- [65] Plath, A.: Preform Technology for High Volume Manufacturing of Long Fiber Reinforced Structures. In: DLR Wissenschaftstag 2014, Braunschweig, 2014
- [66] Michaeli, W., Pöhler, M.: 3D-Faserspritzen mit Faserorientierung. Lightweight Design, Vol. 3, Heft 6 (2010), S. 57-62
- [67] Graupner, R.: Preform Technology for High Volume Manufacturing of Long Fiber Reinforced Structures. In: LCC Symposium: A comprehensive approach to Carbon Composites Technology, München, 2014
- [68] Schutzrecht DE000000715801A (18. Februar 1938). Kern, R., Pr.: 4. Dezember 1941
- [69] Schutzrecht DE102007012607B4 (13.03.2007). Meyer, O., Pr.: 26.02.2009
- [70] Schutzrecht EP 0 837 162 81 (18.02.2004). KAWABE, K., TOMODA, S., Pr.: 25.05.1997
- [71] Schutzrecht 3,873,389 (25.03.1975). Clare, G. D., Pr.: 13.11.1972
- [72] Beresheim, G., Latrille, M., Schledjewski, R.: Towards Grater Automation: New Development Stage in Thermoplastic Tape- Placement Technology. Kunststoffe Plast Europe, Vol. Heft Vol. 91, No. 12 (2001), S. 33-34
- [73] Khan, M. A.: Experimental and Simulative Description of the Thermoplastic Tape Placement Process with Online Consolidation. IVW Schriftenreihe Band 94, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2010
- [74] Mack, J., Mitschang, P.: CHALLENGES FOR THE MANUFACTURING OF A LATTICE STRUCTURE FUSELAGE SECTION WITH PREPREG LAY-UP TECHNOLOGY. In: 19th International Conference of Composite Materials Montreal, 01.08.2013, 2013

- [75] CORIOLIS COMPOSITES SAS; Fiber placement head – specification <http://www.coriolis-composites.com/products/fiber-placement-process.html> (01.11.2014)
- [76] Khan, M. A., Mitschang, P., Schledjewski, R.: Tracing the Void Content Development and Identification of its Effecting Parameters During in situ Consolidation of Thermoplastic Tape Material. *Polymers & polymer composites*, Vol. 18, Heft 1 (2010), S. 1-15
- [77] Schledjewski, R., Miaris, A.: Thermoplastic Tape Placement by Means of Diode Laser Heating. In: *SAMPE 2009*, Baltimore, 2009
- [78] Pistor, C. M., Yardimici, M. A., Güceri, S. I.: On-line consolidation of thermoplastic composites using laser scanning. *Composites: Part A*, Vol. Heft 30 (1999), S. 1149-1157
- [79] Schledjewski, R., Schlarb, A. K.: In-situ consolidation of thermoplastic tape material - Effects of tape quality on resulting part properties In: *SAMPE 2007*, Baltimore, June 3rd - 7th, 2007. 2007
- [80] Guan, X., Pitchumani, R.: Modeling of spherulitic crystallization in thermoplastic tow-placement process: spherulitic microstructure evolution. *Composites Science and Technology*, Vol. 64, Heft 9 (2004), S. 1363-1374
- [81] Schledjewski, R.: Thermoplastic tape placement process - in situ consolidation is reachable. *Plastics Rubber and Composites*, Vol. 38, Heft 9-10 (2009), S. 379-386
- [82] Khan, M. A., Schledjewski, R.: Influencing factors for an online consolidating thermoplastic tape placement process. In: *ICCM 17*, Edinburgh 2009
- [83] Khan, M. A., Mitschang, P., Schledjewski, R.: Identification of Some Optimal Parameters to Achieve Higher Laminate Quality through Tape Placement Process. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 29, Heft 2 (2010), S. 98-111
- [84] Schlimbach, J.: Prozessbasierte Kostenmodellierung- Quantifizierung und Implikationen von Bauteilkomplexität am Beispiel des Thermoplast-Tapelegens: Entwicklung eines prozessbasierten Kostenmodells, das die Komplexität basierend auf Prozessphysik beschreibt und so seriöse Kostenvorhersagen ermöglicht. *IVW Schriftenreihe Band 33*, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2004

- [85] Schlimbach, J., Mitschang, P.: Process-based cycle time estimation for the thermoplastic tape placement. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 19, Heft 5 (2006), S. 507-529
- [86] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: *Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen*. Springer, 1996.
- [87] Darcy, H.: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: 1856.
- [88] Adams, K. L., Rebenfeld, L.: In-Plane Flow of Fluids in Fabrics - Structure/Flow Characterization. *Textile Research Journal*, Vol. 57, Heft 11 (1987), S. 647-654
- [89] Gebart, B. R.: Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, Heft 8 (1992), S. 1100-1133
- [90] Stöven, T.: Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von flächigen Faserhalbzeugen. IVW Schriftenreihe Band 45, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2004
- [91] Huber, U.: Zur methodischen Anwendung der Simulation der Harzinjektionsverfahren. IVW Schriftenreihe Band 26, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2001
- [92] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik. IVW Schriftenreihe Band 28, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2001
- [93] Stadtfeld, H.: Entwicklung einer Messzelle zur Bestimmung von Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerten bei flächigen Faserhalbzeugen. IVW Schriftenreihe Band 70, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2006
- [94] Stadtfeld, H. C., Mitschang, P., Weimer, C., Weyrauch, F.: Standardizeable 2D-Permeability Measurement Work Cell for Fibrous Materials. In: 6. Internationale AVK-Tagung, Baden-Baden, 2003
- [95] Stadtfeld, H. C., Weyrauch, F., Mitschang, P.: Standardizeable Permeability Work Cell for Fibrous Reinforcements. In: FPCM 7 - The 7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Delaware, July 7-9, 2004
- [96] Kissinger, C., Mitschang, P., Neitzel, M., Roder, G., Haberland, R.: Continuous on-line permeability measurement of textile structures. In: *Bridging the Centuries with Sampe's Materials and Processes Technology*, Vol 45, Books 1 and 2, 2000

- [97] Becker, D., Brzeski, M., Linster, D., Mitschang, P.: Preform compaction and deformation during through-the-thickness impregnation. In: ICCM19, Montreal, 2013
- [98] Arnold, M., Rieber, G., Mitschang, P.: Permeability as the key parameter for short cycle times. *Kunststoffe international*, Vol. 3, Heft (2012), S. 25-28
- [99] Weimer, C.: Preform-engineering: applied sewing technologies to incorporate part and process functions into dry textile reinforcements. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 14 (2003), S. 2089-2098
- [100] Brouwer, W. D., van Herpt, E. C. F. C., Labordus, M.: Vacuum injection moulding for large structural applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, Heft 6 (2003), S. 551-558
- [101] Hammami, A., Gebart, B. R.: Analysis of the vacuum infusion molding process. *Polymer composites*, Vol. 21, Heft 1 (2000), S. 28-40
- [102] RocTool: RocTool adapts Cage System for RTM. *Reinforced Plastics*, Vol. 51, Heft 6 (2007), S. 15
- [103] Mitschang, P., Grebel, K.: Zykluszeitverkürzung bei der Verarbeitung von FKV durch den Einsatz variothermer Werkzeuge. In: Fachtagung CARBON COMPOSITES, Augsburg, 22. Nov. 2012, 2012
- [104] Flemming, M., Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Eigenschaften: Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte. 4, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
- [105] Mitschang, P., Mack, J., Becker, D., Hildebrandt, K., Medina, L.: Potenziale neuer Matrixpolymere für die FKV-Bauteilfertigung. *Lightweight Design*, Vol. 2, Heft (2014), S. 14-21
- [106] Hillermeier, R., Hasson, T., Friedrich, L., Ball, C.: Advanced Thermosetting Resin Matrix Technology for Next Generation High Volume Manufacturer of Automotive Composite Structures. In: ACMA 13, 30.01.2013, 2013
- [107] Baskaran, M., Ortiz de Mendibil, I., Sarrionandia, M., Aurrekoetxea, J., Acosta, J., Argarate, U., Chicoc, D.: MANUFACTURING COST COMPARISON OF RTM, HP-RTM AND CART FOR AN AUTOMOTIVE ROOF. In: 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Sevilla, June 22-26, 2014. 2014

- [108] Michaeli, W., Fischer, K.: Spaltimprägnierverfahren für schnellere Herstellung von Hochleistungsbauteilen. *Lightweight Design*, Vol. 6, Heft 1 (2010), S. 48-54
- [109] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: EVo: Endkonturnahe RTM-Bauteile in hohen Stückzahlen. <http://www.pinetteemidecau.eu/de/Neueste-Herstellungen/evo-endkonturnahe-rtm-bauteile-in-hohen-stueckzahlen.html> (26.01.2015)
- [110] Le Riche, R., Saouab, A., Bréard, J.: Coupled compression RTM and composite layup optimization. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 15 (2003), S. 2277-2287
- [111] Merotte, J., Simacek, P., Advani, S.: Resin flow analysis with fiber preform deformation in through thickness direction during Compression Resin Transfer Molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, Heft 7 (2010), S. 881-887
- [112] Schlimbach, J.: Ökonomische Prozessanalyse und Modellintegration zur Kostenberechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden. IVW Schriftenreihe Band 64, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2006
- [113] Kim, C. E.: *Composites cost modeling: complexity*. Massachusetts Institute of Technology, 1993
- [114] Schierenbeck, H.: *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. Oldenbourg Verlag, 2003.
- [115] Corsten, H.: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg Verlag, 2004.
- [116] Corsten, H., Reiß, M. *Betriebswirtschaftliche Vergleichsformen*. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2012/7883/> (13.01.2015)
- [117] SGL TECHNOLOGIES GmbH: Datenblatt SIGRAFIL C - Carbonfaser auf der Basis von PAN. http://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/products/product-groups/cf/carbon-fiber-continuous-tow/SIGRAFIL_C_Carbonfaser_auf_der_Basis_von_PAN_d.pdf (18.10.2014)
- [118] MOMENTIVE: Datasheet - EPIKOTE™ Resin 05311. 2014. - Firmenschrift
- [119] Huntsman Advanced Materials: Datasheet - Resin XB 3366. 2011. - Firmenschrift
- [120] Huntsman Advanced Materials: Raising performance through fast processing. 2012. - Firmenschrift

- [121] Wu, H., Xu, J., Liu, Y., Heiden, P.: Investigation of readily processable thermoplastic-toughened thermosets. V. Epoxy resin toughened with hyperbranched polyester. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 72, Heft 2 (1999), S. 151-163
- [122] MOMENTIVE: Datasheet RIMR935 / RIMH 936. 2014. - Firmenschrift
- [123] TRINAMIC: Datenblatt - Schrittmotor QSH42-51-049. 2014. - Firmenschrift
- [124] TRINAMIC: Datenblatt - Schrittmotor QSH2818-51-07 2014. - Firmenschrift
- [125] Mack, J., Mitschang, P.: Efficient and flexible technology for binder roving manufacturing. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, eingereicht in 2015
- [126] Vetter, G.: *Handbuch Dosieren*. Vulkan-Verlag GmbH, 2002.
- [127] TOLEDO, M.: Datenblatt - XP10002S. 2014. - Firmenschrift
- [128] Vibration, N.: Datenblatt - Netter Druckluft-Kolbenvibratoren - Serie NTS. 2014. - Firmenschrift
- [129] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Datenblatt - Z6 Wägezelle. 2014. - Firmenschrift
- [130] Leister: Datenblatt - Triac S. 2014. - Firmenschrift
- [131] Steeg, M., Schledjewski, R., Schlarb, A. K.: Automation implementation and process development of thermoplastic tape placement for 3-dimensional parts. *Sampe Journal*, Vol. 42, Heft 5 (2006), S. 18-24
- [132] Eckhard, S., Püschel, A.: Volumen-, Temperatur- und Intensitätsmessungen an Knallgasflammen. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 172, Heft 5 (1960), S. 334-347
- [133] Schutzrecht DE102012102841B3 (02.04.2012). Lichtner, J., Mack, J., Steeg, M., Pr.: 11.07.2013
- [134] LUBW Landesanstalt für Umwelt, M. u. N. B.-W. Zusammensetzung der Luft. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18340> (15.11.2014)
- [135] Mack, J., Holschuh, R., Mitschang, P.: Qualitätsanalyse bei Bändchenhalbzeugen. *Lightweight Design*, Vol. 5, Heft (2014), S. 48-53
- [136] Hulcher, A. B., Marchello, J. M., Hinkley, J. A.: Wedge peel testing for automated fiber placement. *Journal of Advanced Materials*, Vol. 31, Heft 3 (1999), S. 37-43

- [137] Klingele, J., Gries, T., Peters, C., Herrmann, A. S., Scheibner, W., Möhring, U.: Automatisierte Prozesskette für das Bindeforming und die qualitätsgesicherte Preformhandhabung. Vol. Heft S.
- [138] Lomov, S. V., Verpoest, I., Peeters, T., Roose, D., Zako, M.: Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 7 (2003), S. 993-1007
- [139] Rieber, G.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. IVW Schriftenreihe Band 96, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2011
- [140] Becker, D., Grieser, T., Arnold, M., Mitschang, P.: Preform-LCM: Schlüsselemente zur Effizienzsteigerung. *Werkstoffe in der Fertigung*, Vol. Heft 6 (2013), S.
- [141] Becker, D., Mitschang, P.: METROLOGICAL CONSIDERATION OF FLOW-INDUCED PREFORM COMPACTION DURING OUT-OF-PLANE PERMEABILITY MEASUREMENT. In: TECOMP-11, LEUVEN, 2013
- [142] Weitzenbock, J. R., Sheno, R. A., Wilson, P. A.: Measurement of three-dimensional permeability. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, Vol. 29, Heft 1-2 (1998), S. 159-169
- [143] Ahn, S. H., Lee, W. I., Springer, G. S.: Measurement of the 3-Dimensional Permeability of Fiber Preforms Using Embedded Fiber Optic Sensors. *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, Heft 6 (1995), S. 714-733
- [144] Stöven, T., Weyrauch, F., Mitschang, P., Neitzel, M.: Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, Heft 6 (2003), S. 475-480
- [145] Kaiser, R., Gottschalk, G.: Elementare Tests zur Beurteilung von Meßdaten: Soforthilfe für statistische Tests mit wenigen Meßdaten. Bibliographisches Institut, 1972.
- [146] Witt, G.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser Verlag, 2006.
- [147] Duhovic, M., Mitschang, P., Bhattacharyya, D.: Modelling approach for the prediction of stitch influence during woven fabric draping. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, Heft 8 (2011), S. 968-978
- [148] Huebner, M., Diestel, O., Sennewald, C., Gereke, T., Cherif, C.: Simulation of the drapability of textile semi-finished products with gradient-drapability

characteristics by varying the fabric weave. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. Heft (2012), S. 88-93

- [149] Dubbel, H., Beitz, W., Grote, K.: *Dubbel—Taschenbuch für den Maschinenbau*. 19. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.

10. Anhang

A. Berechnung der Flächenpressung unterhalb der Konsolidierungsrolle:

Innerhalb des Ablegeprozesses werden die erwärmten Kohlenstofffasern (mit Binderpartikel) unterhalb der Konsolidierungsrolle auf die Werkzeugoberfläche oder auf die bereits abgelegte Preform gepresst. Für die Berechnung der Flächenpressung ist sowohl die anliegende Kraft als auch die reale Kontaktfläche notwendig (10.1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10.1)$$

Im Falle einer Kontaktfläche zwischen einer zylindrischen Rolle mit einer Ebene (Konsolidierungsrolle & ebener Preform) wird die Flächenpressung mittels der Hertzschen Formel beschrieben (10.2) [149]. Die Bestimmung der Querkontraktionszahl (ν) bei Preforms ist aufgrund der sehr geringen Anhaftung der Fasern zueinander mittels Binderpartikel (keine Matrix) nicht möglich. Mit der Kenntnis der Kontaktfläche (a_k) ist es jedoch möglich die Querkontraktionszahl (Formel (10.4)) zu bestimmen und die Hertzsche Pressung zu berechnen. Zur Bestimmung der Querkontraktionszahl wird Formel (10.3) umgestellt zu Formel (10.4).

$$\sigma_z = \sigma_0 = -\sqrt{\frac{F \times E}{2 \times \pi \times r \times l \times (1 - \nu^2)}} \quad (10.2)$$

$$a_k = \sqrt{\frac{8 \times F \times r \times (1 - \nu^2)}{\pi \times E \times l}} \quad (10.3)$$

$$\nu^2 = 1 - \frac{a_k^2 \times \pi \times E \times l}{8 \times F \times r} \quad (10.4)$$

Der Kurvenverlauf des E-Moduls (Druck) der Preform wird anhand der durchgeführten Kompaktierungsversuche aus Kapitel 5.2.1 berechnet und ist in Abbildung 10.1 abgebildet. Dieser E-Modul Verlauf, in Abhängigkeit von der Flächenpressung, kann mithilfe zweier linearer Trends berechnet werden. In Abhängigkeit der Flächenpressung ist Formel (10.5) bei einer Flächenpressung kleiner 0,25 MPa oder Formel (10.6) für eine Flächenpressung größere als 0,25 MPa anzuwenden.

$$E_{<0,25 \text{ MPa}} = 0 + 1709,66 \times \text{Flächenpressung} \quad (10.5)$$

$$E_{>0,25\text{ MPa}} = -380,057 + 3550 \times \text{Flächenpressung} \quad (10.6)$$

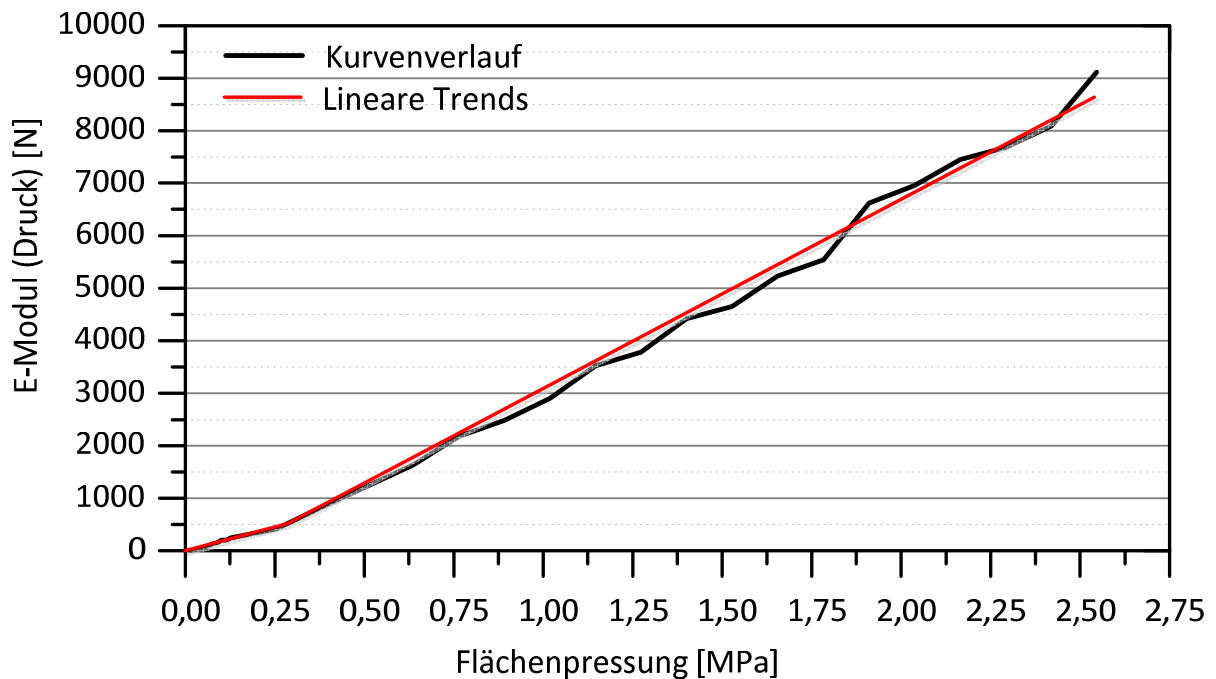
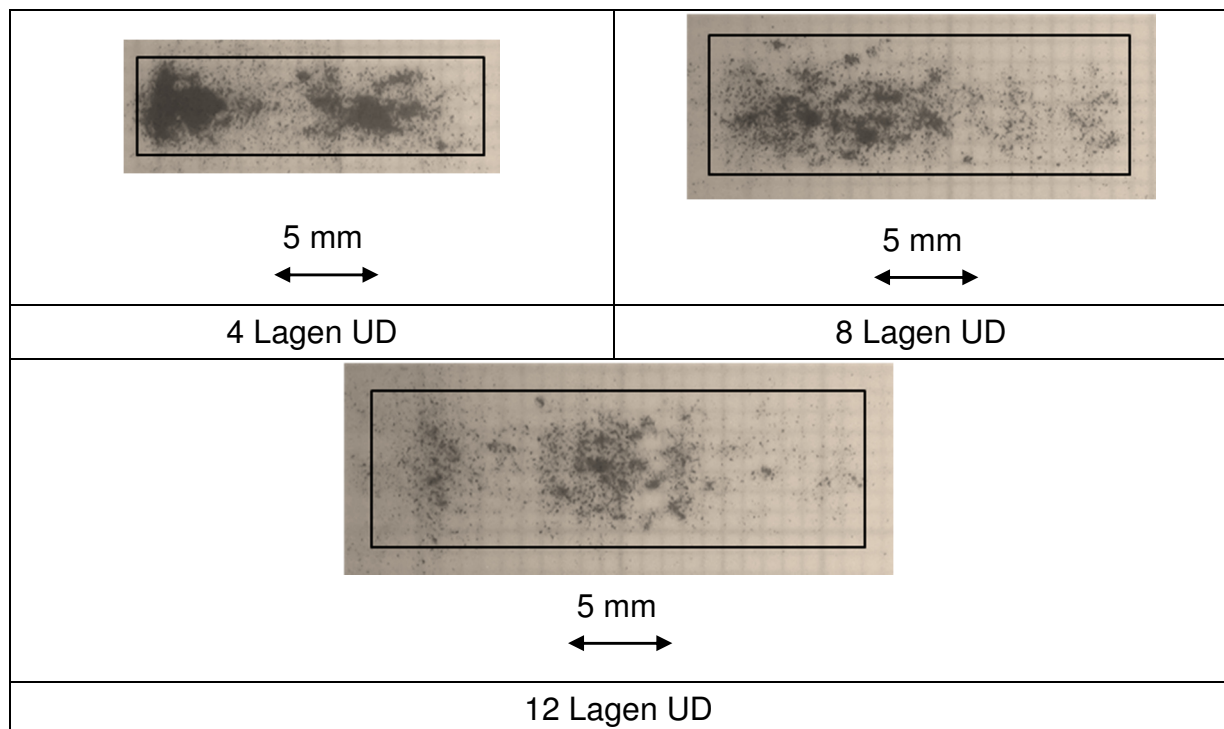


Abbildung 10.1: E-Modul (Druck) in Abhängigkeit der Flächenpressung (30-XB-50-7,06)

Für die Analyse der Flächenpressung wird die Fläche als auch die Kraft der Konsolidierungsrolle benötigt. Zur Ermittlung der Fläche wird unterhalb der Konsolidierungsrolle (a_k) eine drucksensible Folie⁴⁴ eingesetzt. Diese Folie erlaubt eine visuelle Prüfung der Druckverteilung unterhalb der Rolle. Hierfür wurden UD-Preforms mit 4, 8 und 12 Lagen hergestellt und anschließend statisch mit der Konsolidierungsrolle des TLK (Anpressdruck von 3 bar) belastet (Tabelle 10.1). Die Druckverteilung wird hierbei statisch durch die Applizierung der Konsolidierungskraft auf eine Preform ermittelt. Aufgrund des statischen Versuchsaufbaues und der verwendeten, nicht drei dimensional verformbaren drucksensitiven Folien, entsteht eine nur teilweise abgezeichnete Druckverteilung. Mit Kenntnis der Umriss der Kontaktfläche ist es jedoch möglich, den Bereiche der Konsolidierungsrolle festzulegen.

⁴⁴ FUJIFILM, Prescale Film, Typ: LLW

Tabelle 10.1: Druckverteilung unterhalb der Konsolidierungsrolle für 4,8,12 Lagen (30-XB-50-7,06)



Die drucksensible Polymerfolie verändert in Abhängigkeit der Flächenpressung ihre Farbe, sodass die tatsächlich wirkende Fläche vermessen werden kann. In Tabelle 10.2 ist der Anpressdruck in Abhängigkeit der Kontaktfläche und des E-Moduls dargestellt.

Tabelle 10.2: Anpressdruck der Konsolidierungswalze in Abhängigkeit der Lagenanzahl

Anzahl der UD - Lagen	Geometrie des Rechteckes		Kontaktfläche [mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Anpressdruck [N/mm ²]
	Seite A [mm]	Seite B [mm]			
4	16,97	4,8	81,58	12042,1	2,23
8	20,6	6,8	140,52	6832,1	1,30
12	24,23	7,6	184,86	5101,9	0,99

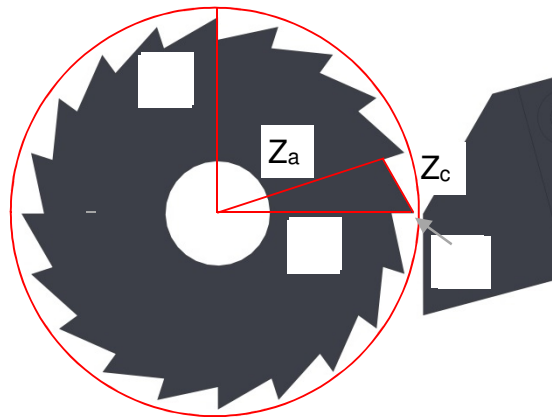
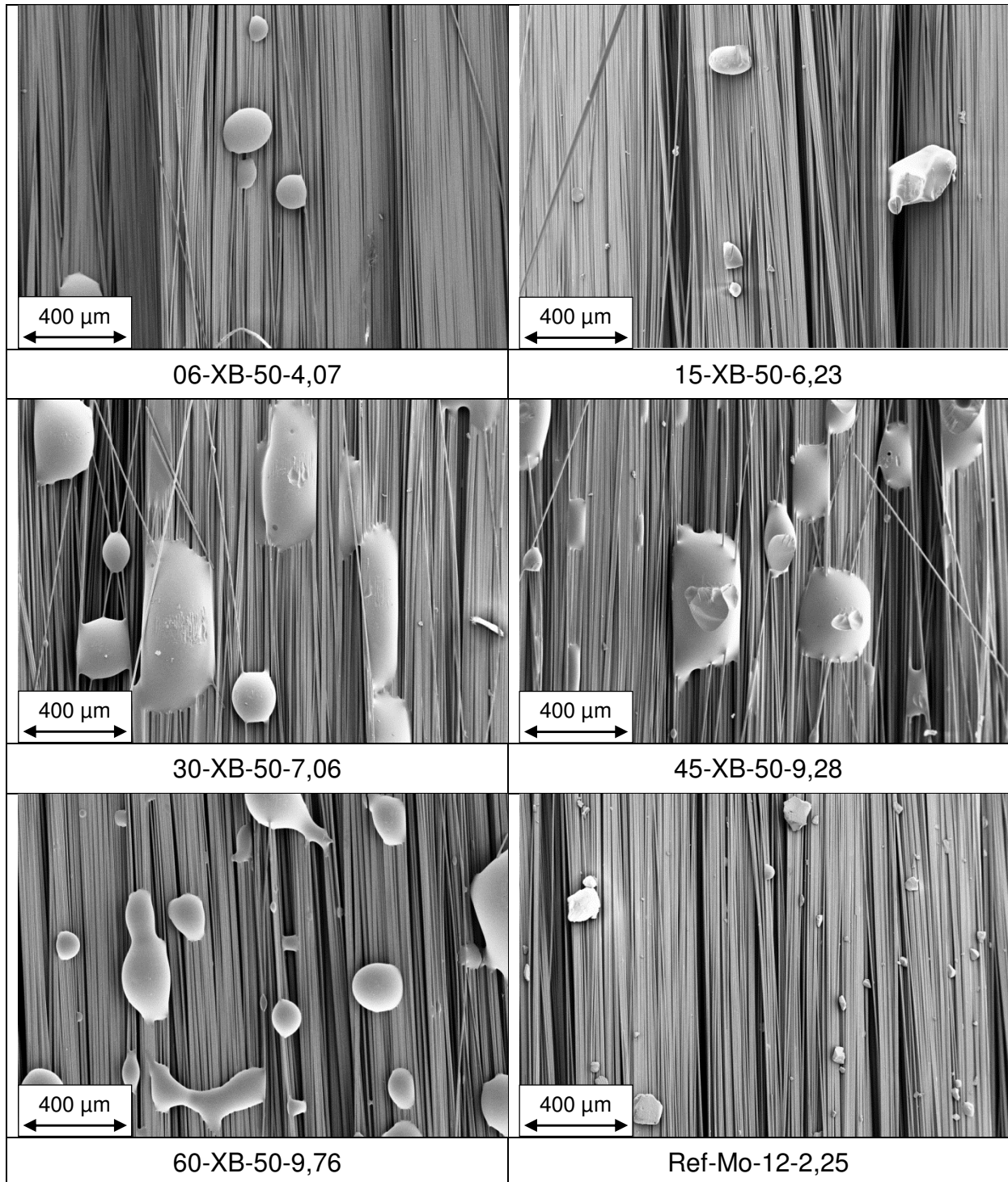
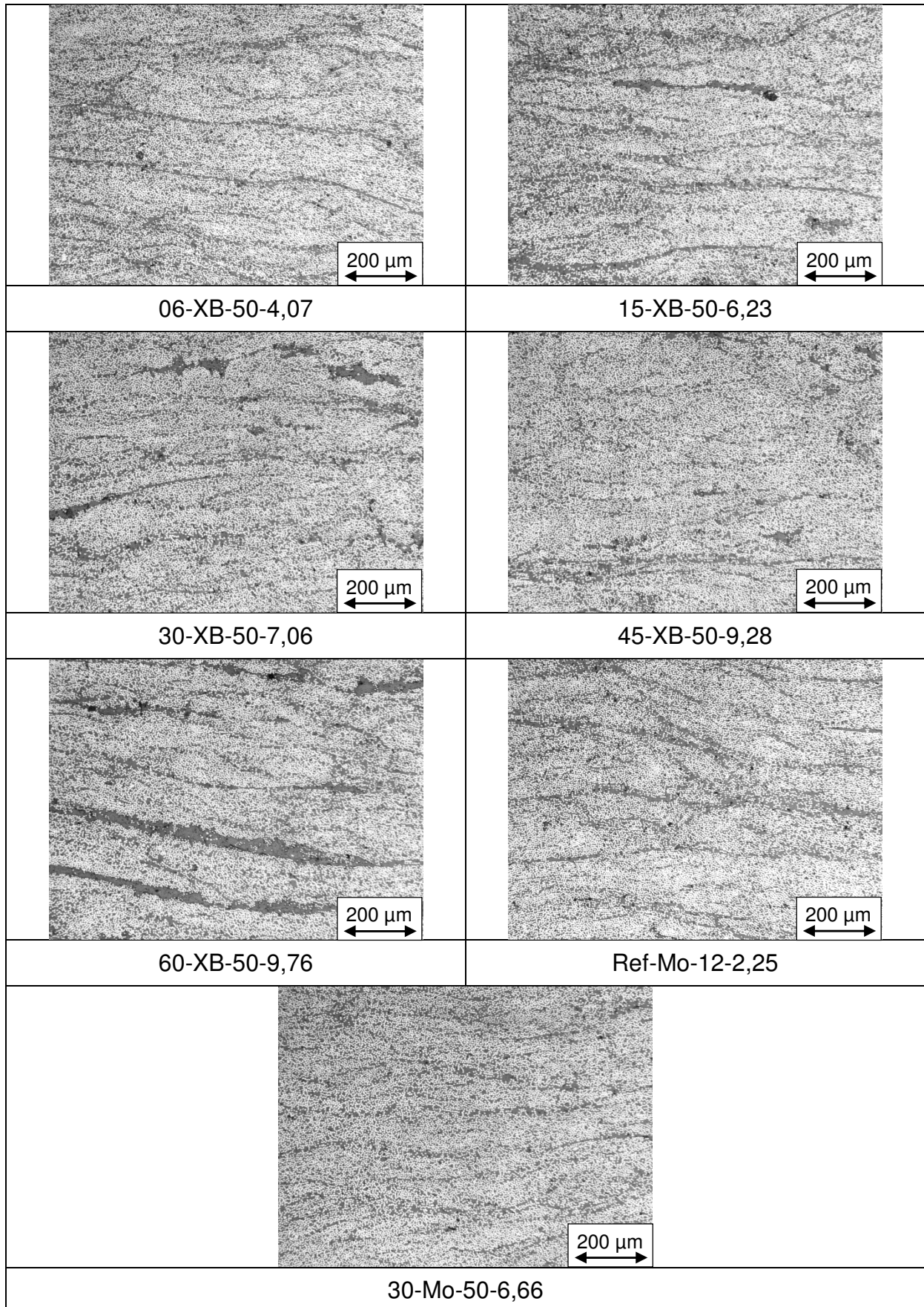
B. Berechnung der Flächenpressung unterhalb der Konsolidierungsrolle:

Abbildung 10.2: Bezeichnungen des Sperrrades (Binderförderung)

C. REM-Aufnahmen von Binderrovings

D. Schliffbilder der UD-Proben für die ILSS Analyse

E. Prozessparameter der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

a. Zusammensetzung der Berechnungsformeln

Zusammensetzung der Formel (7.3)

$$AS_f = \frac{AW_j + RW_j}{n_j} \quad (10.7)$$

$$ZK_f = i \times \frac{AW_j + RW_j}{2} \quad (10.8)$$

$$PS_f = rk \times A_j \quad (10.9)$$

Zusammensetzung der Formel (7.4)

$$k_M = \sum_m MK_m \times (m_{eff} + m_{Abf}) \quad (10.10)$$

$$k_{Pr} = \sum_k z_{eff;k} \times A_{PK} \times PK \quad (10.11)$$

$$k_E = z_{eff} \times W_{VP} \times EK \quad (10.12)$$

$$k_S = z_{eff} \times SK \quad (10.13)$$

Zusammensetzung der Formel (7.5)

$$FL_{TFP;fix;o} = \frac{(2 \times +b_{TFP;Roving}) + (\pi \times \frac{b_{TFP;Roving}}{2})}{2} \times St_{Anz.} \times L_{Naht;TFP} \quad (10.14)$$

$$FL_{TFP;fix;u} = \sqrt{2} \times St_{Anz.} \times L_{Naht;TFP} \quad (10.15)$$

$$L_{Naht;TFP} = \sum_l [VB_{TFP} \div b_{TFP;Roving}] \times VL_{TFP;l} \quad (10.16)$$

Zusammensetzung der Formel (7.6)

$$FL_{I-DFP} = \sum_l [VB_{Online} \div b_{Online;Roving}] \times VL_{Online;l} \quad (10.17)$$

$$MK_{Binder} = Gew_{Roving;Online} \times (1 + Gew.\%_{Binder}) \times VL_{Online} \quad (10.18)$$

b. Wichtige Prozesskostenparameter für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Preforming)

Eingabe Preforming	Konfektions- technik	Tailored Fiber Placement	Online- Bebinderung	
Grundstruktur				
Fixkosten Cutter				
Angenommene Investitionskosten	225000			€
Angenommene Nutzungsdauer der Anlage	10			Jahre
Fixkosten Aktivierungsanlage				
Angenommene Investitionskosten	75000			€
Angenommene Nutzungsdauer der Anlage	10			Jahre
Werkzeugkosten	50000			€
Angenommene Nutzungsdauer	10			Jahre
Variable Kosten - Cutter				
Energieverbrauch	10			kW / h
Verbrauchsmaterialkosten	10			€ / h
Personalaufwand	0,5			Personen
Variable Kosten - Aktivierungsanlage				
Energieverbrauch	75			kW / h
Verbrauchsmaterialkosten	7,5			€ / h
Personalaufwand	0,5			Anzahl
Material				
Verstärkungsgewebe	3			€ / m ²
Spunfab (12 g/m ²)	0,25			€ / m ²
Lokale Verstärkung				
Anzahl der Maschinen	1	1	1	Stück
Fixkosten Roboter / Portalsystem				
Angenommene Investitionskosten	305.000	80.000	100.000	€
Angenommene Nutzungsdauer der Anlage	10	10	10	Jahre
Fixkosten Endeffektoren				
Angenommene Investitionskosten	100.000	30.000	35.000	€
Angenommene Nutzungsdauer des TLK	10,0	10	10	Jahre
Variable Kosten				
Energieverbrauch Roboter / Portalsystem	6	6	10	kW / h
Energieverbrauch Endeffektor	2,0	0,8	2,0	kW / h
Verbrauchsmaterialkosten	10,0	10,0	10,0	€ / h
Personalaufwand	1	1	1	Anzahl
Material				
Verstärkungsgelege mit Binder (150 g/m ²)	13,7			€ / m ²
Roving				
Kosten pro kg (Bobbin)		15	15	€ / kg
Gewicht pro Meter Roving (tex)		3,3	3,3	g / m
UD Verstärkung		0,0495	0,0495	€ / m
Faden				
Kosten pro Spule		15		€ / kg
Anzahl der Metet aus Spule		2.500		g / m
Nähfaden		0,0060		€ / m
Binder				
Kosten pro kg (Binder)			15	€ / kg
Massenprozent %			5	%
Gewicht pro Meter Roving			0,1650	g / m
Kosten pro Meter			0,0025	€ / m

Weitere preisbildende Faktoren

<u>Cutter</u>	Angenommene Auslastung der Maschinen	220			Tage
	Anzahl der Schichten pro Tag	1			Anzahl
	Stunden pro Schicht	8			Stunden
	Stunden pro Arbeitstag	8			Stunden
	Anzahl gleichartiger Maschinen	1			Anzahl
<u>Aktivierung</u>	Angenommene Auslastung der Maschinen	220			Tage
	Anzahl der Schichten pro Tag	1			Anzahl
	Stunden pro Schicht	8			Stunden
	Stunden pro Arbeitstag	8			Stunden
	Anzahl gleichartiger Maschinen	1			Anzahl
<u>Lokale Verstärkung</u>	Angenommene Auslastung der Maschinen	220	220	220	Tage
	Anzahl der Schichten pro Tag	1	1	1	Anzahl
	Stunden pro Schicht	8,0	8,0	8,0	Stunden
	Stunden pro Arbeitstag	8,0	8,0	8,0	Stunden
	q				

Berechnung "Herstellzeit"

Grundstruktur					
Geschwindigkeit Cutten	3				m / min
Cutten	1,67				Minute (n) / Bauteil
Rüstzeit (Material Ablegen + Entnehmen)	4,00				Minute (n) / Bauteil
Aktivieren	4				Minute (n) / Bauteil
Lokale Verstärkung					
Stiche / min	1.500				Stiche / min
Geschwindigkeit	5,00	10,00			Meter / Minute
Umsetzung zwischen 2 Bahnen	10,00	10,00	10,00		Sekunden
Vorbereitungszeit / Stacking	30,00	1,00	0,50		Minute (n) / Bauteil
Nachbereitungszeit		1,00	0,50		Minute (n) / Bauteil
Geschwindigkeit Cutten	3,00				m / min
Cutten / lokale Verstärkung	1,49				Minute (n)
Rüstzeit / Anfangszeit bis Beginn	25,00				Minute (n) / Bauteil

c. Wichtige Prozesskostenparameter für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Harzinjektion)

Eingabe Harzinjektion	Konfektions- technik	Tailored Fiber Placement	Online- Bebninderung	
Fixkosten Presse				
Angenommene Investitionskosten		300.000		€
Angenommene Nutzungsdauer der Presse		10,0		Jahre
Fixkosten Injektionsform				
Angenommene Investitionskosten		100.000		€
Angenommene Nutzungsdauer der Injektionsform		10		Jahre
Fixkosten Injektionsanlage				
Angenommene Investitionskosten		250.000		€
Angenommene Nutzungsdauer der Injektionsanlage		10		Jahre
Fixkosten Handlingsystem				
Angenommene Investitionskosten		75.000		€
Angenommene Nutzungsdauer des Handlingsystems		10		Jahre
Variable Kosten				
Energieverbrauch Presse		15		kW / h
Energieverbrauch Injektionsanlage		5,0		kW / h
Energieverbrauch Handlingsystem		4		kW / h
Verbrauchsmaterialkosten		10,0		€ / h
Personalaufwand		1		Anzahl
Harzmenge		1,75		kg / Stück
Kosten pro Kg Harz		5		€ / Kg
Weitere preisbildende Faktoren				
Angenommene Auslastung der Maschinen	220	220	220	Tage
Anzahl der Schichten pro Tag	1	1	1	Anzahl
Stunden pro Schicht	8,0	8,0	8,0	Stunden
Anzahl gleichartiger Maschinen	1,0	1,0	1,0	Anzahl
Zykluszeit	10,0	10,0	10,0	Minuten
Anzahl gleichzeitig zu pressenden Werkstücke	1	1	1	Anzahl

d. Wichtige Prozesskostenparameter für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Nachbearbeitung)

Eingabe Nachbearbeitung		
<u>Fixkosten Roboter</u>		
Angenommene Investitionskosten	100.000	€
Angenommene Nutzungsdauer der Anlage	10,0	Jahre
<u>Fixkosten Werkzeug</u>		
Angenommene Investitionskosten	50.000	€
Angenommene Nutzungsdauer des Werkzeuges	5,0	Jahre
<u>Variable Kosten</u>		
Energieverbrauch Roboter	10,0	kW / h
Verbrauchskosten	10,0	€ / h
Personalaufwand	1,0	Anzahl
<u>Weitere preisbildende Faktoren</u>		
Angenommene Auslastung der Maschinen	220	Tage
Anzahl der Schichten pro Tag	1	Anzahl
Stunden pro Schicht	8,0	Stunden
Anzahl gleichartiger Maschinen	1,0	Anzahl
Bearbeitungszeit	5,0	Minuten

e. Wichtige Prozesskostenparameter für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Produktionsstätte)

Eingabe Produktionsstätte		
<u>Fixe Raumkosten</u>		
Raumbedarf m ²	650	m ²
Raumkosten € / m ² / a	100	€ / m ² / a
<u>Variable Kosten</u>		
Energieverbrauch (Licht/Heizung)	6,0	kW / h
Verbrauchskosten	10,0	€ / Tag

Betreute studentische Arbeiten

Müller, T.: Experimentelle Ermittlung von Verarbeitungsparametern für die Herstellung einer Luftfahrtverstärkungsstruktur mittels duroplastischer Prepreg-Tapes, IVW-Bericht 12-008, 2012.

Groh, M.: Neukonstruktion eines Thermoplast – Wickelkopfes zur Durchführung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Wickelvorgängen nach dem Stand der Technik, IVW-Bericht 12-009, 2012

Wiemer, B.: Optimierung eines Applizierungssystems für Pulvermaterialien für die Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden, IVW-Bericht 12-054, 2012

Majeres, P.: Evaluierung und Aufbau eines geeigneten Ablegewerkzeuges für die Herstellung von Verstärkungsstrukturen im Flugzeugbau, IVW-Bericht 12-055, 2012

Brandt, S.: Herstellungsvergleich von thermoplastischen, duroplastischen als auch aus Bindertapes hergestellten Bauteilen, IVW-Bericht Vol. 12-059, 2012

Kutscheid, C.: Evaluierung von Formkonzepten für komplexe Faserkunststoffbauteile mittels Verlorener-Kern-Technologie, IVW-Bericht 12-069, 2012

Kanzler, N.: Experimentelle Ermittlung von Verarbeitungsparametern für die Herstellung von ebenen Kreuzungsstrukturen mittels duroplastischer Prepreg-Tapes, IVW-Bericht 12-073, 2012

Lesoine, J.: Kompaktierungsanalyse für Rippenstrukturen aus Prepreg - Material für die Herstellung von Kreuzungsstrukturen im Flugzeugbau, IVW-Bericht 13-018, 2013

Scholz, P.: Konstruktion und Aufbau eines Auftragssystems für Pulvermaterialien und Untersuchungen von Faser-Kunststoff-Verbunden aus Bindertapes, IVW-Bericht 13-045, 2013

Laux, P.: Untersuchung und Konstruktion einer variablen Breiteneinstellungseinheit für unidirektionale Fasern, IVW-Bericht 13-058, 2013

Büttner, A.: Experimentelle Validierung eines Online-Qualitätsanalyzesystems für thermoplastische Tapes, IVW-Bericht 13-061, 2013

Breyll, P.: Parameterstudie zur Herstellung von Bindertapes mittels Heißluftfön / Heißgasdüse, IVW-Bericht 14-002, 2014

Büttner, A.: Ganzheitliche Prozessanalyse des laser-unterstützten Thermoplastwickelns, IVW-Bericht 14-015, 2014

Wirth, F.: Herstellung, Evaluierung und Vergleich eines Demobauteils hergestellt mittels Prepreg – und bebinderten – Tapes, IVW-Bericht 14-019, 2014

Kurukoese, I.: Parameterstudie zur Herstellung von Bindertapes (Offline) und Weiterverarbeitung zu Preforms, IVW-Bericht 14-033, 2014

Tonkinson, M.: Optimierung der Offlineherstellung von Bindertapes, IVW-Bericht 14-041, 2014

Bürkle, J.: Weiter-/Variantenentwicklung des Tapelegekopfes EVO II, IVW-Bericht 14-057, 2014

Rimmel, O.: Analyse der Temperaturverteilung einer Heißgasdüse für die Preformherstellung, IVW-Bericht 14-058, 2014

Steil, M.: Weiter-/Variantenentwicklung des Tapelegekopfs – EVO II, IVW-Bericht 14-061, 2014

Volkman, F.: Herstellung und Analyse von Bauteilen aus abgelegten UD-Bindertapes, IVW-Bericht 14-071, 2014

Seitz, S.: Untersuchung, Entwicklung und Qualifizierung von Bindertechnologien für Preform-Prozesse, IVW-Bericht 14-102, 2014

Fischer, J.: Verarbeitung von Verstärkungsfasern mittels 3D Druck Technologie, IVW-Bericht 15-001, 2015

Krämer, A.: Konzepterstellung bzw. Entwicklung eines automatisierten Preform-Herstellungsprozesses, IVW-Bericht 15-005, 2015

Publikationen

Journals und Buchbeiträge

Mitschang, P., Mack, J., Becker, D., Hildebrandt, K., Medina, L.: Potenziale neuer Matrixpolymere für die FKV-Bauteilfertigung. *Lightweight Design*, Vol. 2, Heft (2014), S. 14-21

Mack, J.; Holschuh, R.; Mitschang, P.: Qualitätsanalyse bei Bändchenhalbzeugen. *Lightweight Design*, Vol. 5, Heft (2014), S. 48-53

Mack, J.; Mitschang, P.: Efficient and flexible technology for binder roving manufacturing. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, eingereicht 2015

Mack, J., Schledjewski, R.: Continuous Fiber Reinforced Profiles in Polymer Matrix Composites. In: Advani S.G. and Hsiao K.-T. (Ed): *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012, 182-208

Mack, J., Holschuh, R.: Ökonomische Bewertung der FKV-Verarbeitungstechnologien. In: Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Hanser Verlag, 2014.

Medina, L.; Mack, J., Christmann, M.: Imprägnierte Halbzeuge. In: Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Hanser Verlag, 2014.

R. Schledjewski, J. Mack, et al. : Wickel- und Legetechnik. In: Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Hanser Verlag, 2014.

Symposien und Konferenzbeiträge

Mack, J., Mitschang, P., Schledjewski, R.: Cost Comparison of different thermoplastic nad thermoset filament winding processes. In: *SAMPE 2011, Long Beach - California, May 23rd - 27th, 2011*

Mitschang, P.; et al.: Herausforderungen bei der Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste. 20. Leobener Kunststoff-Kolloquium 2011. Leoben, 10.-11. November 2011

Mack, J.; Mitschang, P.: Prepreg Lay-up Technology for Manufacturing of lattice structure fuselage sections. In: *ICCS 17, Porto, June 17-21, 2013*

Mack, J.; Mitschang, P.: CHALLENGES FOR THE MANUFACTURING OF A LATTICE STRUCTURE FUSELAGE SECTION WITH PREPREG LAY-UP TECHNOLOGY. *ICCM19, Montreal, July 28 – August 02, 2013*

Mack, J.; Mitschang, P.: PREPREG LAY-UP TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF LATTICE STRUCTURE FUSELAGE SECTIONS. *ECCM16, Sevilla, June 23-26, 2014*

Patente

Schutzrecht DE 102012102841B3 (11.07.2013). Mack, J.; Lichtner, J.; Steeg, M., Pr.: 02.04.2012