

**Grundlagen der Pultrusion zur Fertigung von FV-Bauteilen für
die Anforderungen der automobilen Großserie**

*Fundamentals of the Pultrusion Process for Production of FRP
Components for the Requirements of Automotive Large-scale
Production*

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

M. Sc. Dominic Krebs

Tag der mündlichen Prüfung: 27.07.2018

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig:
Unermüdliche Ausdauer
und die Bereitschaft, etwas,
in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat,
wieder wegzuwerfen.

Albert Einstein

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2014 bis 2017 während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Leichtbautechnologie des Karlsruher Institut für Technologie.

Dank gebührt in erster Linie meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Frank Henning und dem Ansprechpartner aus dem Fachbereich des Fraunhofer ICT Herbert Engelen für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung in allen Phasen dieser Arbeit, sowie für die gemeinsamen Diskussionen und daraus entstandenen Impulse. Ihre wertvollen und konstruktiven Ratschläge haben maßgeblich zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer gilt mein Dank für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats und die angenehme Zusammenarbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, allen voran Sindy Engel-Watzek und Sandra Sitter danke ich für die langjährige Zusammenarbeit geprägt von zahlreichen fachlichen Diskussionen und hilfreichen Ratschlägen formaler und fachlicher Natur. Darüber hinaus danke ich meinen Studenten für die Bearbeitung unterschiedlichster Problemstellungen und die daraus resultierenden Beiträge zu dieser Arbeit.

Ich danke meiner Freundin Svenja für die herzliche Unterstützung und das immerwährende Verständnis während der langwierigen Arbeiten.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diese Ausbildung erst ermöglicht haben und mit ihrer uneingeschränkten Förderung den Weg geebnet haben.

München im Juli 2018

Dominic Krebs

Kurzfassung

Im Zuge der Weiterentwicklung von Werkstoffen und Fertigungstechnologien für den Automobilbau steigt der Bedarf nach kosteneffizienten und produktiven Verfahren zur Herstellung kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffbauteile. Das Pultrusionsverfahren bietet die geforderte Großserienfähigkeit bei gleichzeitig geringen Fertigungskosten durch einen kontinuierlichen Prozessverlauf. Um alle Potentiale dieses Verfahrens nutzen zu können, ist ein umfassendes Prozessverständnis erforderlich.

Zur Qualifizierung des Pultrusionsverfahrens für den Einsatz in der automobilen Großserie werden in dieser Arbeit die notwendigen Kenntnisse über Wechselwirkungen im Prozess und das Wissen um die Auswirkung einzelner Parameter auf grundlegende Bauteileigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit sowie Ausprägung weiterer Merkmale, wie z.B. Reinharzbereiche und Falten, erarbeitet.

Ausgehend von einer gesamthaften Systemanalyse, unter Verwendung der Ishikawa-Methode und mehrstufigen Plausibilisierungen, wird eine repräsentative Parametersammlung erarbeitet. Mittels einer Intensitäts-Beziehungsmatrix werden diese Parameter quantitativ bewertet und theoretische Wechselwirkungen erarbeitet. Die im Zuge der Systemanalyse ermittelten und gewichteten Parameter bilden die Grundlage zur experimentellen Überprüfung der Wirkzusammenhänge mit Hilfe der Methode der statistischen Versuchsplanung. Umfassende Vorversuche definieren die Parameterstufen des Versuchsplans mit den Parametern Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil. Die Injektionstechnologie für Kohlenstofffasern in einer Epoxid-Matrix mit Gelegeverstärkung bildet das Zielsystem.

Um die Bauteilqualität überhaupt messbar zu machen, wird eine mehrstufige Prüfmethodik entwickelt und angewandt. Neben Zielgrößen wie mechanische Eigenschaften, Geometrie und Imprägnierqualität wird die Merkmalsausprägung detailliert untersucht und in Form eines Merkmalskataloges messbar gemacht. Mit Hilfe des Merkmalskataloges ist es nun möglich, die Bauteilqualität bezüglich lokaler Inhomogenitäten zu beschreiben und Abweichungen vom Sollzustand einheitlich zu charakterisieren. Die umfangreiche Parameterstudie bestätigt die theoretischen Ergebnisse der Systemanalyse. Ausgewertet werden die Prozessdaten, die Bemusterung der produzierten Profile nach dem erarbeiteten Merkmalskatalog, die physikalisch-chemischen und thermischen Untersuchungsmethoden, die mikrostrukturellen Untersuchungsmethoden und die mechanischen Prüfungen.

Abstract

In the course of the further development of materials and manufacturing technologies for the automotive industry, the demand for cost-efficient and productive processes for producing FRP components is increasing. The pultrusion process offers the required production capacity with simultaneous low production costs due to a continuous process. In order to leverage all the potentials of this process, it requires a comprehensive process understanding.

To qualify the pultrusion process for automotive large-scale production, the necessary knowledge of interactions within the process and the knowledge of effects of individual process parameters on basic component properties such as stiffness and strength, as well as on the criticals to quality are developed in this scientific work.

Starting from a comprehensive system analysis, using the Ishikawa method and multistage plausibility checks, a representative collection of parameters is compiled. By means of a Intensity-Relation-Matrix these parameters are evaluated quantitatively and theoretical interactions are worked out. The parameters determined and weighted in the course of the system analysis form the basis for the experimental investigation of interactions by using the DoE method (Design of Experiments). Broad preliminary test define the parameter levels of the trial design with the parameters degree of mold filling, line speed, injection chamber temperature control and mold temperature control. Injection technology for carbon fiber with an epoxy resin system and non-crimp fabrics form the target system.

In order to gain measurable component quality at all, a multi-stage test methodology is developed and applied. In addition to the target figures such as mechanical properties, geometry and impregnation quality, the manifestation of criticals to quality is investigated in detail and made measurable in the form of a catalog of criticals to quality. With this catalog of criticals to quality, it is now possible to describe the component quality with regard to local inhomogeneities and to consistently characterize deviations from the desired condition. The extensive parameter study confirms the theoretical results of the system analysis via evaluating process data, component sampling according to the catalog of criticals to quality, physico-chemical and thermal analyses, microstructural analyses and mechanical testing.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Nomenklatur	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Ansatz.....	2
2 Stand der Forschung und Technik	4
2.1 Verfahrensbeschreibung Pultrusion	4
2.2 Ausgangsmaterialien	8
2.2.1 Matrixwerkstoffe	8
2.2.2 Verstärkungsmaterialien.....	10
2.3 Anwendungsbeispiele.....	11
2.4 Sonderverfahren.....	12
2.5 Studien zu Prozessparametern und Wirkzusammenhängen	14
2.5.1 Herangehensweisen und Zielsetzungen	15
2.5.2 Prozessparameter und Wirkzusammenhänge.....	15
2.5.3 Forschungsschwerpunkte	20
3 Systemanalyse zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge	24
3.1 Methodik	24
3.2 Anforderungen der automobilen Großserie	26
3.3 Zielgrößen	27
3.4 Systemanalyse	27
3.4.1 Parametersammlung und Parameterdefinition.....	27
3.4.2 Ishikawa-Analyse.....	29
3.4.3 Eingrenzung der Parameter	32
3.4.4 Bewertungsdurchläufe und Plausibilisierung	32

3.4.5 Intensitäts-Beziehungs-Matrix	36
3.4.6 Identifikation relevanter Prozessparameter	39
4 Versuchsaufbau und -durchführung	44
4.1 Methodische Herangehensweise	44
4.2 Versuchsplanung	44
4.3 Versuchsumgebung und Randbedingungen	50
4.4 Prüfmethodik.....	55
4.4.1 Begriffsdefinition Merkmal	61
4.4.2 Merkmalscharakterisierung und -dokumentation.....	61
5. Ergebnisdarstellung und Diskussion	71
5.1 Prozessdatenauswertung	71
5.2 Bemusterung nach Merkmalskatalog	81
5.3 Physikalisch-chemische und thermische Untersuchungsmethoden	86
5.4 Mikrostrukturelle Untersuchungsmethoden	91
5.5 Mechanische Prüfungen.....	101
5.6 Erkenntnisse aus den Prozessverläufen	108
5.7 Verknüpfung der Erkenntnisse.....	112
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	116
Literaturverzeichnis	122
Anhang	129
Anhang A: Im Ishikawa-Diagramm hinzugefügte Parameter.....	129
Anhang B: Differenzierung verbleibende/gekürzte Parameter	132
Anhang C: Ergebnis der Plausibilitätsüberprüfung	134
Anhang D: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche.....	137
Anhang E: Anlagentechnik	141
Anhang F: Zeichnungen Werkzeug.....	143
Anhang G: Zeichnungen Faserführungsblenden	144
Anhang H: Analyse der Heizleistungen	146
Anhang I: Anzahl Prüfungen, Messungen, Bemusterungen	147
Patentanmeldungen	148

Abkürzungsverzeichnis

4PB	4-Punkt-Biegung
BMW	Bayerische Motoren Werke
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CF	Kohlenstofffaser (Carbonfaser)
CFM	Continuous Filament Mat (kontinuierliche Glasfaser-Matte)
CT	Computertomographie
div.	diverse
DoE	Design of Experiments
dpi	dots per inch (Punkte pro Zoll)
DSC	differential scanning calorimetry (dynamische Differenzkalorimetrie)
EL	Einzellage
EP-Harze	Epoxidharze
etc.	et cetera
FV	Faserverbund
FVG	Faservolumengehalt
Ges.	Gesamt
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IMR	Internal Mold Release (internes Trennmittel)
i.O.	In Ordnung
Konfig.	Konfiguration
Mpul	Mass per unit length (längenbezogene Masse)
MW	Mittelwert
n.i.O.	nicht in Ordnung
PA 66	Polyamid 66
pbw	parts by weight
PUR-Harze	Polyurethanharze
R-CF-Vlies	Vlies aus recycelten Kohlenstofffasern
Stk.	Stück
T _g	Glasübergangstemperatur
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UP-Harze	ungesättigte Polyesterharze
US	Ultraschall
VE-Harze	Vinylesterharze
vgl.	vergleiche
WW	Wechselwirkung
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: BMW 7ER ROHKAROSSERIE [BMW15]	2
ABBILDUNG 2: PULTRUSION – VERFAHRENSABLAUF, NACH [PUL10]	5
ABBILDUNG 3: ARTEN DER IMPRÄGNIERUNG, NACH [FZR96]	6
ABBILDUNG 4: ÜBERSICHT FLÄCHIGER HALBZEUGE, NACH [HEN13]	11
ABBILDUNG 5: BEISPIEL FÜR, AUF DEM MARKT VERFÜGBARE, QUERSCHNITTSGEOMETRIEN [FIB18]	12
ABBILDUNG 6: PULLWINDUNG – VERFAHRENSABLAUF [EXE09]	13
ABBILDUNG 7: PULLBRAIDING – VERFAHRENSABLAUF, NACH [BEZ16]	14
ABBILDUNG 8: VERGLEICH DER MARKTANTEILE NACH MATRIXSYSTEM (ABSCHÄTZUNG) [ENG18]	23
ABBILDUNG 9: GRUNDSTRUKTUR EINER INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSMATRIX, NACH [RON15]	25
ABBILDUNG 10: GRUNDSTRUKTUR EINES INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSDIAGRAMMES, NACH [RON15]	26
ABBILDUNG 11: BEISPIELHAFT QUERSCHNITTSGEOMETRIEN	27
ABBILDUNG 12: ISHIKAWA-DIAGRAMM TEIL 1	30
ABBILDUNG 13: ISHIKAWA-DIAGRAMM TEIL 2	31
ABBILDUNG 14: SCHEMA DER PLAUSIBILITÄTSÜBERPRÜFUNG	34
ABBILDUNG 15: SCHEMA DER PAARWEISEN VERGLEICHE	35
ABBILDUNG 16: ISHIKAWA-DIAGRAMM NACH BEWERTUNGSDURCHLÄUFEN	36
ABBILDUNG 17: GESAMTHEIT MÖGLICHER QUERBEZIEHUNGEN	39
ABBILDUNG 18: PARETO-DARSTELLUNG DER AKTIV- UND PASSIVSUMMEN	40
ABBILDUNG 19: INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSDIAGRAMM (GESAMT)	42
ABBILDUNG 20: INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSDIAGRAMM (TOP-10 PARAMETER)	43
ABBILDUNG 21: SCHRITTWEISE ANNÄHERUNG ZUM ZIELSYSTEM DURCH VORVERSUCHE	47
ABBILDUNG 22: FORMFÜLLGRAD: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	48
ABBILDUNG 23: KOMPLEXE VISKOSITÄT DES EP-MATRIXSYSTEMS	49
ABBILDUNG 24: PROFILGEOMETRIE	51
ABBILDUNG 25: SCHEMATISCHE VERTEILUNG DER DRUCKMESSSTELLEN IM WERKZEUG	51
ABBILDUNG 26: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERSUCHSAUFBAUS	52
ABBILDUNG 27: FASERARCHITEKTUR DES CF-GELEGES, NACH [SAE17A]	55
ABBILDUNG 28: PRÜFMETHODIK	56
ABBILDUNG 29: HEIZKURVE DER BAUTEILVERASCHUNG	58
ABBILDUNG 30: STUFENKEIL ZUR KALIBRIERUNG DER US-PRÜFUNG	59
ABBILDUNG 31: KALIBRIERUNG DER US-PRÜFUNG AM STUFENKEIL	59
ABBILDUNG 32: CHARAKTERISIERUNG DER AUSPRÄGUNG EINER ONDULATION	63
ABBILDUNG 33: DRÜCKE IN DER INJEKTIONSKAMMER BEI AUSGEWÄHLTEN VORVERSUCHEN	72
ABBILDUNG 34: DRUCKVERLÄUFE BEI EINTRITT GF-CFM (WECHSEL VON AUFBAU 4 ZU AUFBAU 5)	73
ABBILDUNG 35: SCHLIFFBILD AUFBAU 5 ZUM ZEITPUNKT DES EINTRITTS DES GF-CFM	74
ABBILDUNG 36: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER EINFLÜSSE ERHÖHTER ROVINGANZAHL IM PROZESSVERLAUF	74
ABBILDUNG 37: DRÜCKE IN DER INJEKTIONSKAMMER AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	75
ABBILDUNG 38: DRUCKERHÖHUNG DURCH DIE HÖHENÄNDERUNG DER INJEKTIONSKAMMER AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	76
ABBILDUNG 39: ABZUGSKRÄFTE AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	77
ABBILDUNG 40: VERLAUF DER ABZUGSKRAFT AN AUFBAU 6, AUSGEHEND VON 129CF BIS HIN ZU KONFIGURATION 9 (113CF), BEI KONTINUIERLICHER VERRINGERUNG DER ROVINGANZAHL	78
ABBILDUNG 41: HEIZLEISTUNGEN DER ZONEN 1 AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	80
ABBILDUNG 42: RELATIVE HÄUFIGKEITEN DER MERKMALE „RIEFEN ENTLANG DES PROFILS“, „LAGENEINZUG IN BAUTEILDICKE“, „VERZUG IN DER DECKLAGE“ AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	81
ABBILDUNG 43: WERKZEUGVERSCHMUTZUNGEN BEI GERINGEM FFG AUS VORVERSUCHEN AN AUFBAU 3	83
ABBILDUNG 44: RELATIVE HÄUFIGKEITEN DER MERKMALE „REINHARZBEREICHE“, „FLÄCHIG MILCHIGE HILFSFASERN“, „FREIGELEGTE GLAS- UND HILFSFASERN AN UNBEHANDELTEN OBERFLÄCHE“ AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	84
ABBILDUNG 45: RELATIVE HÄUFIGKEITEN DES MERKMALS „FEHLSTELLEN IN OBERSTER MATRIXSCHICHT“ AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	85
ABBILDUNG 46: GLASÜBERGANGSTEMPERATUREN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	86

ABBILDUNG 47: FASERVOLUMENGEHALTE AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	87
ABBILDUNG 48: KORRELATION VON LAGENEINZUG UND VERDRÄNGUNG DES UD-KERNS AN AUFBAU 6 (A: 45° UNVERASCHT, B: 45° VERASCHT, C: 90° VERASCHT, D: -45° VERASCHT, E: R-CF-VLIES VERASCHT, F: UD-KERN VERASCHT)	89
ABBILDUNG 49: KORRELATION VON GASSE UND ONDULATIONEN AN AUFBAU 6 (A: 45° UNVERASCHT, B: 45° VERASCHT, C: 90° VERASCHT, D: SCHEMA KORRELATION)	90
ABBILDUNG 50: SCHLIFFBILDER VON „LAGENEINZUG“ (LINKS OBEN), „DOPPELTER LAGENEINZUG“ (LINKS UNTEN) UND „BRUCH ZWISCHEN LAGENEINZÜGEN“ (RECHTS) AN AUFBAU 6	91
ABBILDUNG 51: SCHLIFFBILD MIT BRUCH IM RADIUS AN AUFBAU 6	92
ABBILDUNG 52: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PROBENENTNAHME ZUR SCHLIFFBILDANALYSE BEI BRÜCHEN IN RADIIEN	93
ABBILDUNG 53: SCHICHTDICKEN DER TEXTILEN HALBZEUGE BEI UNTERSCHIEDLICHEN FFG AN AUFBAU 6 (LINKS: GURT, RECHTS: FLANKEN)	94
ABBILDUNG 54: SCHICHTDICKEN DER TEXTILEN HALBZEUGE BEI UNTERSCHIEDLICHEN FFG AUS VORVERSUCHEN AN AUFBAU 2 (LINKS: GURT, RECHTS: FLANKEN)	95
ABBILDUNG 55: SCHLIFFBILD AN AUFBAU 2 MIT 285GF	96
ABBILDUNG 56: ULTRASCHALLPRÜFUNG AN KONFIGURATION 1 DER PARAMETERSTUDIE	98
ABBILDUNG 57: ULTRASCHALLPRÜFUNG AN AUFBAU 6 – RELATIVE HÄUFIGKEITEN DETEKTIERTER PIXELFARBEN FÜR DIE UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	99
ABBILDUNG 58: ZUGPRÜFUNG 0° – E-MODULI AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	101
ABBILDUNG 59: ZUGPRÜFUNG 0° – ZUGFESTIGKEITEN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	102
ABBILDUNG 60: ZUGPRÜFUNG 0° – ZUGDEHNUNGEN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	103
ABBILDUNG 61: BIEGEPRÜFUNG 0° – E-MODULI AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	104
ABBILDUNG 62: BIEGEPRÜFUNG 0° – FESTIGKEITEN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	105
ABBILDUNG 63: BIEGEPRÜFUNG 0° – DEHNUNGEN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	106
ABBILDUNG 64: BIEGEPRÜFUNG 90° – E-MODULI AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	107
ABBILDUNG 65: BIEGEPRÜFUNG 90° – FESTIGKEITEN AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	108
ABBILDUNG 66: ANFAHRPROZESS: WECHSELWIRKUNG TEXTILZUFÜHRUNG, INJEKTIONSSTART UND FLIEßFRONT	109
ABBILDUNG 67: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG UNTERSCHIEDLICHER MANUELLER VERNÄHUNGEN	111
ABBILDUNG 68: VERNÄHUNG ZWEIER TEXTILER HALBZEUGE VON SEITE 1	112
ABBILDUNG 69: KOMPLEXE VISKOSITÄTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN MATRIXREZEPTUREN	119
ABBILDUNG 70: VERGLEICH ZWEIER SCHLIFFBILDER MIT MATRIX M0 (LINKS) UND MATRIX M2 (RECHTS) AN AUFBAU 6	119
ABBILDUNG 71: ABZUGSKRÄFTE AN AUFBAU 3 BEI UNTERSCHIEDLICHEN TRENNMITTELGEHALTEN	120
ABBILDUNG 72: DIFFERENZIERUNG ZWISCHEN VERBLEIBENDEN UND GEKÜRZTEN PARAMETERN TEIL 1	132
ABBILDUNG 73: DIFFERENZIERUNG ZWISCHEN VERBLEIBENDEN UND GEKÜRZTEN PARAMETERN TEIL 2	133
ABBILDUNG 74: BASISDATENBLATT PULTRUSIONSANALAGE [RAY17]	141
ABBILDUNG 75: ZEICHNUNG WERKZEUG	143
ABBILDUNG 76: FASERFÜHRUNGSBLENDE #1	144
ABBILDUNG 77: FASERFÜHRUNGSBLENDE #2	144
ABBILDUNG 78: FASERFÜHRUNGSBLENDE #3 UND #4	145
ABBILDUNG 79: HEIZLEISTUNGEN DER ZONEN 1-4 AN AUFBAU 6 BEI UNTERSCHIEDLICHEN KONFIGURATIONEN	146

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWERTUNG ZUM STAND VON FORSCHUNG UND TECHNIK	21
TABELLE 2: BRAINSTORMING UND PARAMETERDEFINITION	28
TABELLE 3: BEWERTUNG DER ERSTEN EBENE	33
TABELLE 4: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - INJEKTION	35
TABELLE 5: BEISPIELHAFTE BEWERTUNGEN DER INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSMATRIX	37
TABELLE 6: INTENSITÄTS-BEZIEHUNGSMATRIX	38
TABELLE 7: AKTIV-/PASSIVSUMMEN UND ANZAHL DER WECHSELWIRKUNGEN (WW)	41
TABELLE 8: VORLÄUFIGER VERSUCHSPLAN	46
TABELLE 9: VOLLSTÄNDIGER VERSUCHSPLAN	50
TABELLE 10: VERWENDETE MISCHUNG DES VE-MATRIXSYSTEMS	53
TABELLE 11: VERWENDETE MISCHUNG DES EP-MATRIXSYSTEMS	54
TABELLE 12: MERKMALKATALOG	65
TABELLE 13: „RIEFEN ENTLANG DES PROFILS“ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ROVINGZAHL AUS VORVERSUCHEN	82
TABELLE 14: SCHLIFFBILDANALYSEN IN UNTERSCHIEDLICHEN ENTFFERNUNGEN ZUR BESCHNITTKANTE	93
TABELLE 15: PARAMETERVARIATIONEN UND DEREN AUSWIRKUNGEN	113
TABELLE 16: ANGEPASSTE REZEPTUREN DES EP-MATRIXSYSTEMS	118
TABELLE 17: IM ISHIKAWA-DIAGRAMM HINZUGEFÜGTE PARAMETER	129
TABELLE 18: ERGEBNIS DER PLAUSIBILITÄTSÜBERPRÜFUNG	134
TABELLE 19: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - WERKZEUG	137
TABELLE 20: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - QUERSCHNITTGESTALTUNG	138
TABELLE 21: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - PREFORMING	138
TABELLE 22: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - KOHLENSTOFFFASERGELEGE	139
TABELLE 23: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - GLASFASERGELEGE	139
TABELLE 24: ERGEBNIS DES PAARWEISEN VERGLEICHS - HYBRIDGELEGE	140
TABELLE 25: ANZAHL DER BEMUSTERTEN BAUTEILE JE KONFIGURATION	147
TABELLE 26: ANZAHL DER SCHICHTDICKENMESSUNGEN AUS VERSUCHSREIHE	147
TABELLE 27: ANZAHL DER SCHICHTDICKENMESSUNGEN AUS VORVERSUCHEN	147

Nomenklatur

Formelzeichen	Bezeichnung
u	Abzugsgeschwindigkeit
n_{Fil}	Anzahl der Filamente je Roving
n_{Spul}	Anzahl der Spulen
b	Breite des Querschnitts
dy	Dicke des Reinharzfilms
η	Dynamische Viskosität
$E_{\parallel Faser}$	E-Modul der Faser in 0°-Richtung
E_{Matrix}	E-Modul der Matrix
$E_{\parallel Verbund}$	E-Modul des Verbundes in 0°-Richtung
φ	Faservolumengehalt
φ_{UD}	Faservolumengehalt der UD-Schicht
d_{Fil}	Filamentdurchmesser
A_F	Fläche der Fasern im Querschnitt der UD-Schicht
h	Höhe des Querschnitts
l	Länge des Pultrudates
A_{Tex}	Querschnittsfläche der textilverstärkten Lagen
A_{UD}	Querschnittsfläche der UD-Schicht
$A_{Verbund}$	Querschnittsfläche des Verbundes
A_{Fil}	Querschnittsfläche eines Filaments
A_{Rov}	Querschnittsfläche eines Rovings
α	Reaktionsumsatz
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
t_{Tex}	Schichtdicke der textilverstärkten Lagen (oben+unten)
τ	Schubspannung
T	Temperatur
V_F	Volumen der Fasern in der UD-Schicht
V_{UD}	Volumen der UD-Schicht

1 Einleitung

1.1 Motivation

Strengere Emissionsgrenzen, Ressourcenschonung, gestiegene Anforderungen an Sicherheit und Komfort sind nur einige Beweggründe für den Bedarf an innovativen Leichtbauansätzen im Automobilbau [Ham09]. Insbesondere die Einflüsse des Fahrzeuggewichtes und dessen Verteilung auf die Fahrdynamik sowie der Einzug elektrifizierter Antriebe ins Automobil und der damit einhergehenden Gewichtszunahme durch Batteriesysteme bekräftigen die Suche nach neuen Technologien zur Gewichtsreduzierung [BeB16].

Der Weiterentwicklung von Werkstoffen und Fertigungstechnologien kommt somit gestiegene Bedeutung zu. In diesem Zug ist im Automobilbau zunehmend eine intelligente Mischbauweise mit unterschiedlichen Werkstoffen erkennbar [GLM+15]. Nach der Einführung von hochfesten Stählen und verschiedenen Aluminiumlegierungen werden zunehmend kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Karosseriebau eingesetzt.

Am Beispiel der neuen 7er Baureihe der BMW Group ist in Abbildung 1 eine solche Mischbauweise exemplarisch dargestellt.



Abbildung 1: BMW 7er Rohkarosserie [BMW15]

Die gezeigte Karosseriestruktur enthält neben Schalelementen auch Hohlprofile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Diese Elemente in Profilbauweise ermöglichen einen Stoff- und Formleichtbau der hohe Steifigkeit und Festigkeit vereint. Ein Beispiel hierfür ist der Dachrahmen in Abbildung 1, der durch die Kombination von Flechtprozess und Resin Transfer Moulding hergestellt wird.

Um die Großserienfähigkeit solcher Hohlprofile weiter zu steigern, und gleichzeitig Kostenpotentiale zu nutzen, wird an der Weiterentwicklung des Pultrusionsverfahrens zum Einsatz im Automobilbau gearbeitet.

1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Ansatz

Ein, für die Automobilindustrie, neues Fertigungsverfahren muss vor dessen Einsatz in der automobilen Großserie ausreichend abgesichert und verstanden sein [Gol11]. Neue Verfahren und Werkstoffe fordern entsprechende Kenntnisse über Wechselwirkungen im Prozess und das Wissen um die Auswirkung einzelner Stellgrößen, auch Prozessparameter genannt, auf grundlegende Bauteileigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit. Das Pultrusionsverfahren ist bereits aus anderen Industriesparten wie der Bau- oder Elektroindustrie bekannt, wurde bislang jedoch nur vereinzelt im Automobilbau eingesetzt [Bla99] [Jun15]. Um alle Potentiale dieses

Verfahrens nutzen zu können, erfordert es grundlegende Kenntnisse über das Verfahren selbst, die Eingangsmaterialien und die Wechselwirkungen zwischen relevanten Prozessparametern. Im Rahmen dieser Arbeit werden relevante Prozessparameter im Pultrusionsprozess identifiziert und deren Wirkzusammenhänge analysiert. Die Schwerpunkte der Untersuchungen liegen auf der Prozessstabilisierung und der Ermittlung des optimalen Prozessfensters.

Im Fokus stehen folgende Ziele:

- Identifikation relevanter Prozessparameter
- Analyse der Wirkzusammenhänge
- Erweiterung des Prozessverständnisses
- Prozessstabilisierung und Ermittlung des optimalen Prozessfensters anhand eines ausgewählten Materials

Eine Systemanalyse bildet die Basis der Untersuchungen. Die Ergebnisse einer ersten Parametersammlung werden mit Hilfe des Ishikawa-Prinzips dargestellt und erweitert. Anschließend werden Querbeziehungen zwischen den Prozessparametern unter Verwendung eines erweiterten Wirkdiagramms evaluiert. Die Bewertung der Parameter bezüglich deren Einfluss auf den Prozess erfolgt anhand von Fachliteratur und Experteneinschätzung.

Die im Zuge der Systemanalyse ermittelten und gewichteten Parameter bilden die Grundlage zur experimentellen Überprüfung der Wirkzusammenhänge und Ermittlung des Prozessfensters. Es wird die Methode der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, kurz DoE) angewandt.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Verfahrensbeschreibung Pultrusion

Das Pultrusionsverfahren, auch Strangziehverfahren für faserverstärkte Kunststoffe genannt [Nöl10], ist ein Prozess zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffprofile in kontinuierlichem Ablauf. Der Begriff „Pultrusion“ setzt sich aus dem Verb „to pull“ und der Wortendung „-trusion“ zusammen. Es werden Halbzeuge durch den Prozess gezogen. Im Gegensatz zur Extrusion, also einem Verfahren bei dem ein Werkstoff durch eine Matrize gepresst wird, steht bei der Pultrusion die Faser und das Profil unter Zugspannung [Bla99].

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades, der Kontinuität des Prozesses und des endkonturnahen Einsatzes der Ausgangsmaterialien, ermöglicht das Pultrusionsverfahren eine im Vergleich zu anderen Technologien kostengünstigere Herstellung von faserverstärkten Kunststoffprofilen.

Entwickelt wurde das Verfahren in den 1950er Jahren in den USA und wurde bereits 1951 in einem Patent von A. Howald und L. Meyers genannt [HoM46, Via17]. Bereits ab 1960 gab es erste Bauteile in Form von Zugstäben für die Bauindustrie. Über die Jahre hinweg wurden die Anwendungsbereiche stetig erweitert und anspruchsvoller. So folgte bereits 1997 die erste Fußgängerbrücke aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und 2005 das erste Gebäude aus GFK [BGH12]. Seit dem Jahr 2000 finden sich auch Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt sowie dem Transportsektor [Mar15].

Der grundsätzliche Ablauf des Verfahrens, wie beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt, lässt sich in folgende Teilschritte gliedern:

- Materialbereitstellung
- Vorformung
- Imprägnierung
- Konsolidierung und Aushärtung
- Abziehen und Abtrennen

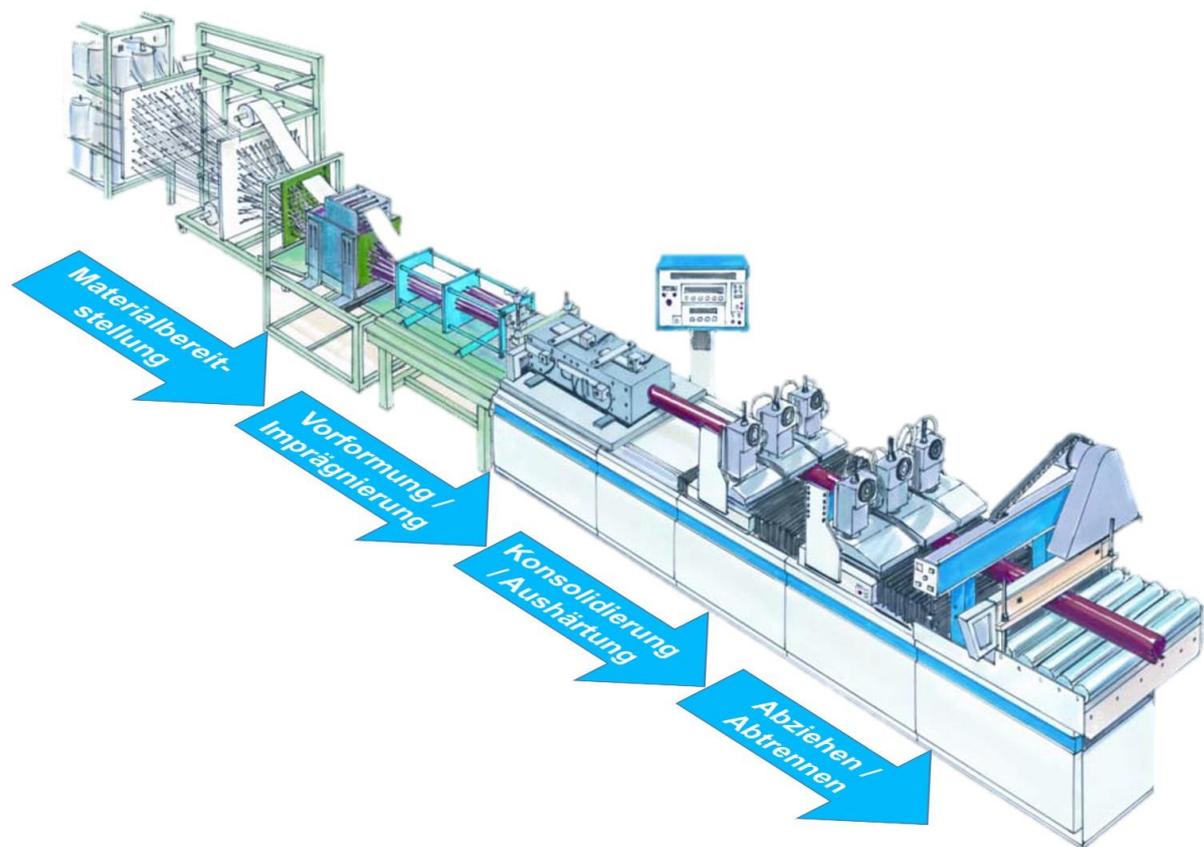


Abbildung 2: Pultrusion – Verfahrensablauf, nach [Pul10]

Die Bereitstellung der Halbzeuge in Faserform, im Weiteren als Rovings bezeichnet, geschieht auf Spulen in Gattern. Die Anzahl der Spulen hängt von der Größe des Querschnittes und dem Faservolumengehalt (FVG) der zu erzeugenden Bauteile ab. Beim Abzug der Rovings von den Spulen ist besonders auf eine möglichst kreuzungsfreie und hinsichtlich Filamentbrüchen wenig schädigende Führung zu achten. Zusätzlich muss eine ausreichende Fadenspannung während der Bereitstellung und Vorformung anliegen, um einem Verdrillen oder Kräuseln der Rovings vorzubeugen [FZR96]. Bei Lagenaufbauten mit textilen Halbzeugen wie Matten, Vliesen oder Gelegen werden diese auf Rollen bereitgestellt. Die Breite der textilen Halbzeuge muss bereits vor der Zuführung dem Bauteilquerschnitt angepasst sein.

Im Vorformungsprozess werden die einzelnen Halbzeuge der Geometrie des späteren Bauteilquerschnittes und dem vorgesehenen Lagenaufbau entsprechend angeordnet. Rovings werden über den Querschnitt verteilt, textile Halbzeuge werden ebenfalls an die vorgesehene Position geführt und entsprechend der Bauteilgeometrie vorgeformt. Hierfür eignen sich entsprechend geformte Loch- oder Schlitzblenden [ISP+16]. Aufgrund der Kontinuität des Prozesses und dem Anspruch, die textilen Halbzeuge möglichst ohne Schädigung in die

Bauteilgeometrie zu führen, ist für das Vorformen eine längere Strecke im Anlagenschema vorzusehen. Abhängig vom Umformgrad können hierfür mehrere Meter notwendig sein.

Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Arten zur Imprägnierung der Halbzeuge zu unterscheiden, das offene und geschlossene Pultrusionsverfahren. Beim offenen Verfahren erfolgt die Imprägnierung mit Hilfe eines Harzbades (vgl. Abbildung 2), beim geschlossenen Verfahren unter Verwendung einer Injektionskammer. Für das offene Verfahren existieren wiederum unterschiedliche konstruktive Varianten. Die in der Literatur gebräuchlichen Bezeichnungen für diese Varianten sind häufig verschieden, beschreiben aber im Prinzip gleiche Vorgehensweisen [Bla99] [FZR96]. [FZR96] betitelt eine Variante als Wannungsverfahren und beschreibt dieses mit mehreren Umlenkungen der Halbzeuge im Harzbad, wie auch aus dem Wickelverfahren bekannt. Diese Variante ist die gängigste bei offenen Verfahren und wird vorwiegend für geringe Bauteilkomplexitäten verwendet. Die zweite Variante wird als Durchziehverfahren bezeichnet und findet bei komplexeren Querschnitten Anwendung. Halbzeuge werden durch Loch-/Schlitzplatten in das Harzbad hinein- und herausgeführt. Im Bad selbst erfahren sie keine Umlenkung. Das durch die Loch-/Schlitzplatten austretende Matrixsystem wird in einer Wanne gesammelt und über eine Pumpe zurück in das Harzbad gefördert. Die beiden beschriebenen Ausprägungen des offenen Verfahrens und das geschlossene Verfahren unter Verwendung einer Injektionskammer, im Folgenden als Injektionsverfahren bezeichnet, sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

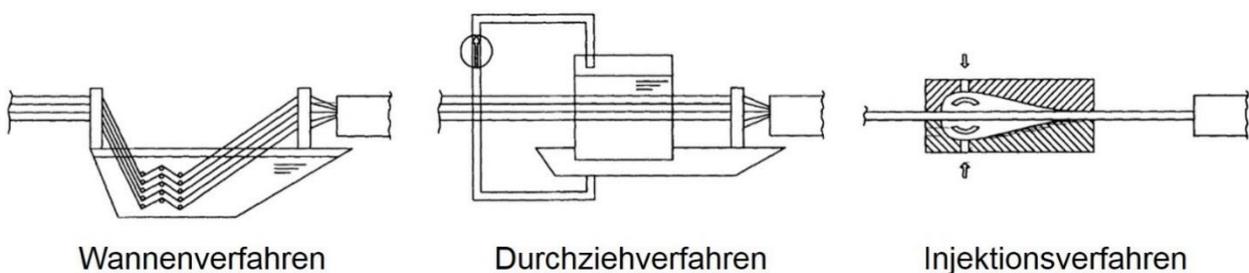


Abbildung 3: Arten der Imprägnierung, nach [FZR96]

Die offenen Verfahren haben den Nachteil, dass das gesamte sich im Harzbad befindliche Matrixsystem in bestimmten Zeitabständen vollständig getauscht werden muss, um etwaige gelierte Matrixreste und sogenannte Totwassergebiete zu entfernen. Zudem besteht beim offenen Verfahren das Problem der Arbeitsplatzbelastung durch leicht flüchtige Bestandteile, wie z.B. freies Styrol, bei Verwendung entsprechender Matrixsysteme [Bla99]. Die zeitlich- und reaktionsbedingte Viskositätsänderung wirkt sich zudem herausfordernd auf die Prozessstabilität aus [Ban16].

Nur das Injektionsverfahren ermöglicht den Einsatz reaktiver Matrixsysteme und steigert zudem die Reproduzierbarkeit der Imprägnierqualität, indem die benötigte Matrixmenge kontinuierlich zugegeben wird. Das Mischen und Dosieren des Matrixsystems geschieht in der Regel mit Hilfe einer Misch- und Dosieranlage. Somit wird die Arbeitsplatzbelastung reduziert, bzw. vermieden [FZR96] und die Produktivität erhöht [HSB15]. Besonderes Augenmerk liegt jedoch auf der Abdichtung der Injektionskammer. Da die Injektionskammer lediglich durch die Kompaktierung der Halbzeuge selbst abgedichtet werden kann, ist eine entsprechende Auslegung der Kammer von besonderer Bedeutung, da es Matrixrückfluss und den damit einhergehenden Druckabfall zu verhindern gilt. Auf diese Weise können Injektionsdrücke von 2-15 bar erreicht werden [FZR96]. [Bez17] unterscheidet in seiner Arbeit zwei unterschiedliche Geometrien für Injektionskammern, die „Tropfenförmige Kammer“ und die „Konische Kammer“. Er bezieht sich dabei unter anderem auf mehrere Patentschriften von [KNF90], [GaL95] und [BKC+05]. Das Injektionsverfahren ist insgesamt schwerer zu beherrschen und die Imprägnierung dicker Querschnitte ist meist anspruchsvoller als im offenen Verfahren. In vielen Fällen ist die Injektionskammer keine separate Anlagenkomponente, sondern direkt in das Härtewerkzeug integriert.

Bei allen beschriebenen Varianten kann das Matrixsystem vor dem Imprägnieren temperiert und somit die Viskosität in einem bestimmten Bereich eingestellt werden. Ebenso können die Halbzeuge vorgewärmt werden, um somit den Reaktionsbeginn bestmöglich zu kontrollieren [JLZ07] [MiP10] [Sta00] [Bla99].

Nach dem Imprägniervorgang erfolgt die Konsolidierung auf Nenndicke, also die Verdichtung und Verteilung der Matrix im Querschnitt, und die anschließende Aushärtung des Laminats im Pultrusionswerkzeug. In Längs- und Querrichtung sind in der Regel mehrere Heizzonen angeordnet, um den Wärmeeintrag in das Profil über die Länge und Breite steuern zu können. Zusätzlich zu diesen Heizzonen können Kühlzonen im Bereich des Werkzeugeintrittes angebracht sein. Dadurch ist ein kontrollierter Reaktionsbeginn einstellbar. Pultrusionswerkzeuge sind meist zweiteilig mit Ober- und Unterwerkzeug ausgeführt, sodass das Innere des Werkzeuges einfacher zu reinigen ist.

Über eine Abzugseinheit wird die Zugkraft auf das ausgehärtete Profil übertragen. Hierbei wird zwischen einem Raupenabzug und alternierenden Klemmgreifern unterschieden [Via17]. In beiden Fällen sind die Klemmbacken, die mit dem Profil in Kontakt stehen, dem Profilquerschnitt angepasst, um eine möglichst homogene Kraftereinleitung zu ermöglichen und das Profil nicht zu beschädigen. Ein Vorteil des Raupenabzuges ist die Kraftereinleitung über größere Flächen [Owe03]. Durch größere Klemmflächen können Spannungsspitzen verringert und ein Druckversagen, insbesondere bei Hohlprofilen, vermieden werden. Für alternierende Klemmgreifer sprechen die deutlich geringere Anzahl notwendiger Klemmbacken und somit auch

günstigere Anschaffung- und Unterhaltskosten sowie geringere Rüstzeiten. Daher eignet sich der Raupenabzug primär für Produktionen mit wenig Produktwechsel [Nel96]. Typische Abzugsgeschwindigkeiten im Pultrusionsprozess liegen zwischen 0,3 m/min und 1,5 m/min, abhängig von verwendetem Matrixsystem, Lagenaufbau und Querschnittgeometrie. [BGH12] und [Bau13] nennen sogar Werte von bis zu 3 m/min, bzw. 5 m/min. Abschließend wird das produzierte Profil mit Hilfe einer mitlaufenden Säge in der gewünschten Länge abgetrennt.

2.2 Ausgangsmaterialien

Im Folgenden werden die für den Pultrusionsprozess üblichen Ausgangsmaterialien beschrieben. Ein Pultrudat wird aus einer Kombination von Matrixwerkstoff und Verstärkungsfasern hergestellt. Die Wahl der Ausgangsmaterialien ist entscheidend für die mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Endproduktes. Auch Beständigkeit gegen äußere Einflüsse sowie Optik und Haptik werden maßgeblich beeinflusst [Her16].

2.2.1 Matrixwerkstoffe

Die Matrix im Verbundwerkstoff ermöglicht unter anderem das Einleiten der äußeren Kräfte in die Fasern, das Übertragen der Kräfte zwischen den Fasern, die Bestimmung der Faserlage, die Bestimmung der äußeren Gestalt des Produktes und den Schutz der Fasern vor äußeren Einflüssen [HeM11]. Die im Pultrusionsprozess eingesetzten Matrixsysteme sind polymere Matrixsysteme und lassen sich in duromere und thermoplastische Systeme unterteilen. Pultrusion mit thermoplastischen Matrixsystemen stellt eine separate Verfahrensvariante dar und wird im Folgenden nicht weiter verfolgt.

Die wichtigsten Vertreter duromerer Systeme sind [MiP10]:

- Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze)
- Vinylesterharze (VE-Harze)
- Epoxidharze (EP-Harze)
- Polyurethanharze (PUR-Harze)

UP-Harze haben aufgrund des günstigen Rohstoffpreises ein breites Anwendungsspektrum [MiP10] und zeigen unkomplizierte Verarbeitbarkeit gute Korrosionseigenschaften. Das Schwindungsverhalten und somit die Maßhaltigkeit und das Verzugsverhalten bei unsymmetrischen Profilformen sind jedoch nachteilig, können jedoch durch Additive eingestellt werden. VE-Harze kommen zum Einsatz wenn eine erhöhte Chemikalienbeständigkeit erforderlich ist. Zudem zeigen VE-Harze eine höhere Schlagzähigkeit und eine bessere interlaminae Scherfestigkeit. Geringere Verarbeitungsgeschwindigkeiten und ein höherer Preis im Vergleich zu UP-Harzen zählen zu den Nachteilen der VE-Harze [Bla99]. EP-Harze zeigen in

diesem Vergleich die besten mechanischen Eigenschaften und bieten zudem eine hohe Dauergebrauchstemperatur und eine gute Temperaturbeständigkeit [MiP10]. Weiterhin haben EP-Harze auch bei erhöhten Temperaturen eine gute Durchschlagsfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Diese Eigenschaften machen EP-Harze zu den favorisierten Matrixsystemen im Automobilbau sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie. Ein Nachteil der EP-Harze ist der im Vergleich zu UP-Harzen ca. 6- bis 8-mal höhere Preis [Bla99]. EP-Matrixsysteme lassen sich hinsichtlich der Härterkomponente in anhydrid- und aminhärtende Systeme unterteilen. So haben beispielsweise anhydridgehärtete EP-Harze bessere elektrische Eigenschaften als amingehärtete, sind empfindlicher gegenüber Säuren- bzw. Baseneinwirkung [Wis11].

Bei der Verarbeitung von PUR-Harzen existieren, analog zu EP-Harzen, keine Styrolemmissionen. Zudem lassen sich PUR-Harze auf unterschiedliche Anwendungsfälle adaptieren. Verarbeitungseigenschaften wie Reaktivität und Viskosität können auf den jeweiligen Fertigungsprozess abgestimmt werden. Die hohe Reaktivität und damit kurze Verarbeitungszeit gilt gleichzeitig als Herausforderung bei der Verarbeitung dieser Systeme. Weiterhin ist die hohe Empfindlichkeit der Systeme gegenüber Feuchtigkeit zu beachten [MiP10]. PUR-Systeme lassen sich in aromatische und aliphatische Systeme unterteilen. Der große Vorteil aliphatischer Systeme gegenüber aromatischen ist ihre UV-Stabilität, häufig nachteilig ist jedoch die langsamere Aushärtung aliphatischer Systeme [StL16, Ber08].

Ein signifikanter Bestandteil der Matrixsysteme für den Pultrusionsprozess ist das interne Trennmittel (englisch: IMR – Internal Mold Release). Durch Zugabe des IMR lässt sich die Abzugskraft reduzieren. Typische Massenanteile liegen zwischen 0,5 % und 2 % gemessen am Matrixsystem [Mis01].

Alle beschriebenen Matrixsysteme können mit verschiedenen Additiven und Füllstoffen auf bestimmte Anforderungen angepasst werden. Als Füllstoffe kommen anorganische und organische, natürliche und synthetische Materialien zum Einsatz. Im Wesentlichen werden drei Ziele verfolgt [Sch07]:

- Strecken/Verbilligen (teuren Kunststoff mit Hilfe von günstigem Füllstoff verbilligen)
- Eigenschaften einstellen und verbessern (Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit oder Schlagzähigkeit verbessern)
- Einfärben (Beimengen von Farbmitteln)

Weiterführende Informationen zu Matrixsystemen sind in [Kle10] zu finden.

2.2.2 Verstärkungsmaterialien

Im Pultrusionsprozess werden vorwiegend Verstärkungsmaterialien in Faserform verwendet. Ihre Aufgabe ist es, die mechanischen Eigenschaften des Laminats zu verbessern [HeM11]. In strukturellen Laminaten tragen die Verstärkungsfasern zwischen 70 % und 90 % der Last und müssen daher selbst entsprechend hohe mechanische Kennwerte aufweisen [Maz02]. Die Fasern werden nach der Bauteilbelastung ausgerichtet. Glasfasern (GF) sind aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und einem vergleichsweise niedrigen Rohstoffpreis weit verbreitet. Kohlenstofffasern (CF) sind hingegen teurer, weisen aber deutlich höhere mechanische Eigenschaften bei geringerer Dichte auf und werden daher vorwiegend für anspruchsvolle Anwendungsbereiche wie die Luft- und Raumfahrtindustrie oder dem Automobilbau verwendet. Neben Glas und Kohlenstoff existieren noch weitere Fasermaterialien wie Aramid oder nachwachsende Rohstoffe, die jedoch einen geringen Marktanteil haben [Mar15]. Weiterführende Informationen zu Fasermaterialien sind in [FZR95] zu finden.

Neben der einfachen Faserform (Roving) finden auch komplexere Architekturen der Verstärkungsmaterialien in Form von textilen Halbzeugen Anwendung im Pultrusionsprozess. Zu den weit verbreiteten Halbzeugen zählen Gelege, Gewebe, Wirrfasermatten, Vliese und Geflechte [Tho02]. Durch unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf Faktoren wie Anwendungsfall, Ausgangswerkstoff, Bauteilgeometrie, und Lastfall haben sich unterschiedliche flächige Halbzeuge etabliert. Abbildung 4 zeigt eine Möglichkeit zur Einteilung am Markt verfügbarer flächiger Halbzeuge.

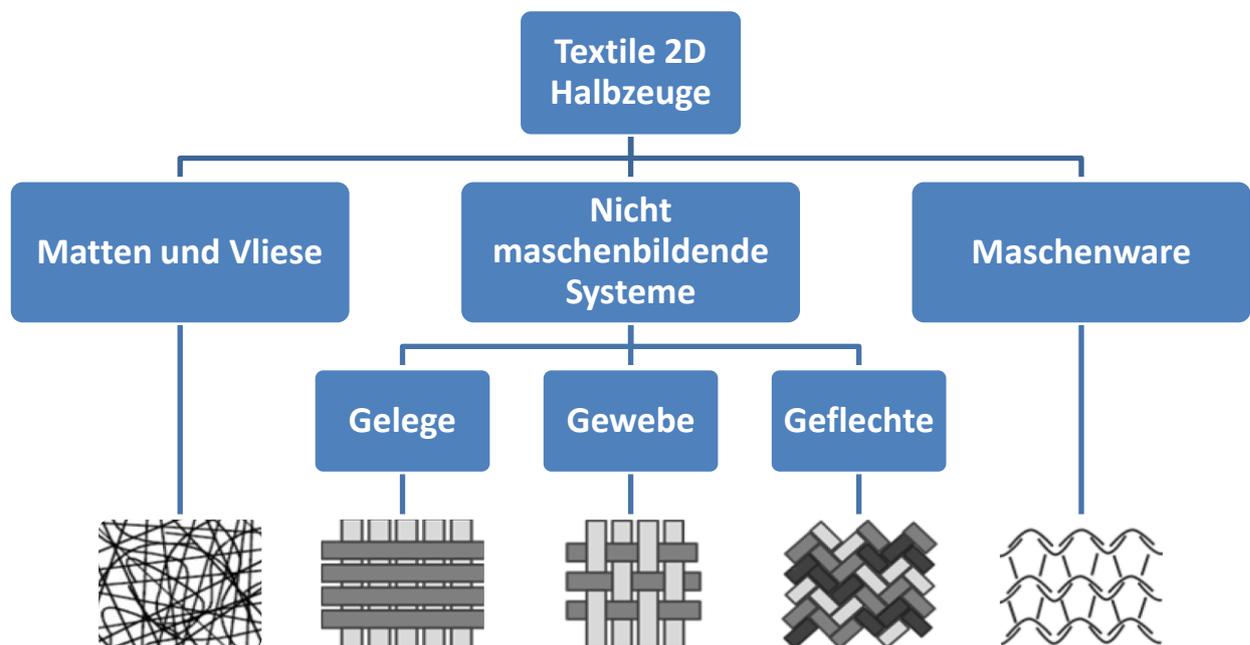


Abbildung 4: Übersicht flächiger Halbzeuge, nach [Hen13]

Diverse Parameter wie Maschenbildung, Faserorientierung, Faserondulation, Drapierfähigkeit, Verschiebestabilität und Imprägnierbarkeit der unterschiedlichen Halbzeuge haben Einfluss auf die Verarbeitungs- und erzielbaren Bauteileigenschaften und beeinflussen sich unter Umständen gegenseitig [Hen13]. Unabhängig vom Halbzeugtyp lassen sich verschiedene Grammaturn herstellen. Die Grammaturn gibt Auskunft über die Masse pro Fläche. [Che11] beschreibt ausführlich den Aufbau, die Eigenschaften und Herstellprozesse der unterschiedlichen Halbzeuge und gibt umfassende Empfehlungen für deren Weiterverarbeitung.

Abgesehen von den genannten Neumaterialien zeigen sich vermehrt Ansätze Fasern oder textile Halbzeuge aus Recyclingprozessen zu pultrudieren. [KBF+15] beschreibt einen Pultrusionsprozess unter Verwendung eines recycierten Kohlenstofffaserhalbzeuges in Vliesform. Die Herstellung und Zusammensetzung des Halbzeuges wird in [Kre14] erläutert.

2.3 Anwendungsbeispiele

Die Anwendungsgebiete für Pultrusionsprofile reichen von der Elektroindustrie und dem Chemieanlagenbau [BHS08] über infrastrukturelle Anwendungen wie Lichtmaste oder Kabeltrassen [Jac06] bis hin zur Bauindustrie mit Brückenkonstruktionen und tragenden Gebäudeteilen [BGH12]. Die Firma Fiberline Composites A/S in Middelfart, Dänemark hat ihren Firmensitz mit selbst produzierten GF-Pultrudaten als tragende Gebäudeteile in einer großen Glasfassade realisiert [BAS12].

Die Querschnittsgeometrien der bislang auf dem Markt erhältlichen Profile gehen von einfachen Voll- und Hohlprofilen bis hin zu komplexen Mehrfachkavitäten, wie beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt. Hinsichtlich des Lagenaufbaus ist diese Auswahl jedoch begrenzt, da vorwiegend unidirektional verstärkte Profile, ggf. in Kombination mit GF-Matten, angeboten werden.

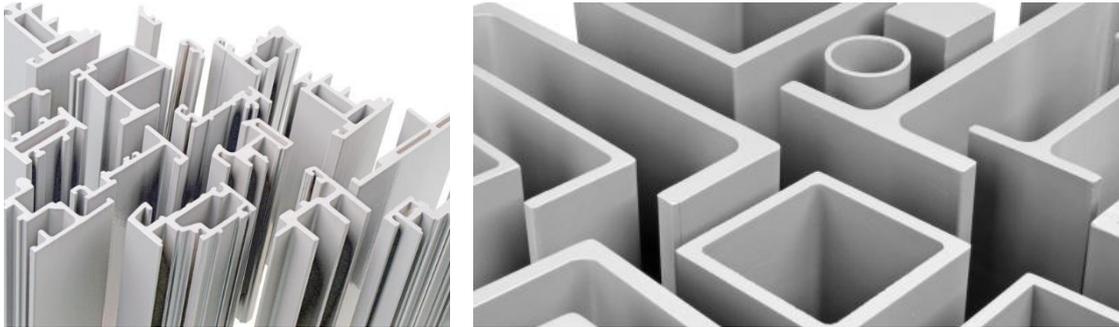


Abbildung 5: Beispiel für, auf dem Markt verfügbare, Querschnittsgeometrien [Fib18]

Im Automobilbau beschränkte sich der Einsatz von Faserverbundbauteilen im Allgemeinen bisher auf Fahrzeuge mit geringer Stückzahl und den Rennsport [Jun15]. Große Stückzahlen sind lediglich bei der aktuellen 7er Baureihe von BMW und den Fahrzeugen von BMW i umgesetzt. Aus aktuellen Patentanmeldungen lässt sich jedoch ein Trend in Richtung Großserieneinsatz von Pultrudaten im Automobilbau erkennen. [CTJ+15] beschreibt einen Stoßfängerträger im Vorderwagen und [RHR15] hat einen Seitenschweller als weiteres Bauteil der Karosseriestruktur entwickelt. Mit [HRS+13] hat sich die Firma ThyssenKrupp Presta AG in Eschen, Liechtenstein eine Lenksäule für ein Kraftfahrzeug patentieren lassen. Auch im Antriebsstrang eines Fahrzeuges, beispielsweise als Antriebswelle, können Pultrudate eingesetzt werden [Len15]. [Buy14] beschreibt im Benchmark seiner Arbeit eine pultrudierte Diagonalstrebe im Unterboden des Mercedes Benz SLS AMG Black Series und verweist auf ein Patent der Daimler AG zur Anbindung dieser Streben [Asm13].

2.4 Sonderverfahren

Neben der klassischen Pultrusion, also einem Verfahren zur Herstellung nicht gekrümmter Profile mit konstantem Querschnitt, existieren zahlreiche Verfahrensabwandlungen. Ziel dieser Abwandlungen ist meist die Restriktion auf gerade Profile aufzuheben oder multiaxiale Verstärkungen einzubringen [Bla99]. Im Folgenden werden die wichtigsten Sonderverfahren der Pultrusion genannt und kurz erläutert:

Beim Pullwinding werden vor der Imprägniereinheit eine oder mehrere Wickeleinheiten integriert. Auf diese Weise lassen sich Faserorientierung ungleich der Abzugsrichtung realisieren und somit

die Bauteileigenschaften in Querrichtung verbessern. Die Rotationsgeschwindigkeit der Wickeleinheiten und die Abzugsgeschwindigkeit bestimmen die Faserorientierung. Diese liegt typischer Weise im Bereich zwischen 0° (keine Wicklung) und 85° relativ zur Abzugsrichtung [Gut97]. Der grundsätzliche Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt.

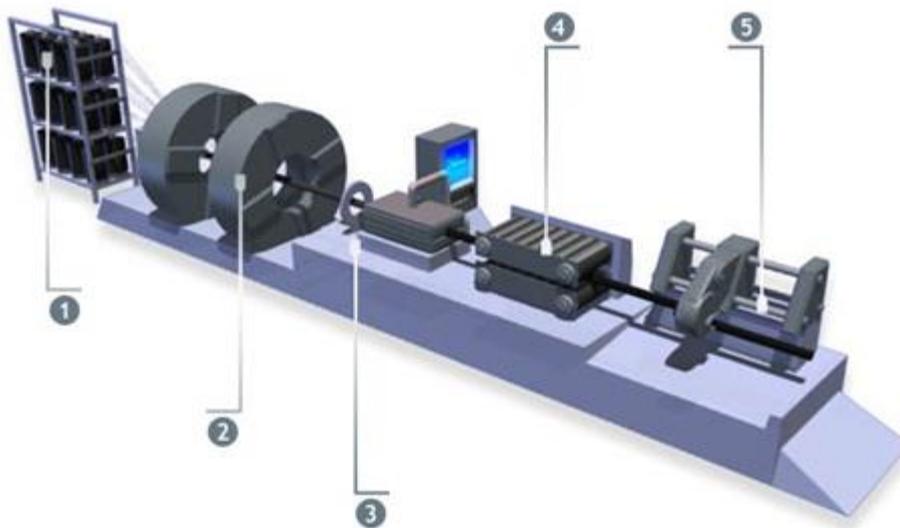


Abbildung 6: Pullwinding – Verfahrensablauf [Exe09]

Beim Pullbraiding, auch Flechtpultrusion genannt, werden der Imprägniereinheit, analog zum Pullwinding, ein oder mehrere Flechtringe vorangestellt. Auch hier dient das Geflecht der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in Querrichtung. Der abgelegte Faserwinkel ergibt sich als Funktion der Rotationsgeschwindigkeit der Flechtringe und der Abzugsgeschwindigkeit [Hoa09]. Der grundsätzliche Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 7 beispielhaft dargestellt.

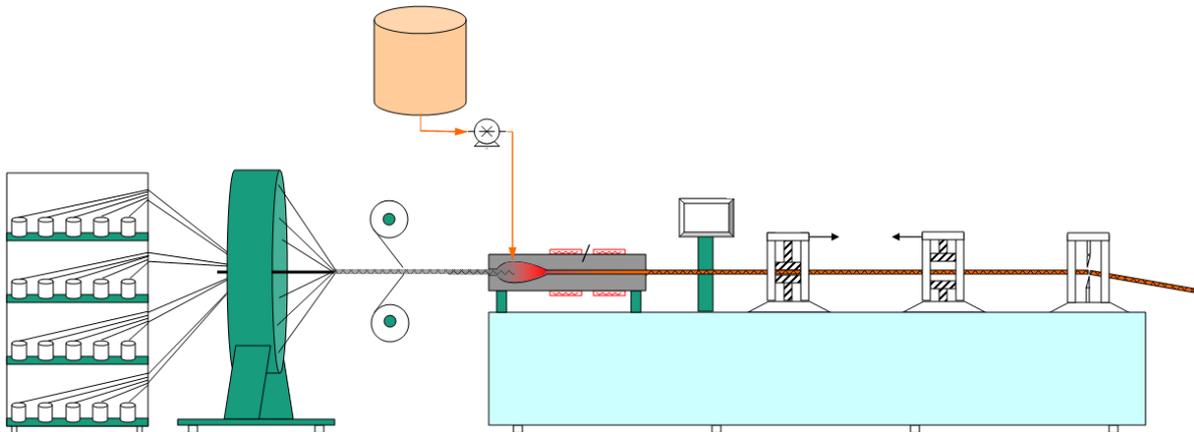


Abbildung 7: Pullbraiding – Verfahrensablauf, nach [Bez16]

Auch Kombinationen von Pullwinding und Pullbraiding sind möglich [BKB+14]. In der Regel beschränken sich Pullwinding und Pullbraiding auf Profile mit rundem oder annähernd rundem Querschnitt.

Die Radius-Pultrusion ermöglicht die Herstellung von Profilen mit konstantem Krümmungsradius in kontinuierlichem Ablauf. Anders als bei der klassischen Pultrusion, mit stehendem Werkzeug und sich bewegendem Werkstück, bewegt sich hierbei ein gekrümmtes Werkzeug schrittweise über das entstehende Bauteil [Bur16, TDM16, ReH17, Jan17].

Bei der B-Stage Pultrusion laufen die Prozessschritte Materialbereitstellung, Vorformung, Imprägnierung und Konsolidierung wie in Kapitel 2.1 beschrieben ab oder werden mit dem Verfahren Pullbraiding ergänzt. Die Aushärtung wird in einem ersten Temperaturschritt innerhalb des Pultrusionswerkzeuges jedoch nur teilweise vollzogen. So entsteht ein handhabbarer Vorformling, der in nachgelagerten Prozessen, wie beispielsweise dem Blasformen, in die gewünschte Geometrie gebracht werden kann. Anschließend erfolgen die Aushärtung bei erhöhter Temperatur und die Endbearbeitung zum fertigen Bauteil [Dre15, BTS+03, Bez16].

2.5 Studien zu Prozessparametern und Wirkzusammenhängen

Nachfolgend werden bislang bekannte Untersuchungen des Pultrusionsprozesses in Bezug auf Prozessparameter und deren Wechselwirkungen analysiert. Unterschieden werden hierbei zunächst die Herangehensweisen an die Untersuchungen und die Zielsetzungen. Darauf folgend werden die identifizierten und untersuchten Prozessparameter sowie deren Wirkzusammenhänge im Prozess ausgewertet. Abschließend werden die untersuchten Quellen anhand ihrer Schwerpunkte verglichen.

2.5.1 Herangehensweisen und Zielsetzungen

Die bisherigen Untersuchungen zum Pultrusionsprozess mit Schwerpunkt auf Prozessparameter sowie deren Wechselwirkungen lassen sich hinsichtlich der angewandten Herangehensweise untergliedern. Simulative und/oder experimentelle Herangehensweisen sind vorwiegend bei umfangreichen und in sich zusammenhängenden Studien wiederzufinden. Rein simulative Ansätze beziehen sich meist auf die Vorhersage der Reaktionskinetik des Matrixsystems und haben eine Abschätzung der Temperaturverteilung und des Aushärtegrades im Bauteil zum Ziel. Beispiele hierfür sind [LJL01] und [JLW03]. Kombinationen von Simulation und experimentellem Abgleich verfolgen meist die gleichen Ziele, sind jedoch um eine Validierung der berechneten Ergebnisse durch Versuche erweitert. Solche Ansätze finden sich beispielsweise in [CPP06], [CPP07] und [Bez17]. Werden experimentelle Ansätze verfolgt, stehen vielfach die mechanischen Eigenschaften der Pultrudate im Fokus. Vereinzelt werden zudem Rückschlüsse auf qualitative Eigenschaften der Bauteile, wie beispielsweise das Schwindungsverhalten oder die Oberflächenbeschaffenheit, gezogen. Experimentelle Ansätze werden beispielsweise von [JBP91] und [Bla99] angewandt. Somit lässt sich neben der Herangehensweise auch zwischen zwei Zielsetzungen unterscheiden:

- Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften der Bauteile
- Untersuchungen zu den qualitativen Eigenschaften der Bauteile (z.B. Bauteilverzug, Reinharzbereiche, Qualität der Imprägnierung)

2.5.2 Prozessparameter und Wirkzusammenhänge

In [VRV+96] wird eine ausführliche Studie mit Simulationen und Versuchen in guter Deckung zum Aushärtegrad beschrieben. Als Materialkombination wird eine EP-Matrix und CF verwendet. Die Imprägnierung wird durch ein Harzbad realisiert. Zu den untersuchten Parametern zählen das Temperaturprofil, die Abzugsgeschwindigkeit und der Faservolumengehalt (FVG). Die Gründe dieser Parameterwahl werden nicht erläutert. Als Fazit steht ein großer Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit und des Temperaturprofils auf den Aushärtegrad. Eine hohe Abzugsgeschwindigkeit führt zu geringerem Aushärtegrad, höhere Werkzeugtemperaturen führen zu höherem Aushärtegrad und niedriger FVG führt zu höherem Aushärtegrad. Weiterhin stellt [VRV+96] fest, dass die weitere Härtung des Pultrudates nach Werkzeugaustritt durch hohe Eigentemperatur großen Einfluss auf den Aushärtegrad hat. Zu beachten ist jedoch, dass die Untersuchungen an einem Profil mit geringem Durchmesser von 0,95 mm durchgeführt wurden und somit die Exothermie der Matrix eine große Rolle spielt. Die untersuchten Abzugsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,2 m/min und 0,4 m/min, die Temperaturen zwischen 165 °C und 175 °C.

[LJL01] beschreibt eine simulative Untersuchung an einem U-Profil mit 24 mm Höhe und Breite, imprägniert mittels Harzbad. Auch hier wird eine EP-Matrix mit CF gewählt, jedoch nur die Temperaturverteilung als Parameter betrachtet. Die Kernaussagen beziehen sich auf den Einfluss des Aushärtegrades auf die mechanischen Eigenschaften der Pultrudate und den Einfluss von Temperaturverteilung, Abzugsgeschwindigkeit, FVG und Matrixtyp auf den Aushärtegrad. Genauere Zusammenhänge werden nicht beschrieben. Für das Temperaturprofil in Zone #1 bis #3 vom Werkzeugeintritt aus gesehen gibt [LJL01] folgende Empfehlung. Die Temperatur in Zone #1 (erste Zone nach Werkzeugeintritt) sollte eher gering sein, um im Profil und an der Profiloberfläche ähnliche Temperaturen zu gewährleisten. In Zone #2 (Zone in der Mitte des Werkzeuges) sollten hohe Temperaturen gewählt werden, da die Reaktion im Inneren beginnt und exotherm verläuft. Zone #3 (am Werkzeugende) sollte gemäßigt beheizt werden, da an dieser Stelle im Prozess der Aushärtegrad bereits hoch genug ist.

Auch [JLW03] simuliert den Aushärtegrad und dessen Verteilung mit einer EP-Matrix. Als Faser wird jedoch GF verwendet. Bauteilgeometrie und Imprägniervariante sind identisch mit denen bei [LJL01]. Die untersuchten Parameter sind die Anzahl der Heizplatten, die Heizleistung und die Abzugsgeschwindigkeit. Im betrachteten Bereich der Abzugsgeschwindigkeit von 0,14 m/min bis 0,3 m/min stellt [JLW03] einen Abfall des Aushärtegrades mit steigender Abzugsgeschwindigkeit fest. Diese Feststellung deckt sich mit den Ergebnissen der bisher analysierten Studien.

[JLZ07] nutzt ebenfalls das beschriebene U-Profil mit der Imprägnierung durch ein Harzbad und führt die Untersuchungen von [JLW03] weiter. Als konkretes Ergebnis im betrachteten Einzelfall erzielt [JLZ07] mit nur vier statt sechs Heizplatten bei gleichbleibender beheizter Fläche einen 14 % höheren Aushärtegrad im Bauteil. Der betrachtete Bereich der Abzugsgeschwindigkeit wurde auf 0,6 m/min erweitert.

[BTH12] simuliert die Temperaturverteilung im Bauteil während des Prozesses unter Verwendung von CF, imprägniert durch ein Harzbad mit EP-Matrix. Er bezieht sich in seinen Untersuchungen auf [VRV+96] und baut darauf auf, indem er den thermischen Kontaktwiderstand und den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Werkzeug und Bauteil in seine Berechnungen mit einbezieht. Dadurch verbessert er die numerischen Ergebnisse.

[JBP91] beschreibt eine experimentelle Untersuchung und verwendet eine EP-GF-Kombination im Harzbad-Prozess. Analysiert wird der Einfluss von Fadenspannung, Abzugsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung auf die mechanischen Eigenschaften. Festzuhalten ist, dass eine

erhöhte Fadenspannung die mechanischen Eigenschaften nicht signifikant verbessert. Für Temperaturverteilung und Abzugsgeschwindigkeit gibt es eine optimale Kombination, kleine Abweichungen resultieren in untergeordneter Veränderung der mechanischen Eigenschaften. Eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit bei gleichem Temperaturprofil resultiert in schlechteren mechanischen Eigenschaften. Die untersuchten Abzugsgeschwindigkeiten und Werkzeugtemperaturen liegen im Bereich von 0,15 m/min bis 0,30 m/min, bzw. von 165 °C bis 188 °C.

In [BAH14] wird ein mathematisches Modell der Reaktionskinetik erarbeitet und damit die Temperaturverteilung und der Aushärtegrad im Bauteil errechnet. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Studien wird hier jedoch eine UP-Matrix untersucht. Auf Fasermaterial, Bauteildimension und Imprägniervariante wird nicht gesondert eingegangen.

Ein Jahr später veröffentlichten dieselben Autoren eine weitere simulative Parameterstudie mit experimentellem Abgleich. [BHA15] untersucht ebenfalls ein UP-Harz, geht hier aber auf die Schwindung der Matrix ein und analysiert den Bauteilverzug. Die Ergebnisse des mathematischen Modells stimmen in guter Näherung mit den Validierungsversuchen überein. Als Geometrie wurde ein rechteckiges Hohlprofil mit 64x27x2 mm³ gewählt.

[LiP01] legt den Fokus auf den Anfahrprozess. Untersucht werden die Einflüsse von Abzugsgeschwindigkeit, Temperaturverteilung und das Werkzeugvorheizen in zwei Varianten auf die Temperaturverteilung im Bauteil. Die Imprägnierung der CF mit einer VE-Matrix erfolgt im Harzbad. Als Fazit hält [LiP01] fest, dass eine Verringerung der Abzugsgeschwindigkeit und der Werkzeugtemperaturen eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil weiter in Richtung Werkzeugausgang verschieben. Trotz der Tatsache, dass die Ergebnisse von [LiP01] nur bedingt auf einen Serienprozess übertragbar sind, wird hier vollkommen richtig die bisher weit verbreitete „Trial and Error“ Vorgehensweise als Problem erkannt und der Bedarf nach besserem Prozessverständnis formuliert.

[CPP06] und [CPP07] sind simulative Untersuchungen mit Abgleich zu Experimenten aus der Literatur. [CPP06] erstellt zwei Simulationen mit EP-Matrix und GF mit Imprägnierung per Harzbad und untersucht die Auswirkungen der Temperaturverteilung (105 °C bis 200 °C, bei 0,14 m/min) auf den Aushärtegrad. Ergebnis sind mathematische Modelle zur Matrixreaktion, die sich mit den experimentellen Ergebnissen aus der Literatur decken. [CPP07] untersucht ebenfalls

den Zusammenhang von Temperaturverteilung und Aushärtegrad, jedoch im Bereich von 165 °C bis 197 °C.

Eine weitere simulative Untersuchung der Auswirkungen der Temperaturverteilung auf den Aushärtegrad wird in [SAZ06] beschrieben. Die analysierte Materialkombination ist eine EP-Matrix mit CF imprägniert im Harzbad. [SAZ06] kommt zum Ergebnis, dass die Annahme konstanter Werte für spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitwert zur Überschätzung des Aushärtegrades führt. Wie auch bei [LIP01] wird hervorgehoben, dass der Pultrusionsprozess zwar simpel erscheint, es jedoch essenziell ist, Wirkzusammenhänge und Einflüsse auf die Bauteilqualität umfassend zu verstehen.

[BCS08] untersucht simulativ eine PUR-Matrix mit GF im Injektionsprozess und gleicht die Ergebnisse teilweise mit Experimenten ab. Die gewählten Parameter sind Faservolumengehalt, Kammerhöhe, Kämmerlänge, Abzugsgeschwindigkeit und Matrixviskosität. Die Zielgröße ist der Druck in der Injektionskammer. Auch [Bla99] beschreibt diese Zielgröße als Indikator für die Qualität der Konsolidierung und Imprägnierung. Das Ergebnis von [BCS08] ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Druckes in der Injektionskammer und des Fließfrontverlaufs. Es beschreibt einen ansteigenden Druck bei steigender Abzugsgeschwindigkeit (im Bereich von 0,61 m/min bis 1,52 m/min), steigender Viskosität, steigendem Faservolumengehalt, steigender Länge der Kammer und reduzierter Kammerhöhe.

Die Herangehensweise von [Bla99] ist primär experimentell mit einzelnen rechnerischen Nachweisen zu den gewonnenen Erkenntnissen. Untersucht wird eine Kombination von UP-Matrix und GF imprägniert im Harzbad. Die Gründe der Parameterwahl werden nicht erläutert. Als Fazit einer thermischen Prozessanalyse zur Untersuchung der Reaktionskinetik steht die Vorhersage des Temperaturfeldes im Bauteil über die Werkzeuglänge mit guter Deckung zur experimentellen Überprüfung. [Bla99] zerlegt die Abzugskraft in Komponenten und kommt zu der Erkenntnis, dass die Abzugskraft mit dem Faservolumengehalt überproportional ansteigt. Die in der theoretischen Analyse untersuchten Abzugsgeschwindigkeiten sind 0,5 m/min, 1,0 m/min und 1,5 m/min. Weiterhin steigt die Abzugskraft mit der Abzugsgeschwindigkeit linear an. Hier sind die in der theoretischen Analyse untersuchten Abzugsgeschwindigkeiten 0,5 m/min, 0,75 m/min, 1,0 m/min, 1,25 m/min und 1,5 m/min. Die Messwerte aus Versuchen streuen jedoch, sodass die Deckung von Berechnung und Versuch nur bedingt gegeben ist. Aus Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften zeigt sich, dass die Biegefestigkeit mit zunehmender Abzugsgeschwindigkeit und abnehmender Werkzeugtemperatur sinkt. Als

Begründung wird ein reduzierter Aushärtegrad genannt. Zudem steigt die Biegefestigkeit mit steigendem Faservolumengehalt. Weitere Versuche zeigen, dass mit zunehmender Abzugsgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur der Fehlstellengehalt sinkt. Als Begründung führt [Bla99] die erhöhte Wahrscheinlichkeit eines Austragens von Luftblasen durch erhöhten Matrixrückstrom entgegen der Ziehrichtung an. Durch einen Vergleich zweier Varianten der Faserführung und die Überprüfung des Faservolumengehaltes über den Querschnitt weist [Bla99] nach, dass die genaue Führung der Rovings bis zum Werkzeugeintritt eine homogene Verteilung des Faservolumengehaltes begünstigt. Aus Versuchen zum Schwindungsverhalten geht hervor, dass erhöhte Werkzeugtemperaturen zu erhöhter Schwindung führen. Ein signifikanter Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf die Schwindung konnte nicht festgestellt werden.

In der Dissertation von [Bez17] werden Simulationstechniken eingesetzt, um ein besseres Verständnis für die physikalischen Prozesse bei der Pultrusion im geschlossenen Verfahren unter Verwendung einer Injektionskammer zu gewinnen. Die Simulationen und experimentellen Validierungen werden an einer konischen und an einer tropfenförmigen Kammer durchgeführt. Untersucht werden beispielsweise Druck-, Temperatur-, Viskositäts- und Aushärtegradfelder in der Kavität an Kombinationen eines hybriden PUR-Matrixsystems (siehe Kapitel 2.4, „B-Stage Pultrusion“) mit GF-Rovings, CF-Rovings und textilen Halbzeugen aus Glas. Analysierte Abzugsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von von 0,3 m/min bis 0,5 m/min. Die Erkenntnisse der Arbeit von [Bez17] stehen in Verbindung mit [Bez16] und [BWS+15].

[TBD14] beschreibt eine weitere Simulation der Reaktionskinetik an einem EP-CF-Verbund mit Imprägnierung mittels Harzbad. Sein Ziel ist es, die Abzugsgeschwindigkeit zu maximieren und den Energieverbrauch der Heizungen zu minimieren. Als Ergebnis schildert er eine Konfiguration mit maximaler Abzugsgeschwindigkeit bei geringem Energieverbrauch für seinen speziellen Anwendungsfall. Er erkennt zudem, dass der Energieverbrauch mit der Abzugsgeschwindigkeit steigt, da mehr Heizleistung benötigt wird um die erforderliche Wärme in das Laminat zu übertragen.

Im Folgenden werden weitere Quellen mit einzelnen Bezügen auf Prozessparameter und deren Wechselwirkungen analysiert. Diese Erkenntnisse stammen nicht aus in sich zusammenhängenden Studien, sondern beschreiben lediglich pauschale Zusammenhänge.

[Gut97] schildert einzelne Ergebnisse verschiedener Studien mit diversen Faser-Matrix-Kombinationen. Wie [Bla99] kommt auch er zu dem Ergebnis, dass die Abzugskraft mit dem FVG ansteigt. Ab einem FVG von 68 % sei der Zusammenhang sogar exponentiell [Gut97].

[Via17] beschreibt die Verwendung textiler Halbzeuge als größte Herausforderung im Pultrusionsprozess, da die Reibung zwischen Halbzeug und Werkzeug die Geometrie der Halbzeuge beeinflusst. Auch er formuliert den Bedarf nach umfassendem Prozessverständnis.

[Sta00] geht auf die Wandstärkenverteilung über den Querschnitt ein. Er empfiehlt eine konstante Wandstärke über den Querschnitt, da es sonst zu Reinharzbereichen kommen kann. Als Begründung führt [Sta00] an, dass ein Textil bei Wandstärkesprüngen die größere Wandstärke nicht ausfüllt.

[CKS+05] geht primär auf die Auslegung einer Injektionskammer und den Injektionsprozess im Allgemeinen ein. Seine Untersuchungen basieren auf einer PUR-GF-Kombination. Wichtig sei es, keine Totgebiete in der Injektionskammer zu haben. Als Faustregel für hochreaktive Matrixsysteme gilt, dass das gesamte Volumen der Kammer durch den Matrixdurchfluss 3-5mal ausgetauscht sein muss, bevor die Gelzeit vorüber ist. So gelieren keine Matrixreste in der Kammer und nur so sei eine Serienproduktion möglich. Die eingangsseitige Abdichtung der Kammer wird durch Komprimierung des trockenen Lageaufbaus gewährleistet. [CKS+05] empfiehlt eine Komprimierung auf 85-90 % der Nenndicke des Bauteils. Weiterhin sollte der Eintritt der Kammer aktiv gekühlt werden, sodass sich die Wärme der Werkzeugheizungen nicht auf die Kammer überträgt. Bei Abzugsgeschwindigkeiten über 1,5 m/min sollte am Werkzeugende ebenfalls aktiv gekühlt werden und so die Temperatur des Profils bei Austritt unter 120 °C zu halten. Auf diese Weise ist ein möglicher Bauteilverzug zu begrenzen.

2.5.3 Forschungsschwerpunkte

Die in Kapitel 2.5 analysierten Quellen aus dem Stand der Forschung und Technik werden nun anhand deren Schwerpunkte verglichen und so die Forschungsschwerpunkte für diese Arbeit definiert.

Tabelle 1 zeigt eine Auswertung zum Stand der Forschung und Technik hinsichtlich der angewandten Imprägniervariante, der untersuchten Faser-Matrix-Kombination und der Zielsetzung der Untersuchungen. Weiterhin dargestellt ist, ob die Auswahl der untersuchten Parameter näher erläutert wurde oder die Parameter lediglich genannt und als relevant deklariert wurden. Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften haben als Zielgröße beispielsweise

den Aushärtegrad oder Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Untersuchungen zu qualitativen Eigenschaften der Bauteile beschäftigen sich beispielsweise mit den Einflüssen auf Oberflächenbeschaffenheit, Qualität der Imprägnierung oder den Verzug.

Tabelle 1: Auswertung zum Stand von Forschung und Technik

Quelle	Imprägnierung	Faser	Matrix	Untersuchungen zu mech. Eigenschaften der Bauteile	Untersuchungen zu qualitativen Eigenschaften der Bauteile	Parameterauswahl
[VRV+96]	Harzbad	CF	EP	x	-	nicht erläutert
[LJL01]	Harzbad	CF	EP	x	-	nicht erläutert
[JLW03]	Harzbad	GF	EP	x	-	nicht erläutert
[JLZ07]	Harzbad	GF	EP	x	-	nicht erläutert
[BTH12]	Harzbad	CF	EP	x	-	nicht erläutert
[JBP91]	Harzbad	GF	EP	x	-	nicht erläutert
[BAH14]	Harzbad	/	UP	x	-	nicht erläutert
[BHA15]	Harzbad	GF	UP	-	x	nicht erläutert
[LiP01]	Harzbad	CF	VE	-	x	nicht erläutert
[CPP06]	Harzbad	GF	EP	-	x	nicht erläutert
[CPP07]	Harzbad	/	/	-	x	nicht erläutert
[SAZ06]	Harzbad	CF	EP	-	x	nicht erläutert
[BCS08]	Injektion	GF	PUR	-	x	nicht erläutert
[Bla99]	Harzbad	GF	UP	x	x	nicht erläutert
[Bez17]	Injektion	CF/GF	PUR	-	x	nicht erläutert
[TBD14]	Harzbad	GF	EP	-	-	nicht erläutert
[Gut97]	/	div.	div.	-	-	nicht erläutert
[Via17]	/	/	/	-	x	nicht erläutert
[Sta00]	/	/	/	-	x	nicht erläutert
[CKS+05]	Injektion	GF	PUR	-	x	nicht erläutert

Die Auswertung zeigt, dass das Harzbad die häufig untersuchte Variante der Imprägnierung ist, Injektion hingegen nur vereinzelt herangezogen wurde. Auch GF als Fasermaterial ist weitreichend untersucht. Meist wurden entweder Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften oder auf die Bauteilqualität untersucht. Selten wurden beide Bereiche abgedeckt. Im Hinblick auf potentielle Wechselwirkungen ist es jedoch wichtig, beide Zielgrößen zu untersuchen, da gegebenenfalls Parameterkombinationen existieren, die auf beide Bereiche Auswirkungen haben.

Eine weitere Erkenntnis aus dieser Auswertung ist, dass keine der analysierten Quellen näher auf die Auswahl der Parameter eingegangen ist. Die Parameter wurden nur genannt und

anschließend auf deren Einfluss hin untersucht. Das bedeutet nicht, dass die Wahl grundlos sei, es wurde lediglich ein ingenieurstechnischer Ansatz verfolgt. Häufig wurden vorhergehende Untersuchungen um einen weiteren Parameter ergänzt. Ferner lag der Fokus bei keiner der bisherigen Untersuchungen auf der Analyse des gesamten Prozesses, sondern auf der Optimierung einzelner Parameter. Es zeigt jedoch, dass es bislang keine umfassende Systemanalyse gibt, bei der die relevanten Prozessparameter identifiziert und ganzheitlich auf deren Einfluss auf den Prozess analysiert werden. [LiP01], [Via17] und [SAZ06] haben die bisher weit verbreitete „Trial and Error“ Vorgehensweise als Problem erkannt und den Bedarf nach besserem Prozessverständnis formuliert.

Zusammengefasst wurde die Kombination von Injektion, EP-Matrix und CF bislang nur unzureichend untersucht. Querverstärkungen in Form von textilen Halbzeugen wurden nur vereinzelt untersucht. Auch eine umfassende Systemanalyse zur Identifikation relevanter Prozessparameter, unabhängig von verwendeten Matrixsystemen, wurde bisher nicht durchgeführt. Aufgrund der in Kapitel 2 genannten Vorteile der Imprägnierung mittels Injektion, der besonderen Eignung von CF und EP-Matrixsystemen für Anwendungen im Automobilbereich sowie der verbesserten mechanischen Eigenschaften in Querrichtung durch Gelege, liegt der Fokus der vorliegenden Untersuchungen auf dieser Kombination. Somit ist es notwendig, zunächst relevante Parameter zu identifizieren und deren Einfluss auf den Prozess in einer theoretischen Analyse zu verstehen. Anschließend bedarf es der experimentellen Validierung dieser Systemanalyse.

Die, für die nachfolgenden Untersuchungen gewählte, Materialkombination (CF, EP, Gelegeverstärkung) repräsentiert aktuell nur ein kleines Marktsegment. Wie nachfolgende Abbildung 8 (Verteilung abgeschätzt) zeigt, ist der Marktanteil von Profilen aus Kohlenstofffasern und EP-Matrix im Vergleich zu anderen Werkstoffkombinationen gering.

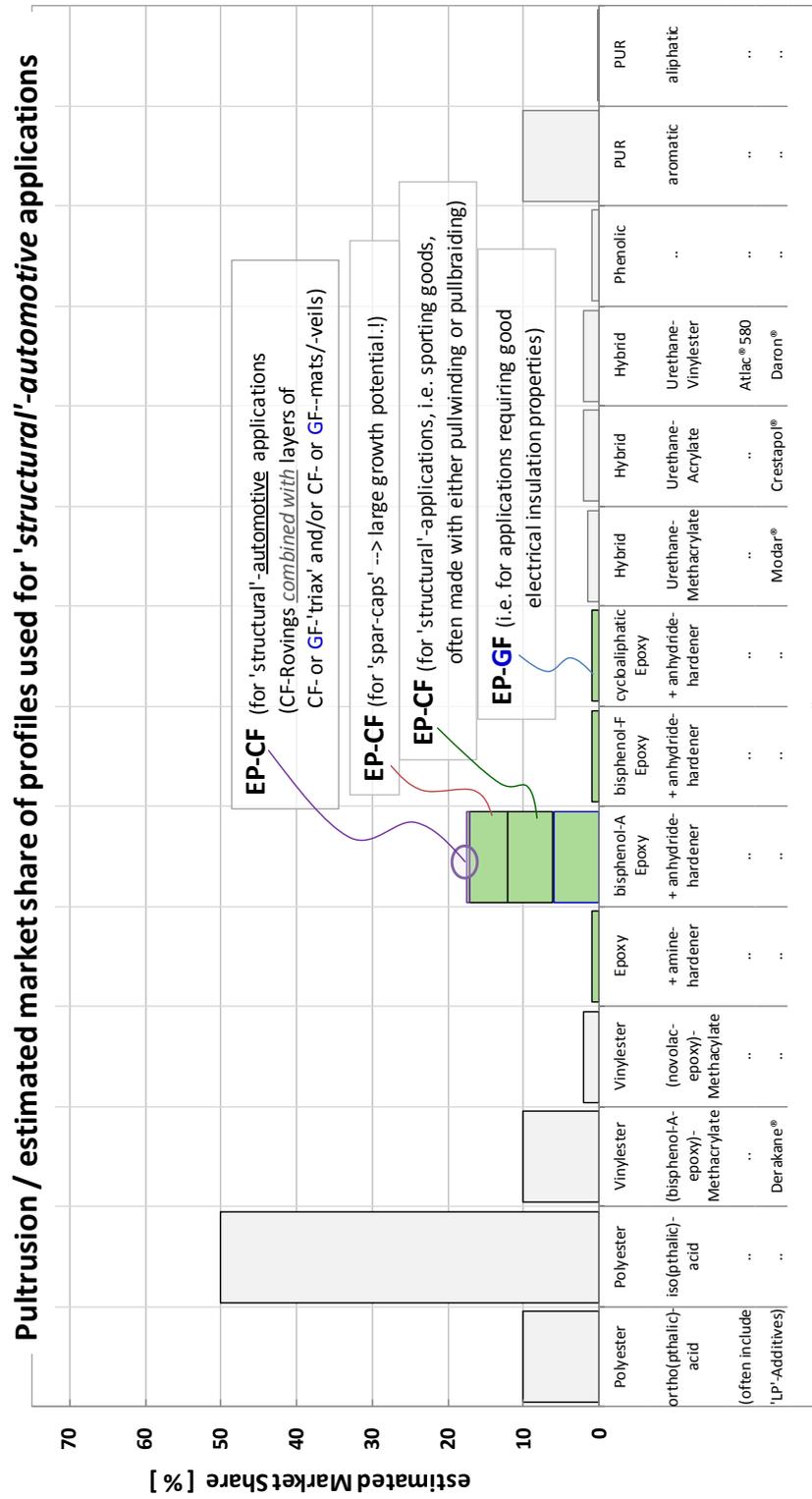


Abbildung 8: Vergleich der Marktanteile nach Matrixsystem (Abschätzung) [Eng18]

3 Systemanalyse zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge

Eine Systemanalyse dient der systematischen Untersuchung von Elementen eines Systems, die miteinander in Beziehung stehen. Der Begriff Systemanalyse umfasst eine Vielzahl von Methoden und Darstellungen, mit dem Ziel, ein System mit dessen Parametern und Wechselwirkungen zu beschreiben. Die Methoden und Darstellungen sind insbesondere für die Erstellung von Versuchsplänen wichtig [Ron14].

3.1 Methodik

Zu Beginn der Systemanalyse steht eine erste Parametersammlung in Form eines **Brainstormings**. Diese Art der Darstellung lässt noch keine Rückschlüsse auf gegenseitige Abhängigkeiten zu, ermöglicht jedoch das Finden neuer Ideen und Ansätze.

Ein **Ishikawa-Diagramm** mit den Teilbereichen Mitwelt, Mensch, Maschine, Material und Methode als Weiterentwicklung des Brainstormings stellt eine erste Visualisierung, Strukturierung und Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge dar [Ron17]. Es unterstützt die Parametersammlung. Diese zunächst qualitative Betrachtung ermöglicht nun Rückschlüsse auf gegenseitige Abhängigkeiten, hat jedoch den Nachteil, dass vernetzte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge mit mehr als zwei Parametern nur schwer darstellbar sind [Ron14]. Mögliche Wechselwirkungen werden anschließend im Detail analysiert.

Hierbei fließen sowohl Expertenschätzungen, als auch die in der Fachliteratur bereits dokumentierten Erkenntnisse mit ein [Ron15]. Untersucht werden der Zusammenhang der Parameter untereinander und deren Einfluss auf die Bauteilqualität. Als Methode eignet sich hierfür die **Intensitäts-Beziehungsmatrix**. Die Befüllung der Matrix erfolgt zunächst durch zeilenweise Listung der Parameter inklusive dem Zielobjekt (Bauteilqualität). Eine genaue Beschreibung des Zielobjektes folgt in Kapitel 3.3. Anschließend sind die gleichen Faktoren horizontal in der ersten Zeile einzutragen. Somit stellt diese Methode einen paarweisen Vergleich aller möglichen Kombinationen dar [Lin09] [Ron14] [Ron15]. Die Anzahl möglicher Beziehungen nimmt quadratisch mit der Anzahl der Parameter zu. Für die quantitative Gewichtung der Wechselwirkungen der Parameter untereinander und der Einfluss der Parameter auf die Bauteilqualität, wird ein angepasstes Bewertungsschema in Anlehnung an [Ron15] verwendet. Das Bewertungsschema und eine beispielhaft befüllte Intensitäts-Beziehungsmatrix sind in Abbildung 9 dargestellt.

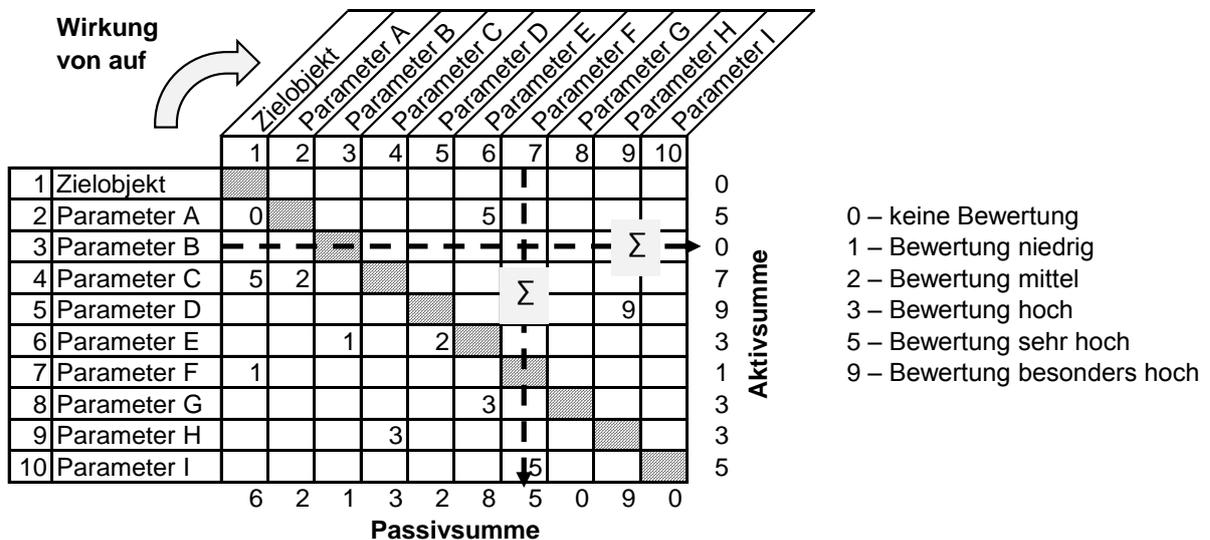


Abbildung 9: Grundstruktur einer Intensitäts-Beziehungsmatrix, nach [Ron15]

Die befüllte Matrix wird anschließend zeilen- und spaltenweise ausgewertet. Die Summe einer Zeile stellt die sogenannte Aktivsumme dar (rechts aufgetragen). Dieser Wert kennzeichnet, wie stark dieser Parameter Andere beeinflusst. Die Summe einer Spalte ergibt die sogenannte Passivsumme und kennzeichnet, wie stark der jeweilige Parameter von Anderen beeinflusst wird [Lin09]. Im **Intensitäts-Beziehungsdiagramm** wird die Aktivsumme über der Passivsumme für jeden Parameter aufgetragen. Es können vier Quadranten unterschieden werden. Diese sind für die weitere Vorgehensweise von Bedeutung und beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt.

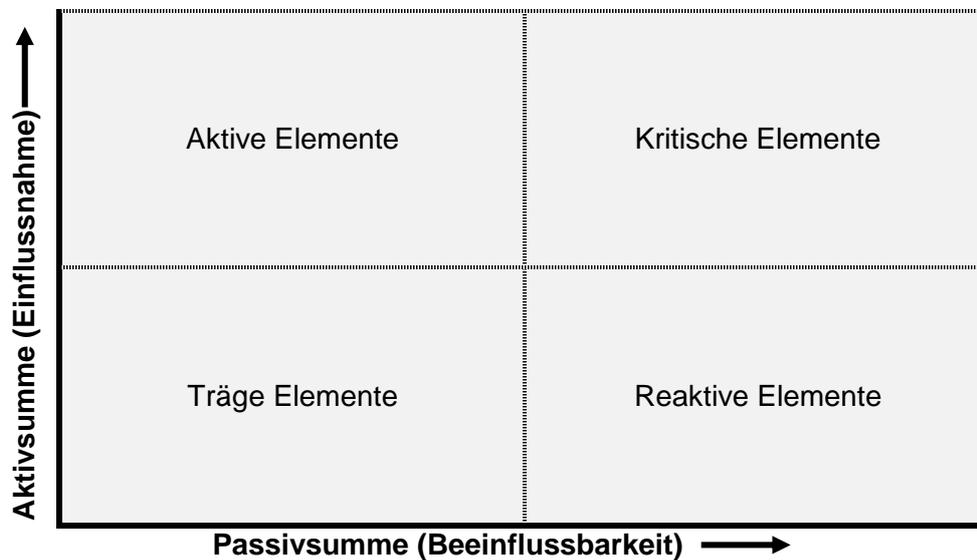


Abbildung 10: Grundstruktur eines Intensitäts-Beziehungsdiagrammes, nach [Ron15]

Für den abzuleitenden Versuchsplan sind primär Parameter im aktiven und kritischen Feld zu berücksichtigen [Ron15]. Auf Parameter im trägen Feld kann verzichtet werden. Die Parameter im reaktiven Feld können in der Betrachtung als nicht kontrollierbare Parameter mit aufgeführt werden, sind aber im weiteren Versuchsplan nicht zu variieren. Da solche Parameter jedoch primär beeinflusst werden und kaum beeinflussen, können diese als weitere Zielgrößen betrachtet werden [Ron15].

3.2 Anforderungen der automobilen Großserie

Der Fokus dieser Systemanalyse liegt auf Anwendungen für die automobilen Großserie. Aufbauend auf den in Kapitel 2.5 beschriebenen Forschungsschwerpunkten sind daher weitere Randbedingungen zu berücksichtigen. Trotz der besonderen Eignung der Materialkombination, bestehend aus CF und einer EP-Matrix in strukturellen Anwendungen, wird die GF mit einbezogen. Gründe hierfür sind unter anderem Kostensenkungspotentiale und ein erweiterter Anwendungsbereich aufgrund elektrischer Isolation. Betrachtet werden sowohl reine UD-Lagenaufbauten als auch Lagenaufbauten mit textiler Querverstärkung in Form von Gelegen. Typische Bauteildicken liegen im Bereich von 2 mm bis 5 mm, typische Geometrien sind sowohl offene als auch geschlossene Querschnitte wie beispielhaft in Abbildung 11 dargestellt.

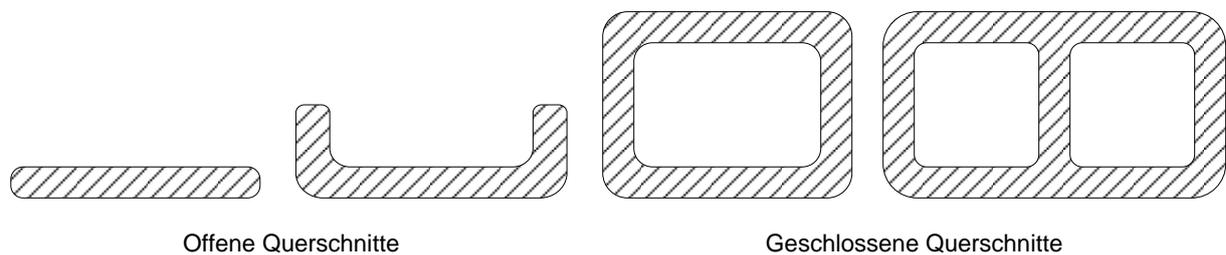


Abbildung 11: Beispielhafte Querschnittsgeometrien

Die betrachtete Art der Imprägnierung ist Injektion. Sonderverfahren, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, werden nicht betrachtet.

3.3 Zielgrößen

Für eine umfassende Systemanalyse gilt es zunächst die Zielgrößen zu definieren, also Größen, an deren Ausprägungen sich die Wirkung von Einflussgrößen beurteilen lassen. Für strukturelle Anwendungen im Automobilbau sind die **mechanischen Eigenschaften** der Pultrudaten von großer Bedeutung. Somit zählen Festigkeits- und Steifigkeitswerte zu den Zielgrößen. Weiterhin relevant ist die **Geometrie**. Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben ist, abhängig vom eingesetzten Matrixsystem und den gewählten Werkzeugtemperaturen, mit Einflüssen auf das Schwindungsverhalten und somit die Maßhaltigkeit und das Verzugsverhalten zu rechnen. **Oberflächeneigenschaften** wie beispielsweise Einfallstellen, freigelegte Fasern oder Blasen sind ebenfalls zu berücksichtigen. Abhängig von den verwendeten Faserverstärkungen in Roving- und/oder Textilform muss mit Einflüssen auf Faserverteilungen, Faserondulationen und Schichtdicken gerechnet werden. Zudem stellt die **Imprägnierqualität** mit Merkmalen wie beispielsweise Trockenstellen, Reinharzbereichen und Rissen eine wichtige Zielgröße dar. Eine ausführliche Definition der Merkmale folgt in Kapitel 4.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die genannten Größen im weiteren Verlauf in der **Zielgröße Bauteilqualität** zusammengeführt.

3.4 Systemanalyse

3.4.1 Parametersammlung und Parameterdefinition

Als Ansatzpunkt für die spätere Strukturierung und Visualisierung mittels Ishikawa-Diagramm dient ein Brainstorming unter Berücksichtigung des Standes der Forschung und Technik. Ziel des Brainstormings ist es möglichst umfassend relevante Prozessparameter zu listen. In Tabelle 2 ist das Ergebnis des Brainstormings und eine Definition der Parameter dargestellt.

Tabelle 2: Brainstorming und Parameterdefinition

Parameter	Beschreibung
Imprägniervariante	Injektion oder Harzbad
Beschnitt	Ablängen der Bauteile
Preforming	Vorformen und Positionieren der Rovings und textilen Halbzeuge
Halbzeugtemperierung	Temperierung der Rovings und textilen Halbzeuge
Werkzeug	Formgebendes Aushärtewerkzeug
Querschnittgestaltung	Querschnitt des Pultrudates
Prozesshilfsmittel	Hilfsmittel zur Prozessbeeinflussung
Multiaxialgelege	-
UD-Faser	-
Matrix	-
Misch- und Dosieranlage	Anlagenteil zur Matrixversorgung
Abzug	Anlagenkomponente Abzugseinheit
Datenerfassung	Anlagenseitige Erfassung von Prozessdaten
Spulengatter	Anlagenteil zur Bereitstellung der Rovings
Anzahl Personal	-
Erfahrung	Erfahrung des Personals
Sorgfalt	Sorgfalt des Personals hinsichtlich Gewissenhaftigkeit und Genauigkeit
Motivation	Motivation des Personals
Training + Ausbildung	Training + Ausbildung des Personals
Patente	Patente mit Einfluss auf Prozessgestaltung hinsichtlich methodischer Einschränkungen
Gesetze	Gesetze mit Einfluss auf Prozessgestaltung, z.B. hinsichtlich werkstofflicher Einschränkungen
Betriebsstrategie	Schichtmodell/Betriebszeit
Finanzielle Rahmenbedingungen	Finanzielle Rahmenbedingungen mit Einfluss auf Prozessgestaltung
Vertragliche Rahmenbedingungen	Vertragliche Rahmenbedingungen mit Einfluss auf Prozessgestaltung
Umgebungstemperatur	-
Zugluft	Luftstrom mit Einfluss auf Positionierung und Temperierung
Luftfeuchtigkeit	-
Bezugsart	Hausfertigung oder Kaufteil

3.4.2 Ishikawa-Analyse

Aufbauend auf den Ergebnissen des Brainstormings wird ein Ishikawa-Diagramm erstellt. Ziel ist die systematische Darstellung der Parameter. Auf diese Weise lässt sich die Parametersammlung strukturieren und detaillieren. Hierzu werden zunächst die bereits identifizierten Parameter den fünf Teilbereichen *Mitwelt*, *Mensch*, *Maschine*, *Material* und *Methode* zugeteilt. Für die Zielorientierung der Darstellung wird die in Kapitel 3.3 erarbeitete Zielgröße Bauteilqualität herangezogen.

Für den Teilbereich *Maschine* sind insbesondere die Anlagenkomponenten Misch- und Dosieranlage und Abzug zu detaillieren. Da der Abzug mit dem Parameter Abzugsgeschwindigkeit maßgeblich für die Verweildauer im Werkzeug und damit den Wärmeeintrag ins Pultrudat verantwortlich ist, wird hier weiter aufgeteilt. Die Misch- und Dosieranlage beeinflusst durch die Genauigkeit des Mischungsverhältnisses und den bereitgestellten Injektionsdruck die Imprägnierqualität und wird daher ebenfalls feiner untergliedert.

Der Teilbereich *Material* enthält Ausgangsmaterialien und Halbzeuge. Aufgrund der Vielfalt möglicher Materialkombinationen und dem großen Anteil der Faserverstärkung an den mechanischen Eigenschaften der Pultrudate ist ebenfalls eine feinere Untergliederung erforderlich. So wird bei den Faserverstärkungen in Roving- und Textilform insbesondere auf das Fasermaterial sowie die Grammaturen und Winkel eingegangen. Der Ast Matrix wird in die typischen Bestandteile eines Matrixsystems zerlegt.

Im Teilbereich *Methode* wird näher auf die Parameter Imprägniervariante, Preforming, Werkzeug und Querschnittgestaltung eingegangen. Preforming und Werkzeug machen zwar zunächst den Anschein, Teil des Bereiches Maschine zu sein, sind aber aufgrund ihres methodischen Hintergrundes nicht als Anlagenteil geführt. Da Preforming und Imprägniervariante maßgeblich an der Verteilung der Fasern im Pultrudat sowie der Imprägnierqualität beteiligt sind, werden diese Parameter weiter detailliert. Das Werkzeug wird im Hinblick auf Materialität und Geometrie untergliedert und die Querschnittgestaltung wird bezüglich der Geometrie und des Lagenaufbaus feiner aufgeteilt.

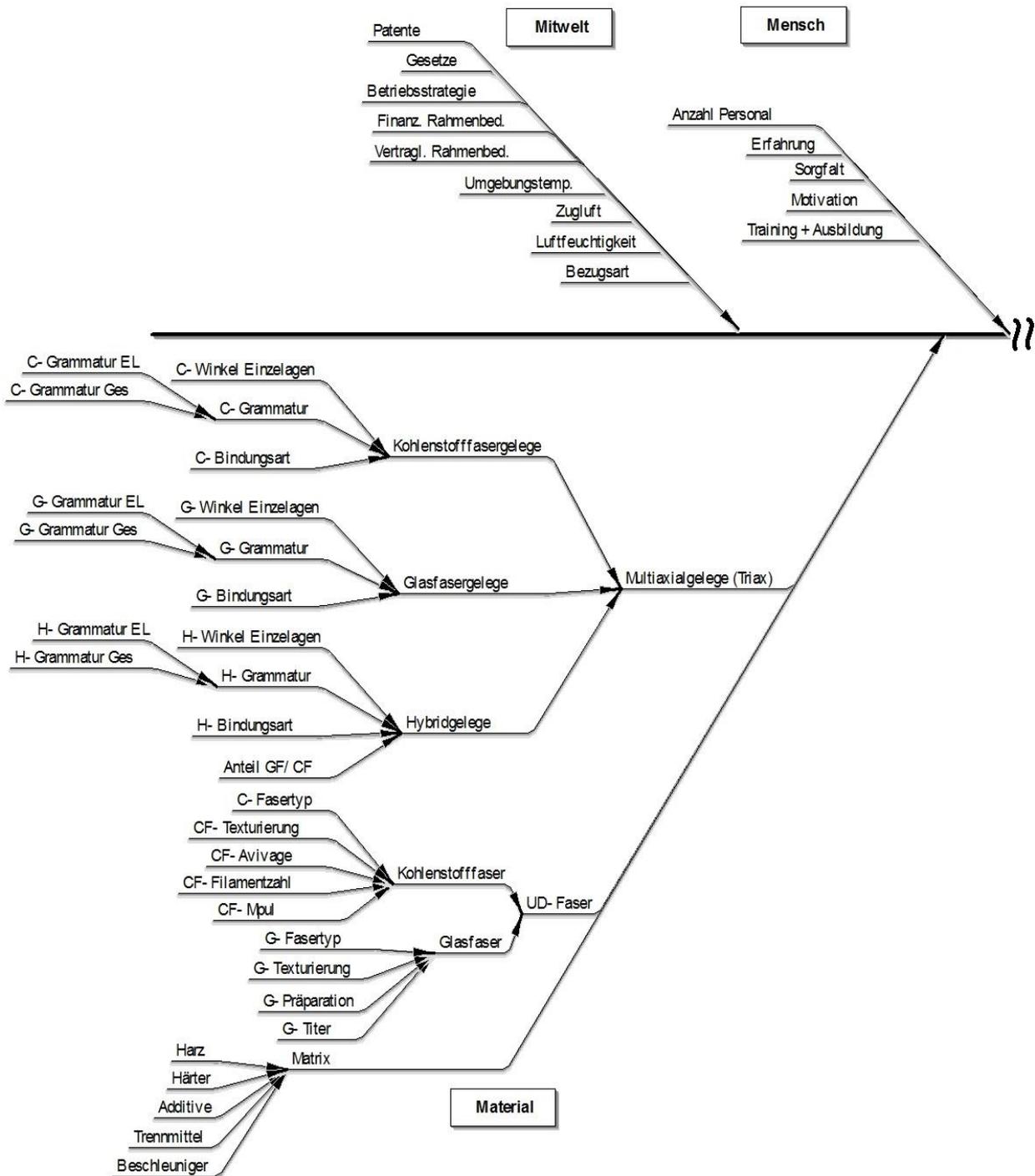


Abbildung 12: Ishikawa-Diagramm Teil 1

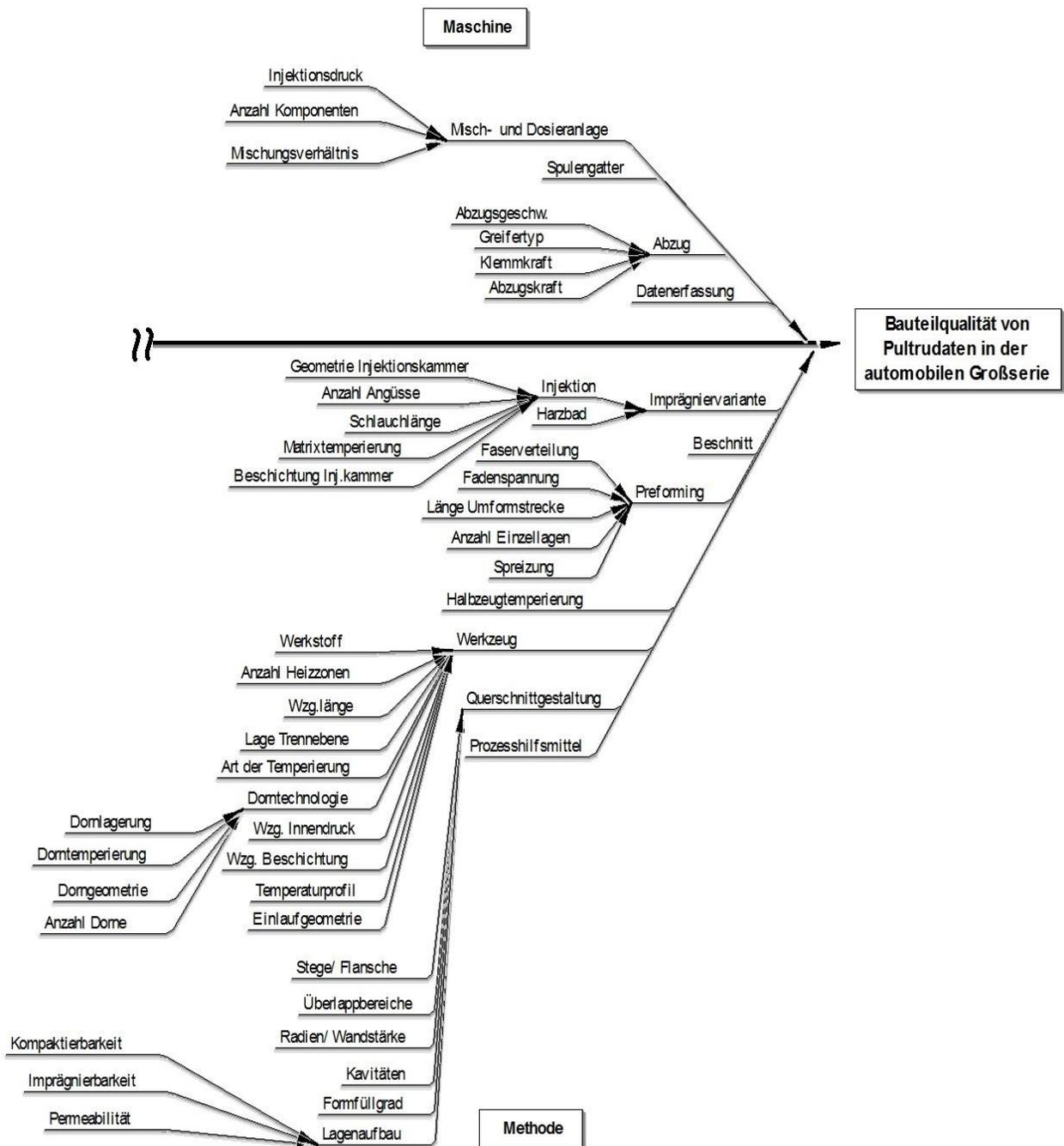


Abbildung 13: Ishikawa-Diagramm Teil 2

In Abbildung 12 und Abbildung 13 ist das Ergebnis der Strukturierung, Zuordnung und Erweiterung als Ishikawa-Diagramm dargestellt. Die Detaillierung der Äste „Abzug“, „Misch- und Dosieranlage“, „Imprägniervariante“, „Preforming“, „Werkzeug“, „Querschnittgestaltung“, „Matrix“, „UD-Faser“, „Multiaxialgelege“ und eine Definition der neu hinzugekommenen Parameter sind in Anhang A dargestellt.

3.4.3 Eingrenzung der Parameter

Das in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellte Ishikawa-Diagramm enthält inklusive der Zielgröße 106 Parameter und birgt damit 11236 mögliche Querbeziehungen. Aufgrund der in Kapitel 3.2 genannten Randbedingungen und Prämissen der automobilen Großserie kann der Umfang der Parameter für die weiteren Untersuchungen eingegrenzt werden. Ferner bestehen Einschränkungen bezüglich Mess- und Einstellbarkeit.

Im Teilbereich *Maschine* werden Spulengatter und Datenerfassung nicht weiter betrachtet, da diese Parameter nach dem Stand der Forschung und Technik anlagenspezifisch und somit nicht variabel sind. Die Parameter Training + Ausbildung, Motivation, Sorgfalt und Erfahrung sind weder mess- noch einstellbar und werden daher ebenfalls aus der Betrachtung genommen. Der Teilbereich *Mitwelt* mit Ausnahme von Bezugsart wird nicht weiter betrachtet, da diese Parameter als gegeben angesehen werden müssen und nicht variiert werden können. Ferner sind diese Parameter teilweise soziologischer Art und vor technischem Hintergrund nicht analysierbar. Auf die im Teilbereich *Material* aufgeführten Untergliederungen von Glas- und Kohlenstofffaser wird für die weitere Untersuchung verzichtet, da eine vorgegebene Faser verwendet wird. Für die Detailierung des Parameters Matrix gelten Einschränkungen bezüglich der Einstellbarkeit, da bei der Zusammensetzung das Datenblatt des Herstellers beachtet werden muss und auch hier Standardprodukte nach dem Stand der Forschung und Technik verwendet werden. Gleiches gilt für den Parameter Mischungsverhältnis. Der Parameter Werkzeuginnendruck kann nicht aktiv eingestellt werden und wird daher als Kontrollgröße weiter betrachtet. Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Imprägnierung mittels Injektion liegt wird der Parameter Harzbad ebenso vernachlässigt. Eine Differenzierung zwischen verbleibenden und gekürzten Parametern nach den vollzogenen Kürzungen ist in Anhang B dargestellt.

3.4.4 Bewertungsdurchläufe und Plausibilisierung

Nach der Eingrenzung aufgrund von Mess- und Einstellbarkeit, Randbedingungen, Prämissen und Stand der Forschung und Technik verbleiben inklusive der Zielgröße 75 Parameter im Ishikawa-Diagramm und ermöglichen somit 5625 Querbeziehungen. Der nächste Schritt ist eine detaillierte Bewertung der ausgewählten Parameter der ersten Ebene, wie beispielsweise Abzug und Preforming, mit Hilfe von Experten auf dem Gebiet der Pultrusion und des Automobilbaus. Vor der Einführung von Querbeziehungen gilt es die Parameter mit wenig Einfluss auf die Zielgröße zu kürzen. Unter Einbezug der kollektiven Bewertung eines am Markt etablierten Pultrusionsunternehmens [Bor15], subjektiven Expertenbewertungen des Fraunhofer ICT in Pfinztal und Technologieentwicklern der BMW Group [Eng15b], [Sit15], [Eng15a], sowie des in Kapitel 2 aufgeführten Standes der Technik, ergibt sich die in Tabelle 3 dargestellte Auswertung.

Tabelle 3: Bewertung der ersten Ebene

5M	Parameter	Bewertung 1	Bewertung 2	Bewertung 3	Bewertung 4	Bewertung 5	Literatur	MW
Maschine	Abzug	3	2	2	1	1	2	1,83
	Misch- und Dosieranlage	3	3	3	5	3	1	3,00
Mensch	Anzahl Personal	2	3	1	1	1	-	1,60
Mitwelt	Bezugsart	2	3	0	-	5	-	2,50
Methode	Imprägniervariante	9	9	3	9	3	-	6,60
	Beschnitt	2	2	2	5	1	-	2,40
	Preforming	9	9	5	5	9	-	7,40
	Halbzeugtemperierung	3	5	3	3	1	-	3,00
	Werkzeug	5	5	3	9	9	5	6,00
	Querschnittgestaltung	5	5	3	5	5	3	4,33
	Prozesshilfsmittel	2	3	1	9	-	1	3,20
Material	Multiaxialgelege	9	9	9	5	9	-	8,20
	UD-Faser	5	5	3	3	1	-	3,40
	Matrix	5	5	3	5	9	9	6,00

0 Bewertung keine
1 Bewertung niedrig
2 Bewertung mittel
3 Bewertung hoch
5 Bewertung sehr hoch
9 Bewertung besonders hoch

Parameter mit keiner (0) bis mittlerer Bewertung (2) im Mittelwert (MW) sollen in den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden. Da die Parameter in den Ästen des Ishikawa-Diagramms nach Zugehörigkeit sortiert sind und in der Bewertung lediglich die erste Ebene betrachtet wird, können dadurch evtl. wichtige Parameter in tieferen Ebenen ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund folgt auf die Bewertung der ersten Ebene eine Plausibilitätsüberprüfung durch paarweisen Vergleich der auszuschließenden und verbleibenden Parameter gemäß des in Abbildung 14 dargestellten Schemas. Das Ergebnis der Plausibilitätsüberprüfung ist in Anhang C zu finden.

auszuschließende Parameter

	Parameter A	Parameter B	Parameter C		
				3	
Parameter 1	-1	1	1	1	33,33%
Parameter 2	0	1	1	2	66,67%
Parameter 3	-1	0	1	0	0,00%
	3	-2	2	3	
	-66,67%	66,67%	100,00%		

Parameter A,B,C nach Bewertung ursprünglich auszuschließen. Paarweiser Vergleich mit verbleibenden Parametern 1,2,3. Fallunterscheidung Beispiel (Parameter 1/Parameter A):

1: "Einfluss von Parameter 1 ist größer als Einfluss von Parameter A"

-1: "Einfluss von Parameter 1 ist geringer als Einfluss von Parameter A"

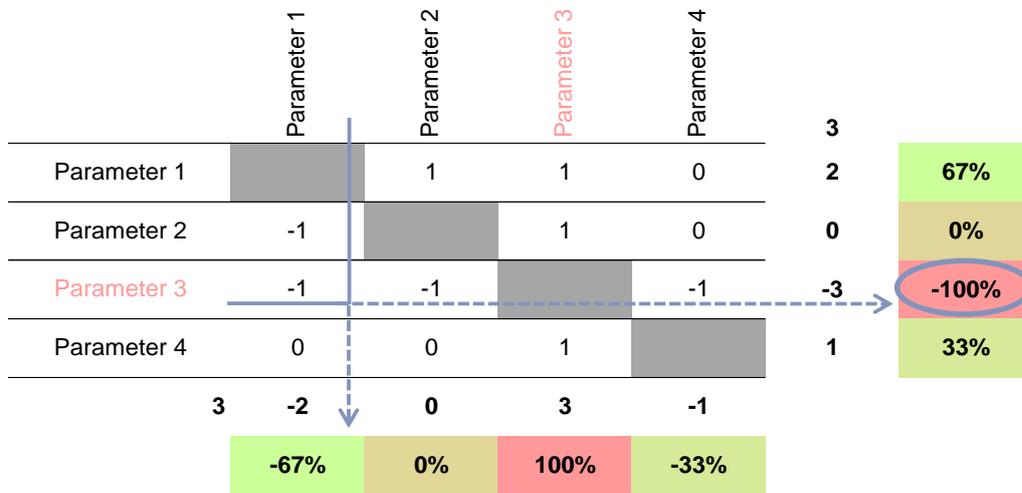
0: "Einflüsse von Parameter 1 und Parameter A sind in etwa gleich"

Erkenntnis: Parameter A wird nicht ausgeschlossen, sondern weiter betrachtet

Abbildung 14: Schema der Plausibilitätsüberprüfung

Der unter dem Ast Abzug geführte Parameter Abzugsgeschwindigkeit würde nach der Bewertung der ersten Ebene aus der weiteren Betrachtung genommen, wird aber aufgrund der Plausibilitätsüberprüfung weiter betrachtet. Eine Differenzierung zwischen verbleibenden und gekürzten Parametern nach der Bewertung der ersten Ebene und der zugehörigen Plausibilitätsüberprüfung ist in Anhang B dargestellt.

Nach der Bewertung der ersten Ebene erfolgt die detaillierte Untersuchung der tieferen Ebenen. Hierzu wird jeder Ast einzeln betrachtet und pro Ast ein paarweiser Vergleich der enthaltenen Parameter vollzogen. Das für die paarweisen Vergleiche angewandte Schema ist in Abbildung 15 dargestellt.



Fallunterscheidung am Beispiel Parameter 3/Parameter 1:

- 1: "Einfluss von Parameter 3 ist größer als Einfluss von Parameter 1"
- 1: "Einfluss von Parameter 3 ist geringer als Einfluss von Parameter 1"
- 0: "Einflüsse von Parameter 1 und Parameter 3 sind in etwa gleich"

Ergebnis: Symmetrische Matrix, Auswertungen unten und rechts inhaltlich gleich

Erkenntnis: Parameter 3 hat vergleichsweise geringen Einfluss

Abbildung 15: Schema der paarweisen Vergleiche

Nachfolgende Tabelle 4 zeigt den paarweisen Vergleich am Beispiel „Injektion“.

Tabelle 4: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Injektion

Injektion	Geom. Inj. Kammer	Anzahl Angüsse	Schlauchlänge	Matrixtemperierung	Besch. Inj. Kammer	Summe	Anteil
Geom. Inj. Kammer		0	1	0	1	2	50%
Anzahl Angüsse	0		1	0	1	2	50%
Schlauchlänge	-1	-1		-1	0	-3	-75%
Matrixtemperierung	0	0	1		1	2	50%
Besch. Inj. Kammer	-1	-1	0	-1		-3	-75%
Summe	-2	-2	3	-2	3		
Anteil	-50%	-50%	75%	-50%	75%		

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der anderen Äste des Ishikawa-Diagramms sind in Anhang D zu finden.

Eine Differenzierung zwischen verbleibenden und aus der Betrachtung genommenen Parametern nach der detaillierten Untersuchung der tieferen Ebenen ist in Anhang B dargestellt.

Nach den Bewertungsdurchläufen verbleiben, wie in Abbildung 16 dargestellt, 30 Parameter inklusive der Zielgröße in den tieferen Ebenen des Ishikawa-Diagramms, die im Folgenden ausführlich analysiert werden.

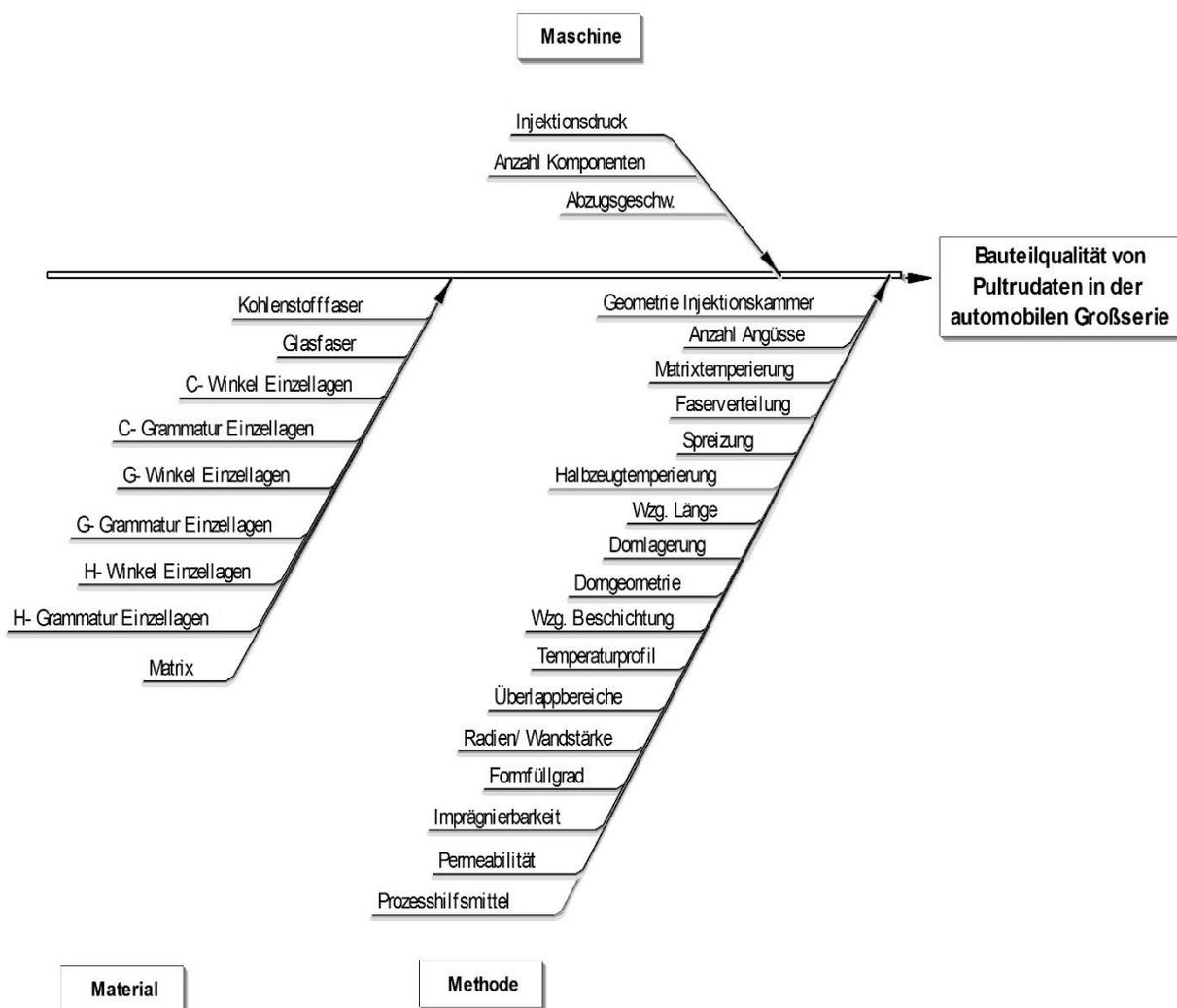


Abbildung 16: Ishikawa-Diagramm nach Bewertungsdurchläufen

3.4.5 Intensitäts-Beziehungs-Matrix

Die verbleibenden 30 Parameter repräsentieren den Kern der Systemanalyse und sind somit Gegenstand der Intensitäts-Beziehungsmatrix. Bei der quantitativen Bewertung der Parameter

und Querbeziehungen sowie dem Einfluss der Parameter auf die Bauteilqualität fließen sowohl Expertenschätzungen, als auch die in der Fachliteratur bereits dokumentierten Erkenntnisse mit ein. Der Befüllung der Matrix nach bekanntem Bewertungsschema (vgl. Abbildung 9) liegen jeweils definierte Fragestellungen zugrunde:

- Gibt es einen Einfluss von „Parameter A“ auf „Parameter B“?
- Wie verhält sich „Parameter B“ wenn „Parameter A“ zu hoch/zu gering ist?
- Gibt es Einstellungen für „Parameter A“, die „Parameter B“ positiv beeinflussen?
- Gibt es Einstellungen für „Parameter A“, die „Parameter B“ negativ beeinflussen?
- Ist „Parameter A“ allein ausschlaggebend für die Ausprägung von „Parameter B“?

Zu beachten ist, dass bei der Bewertung keine Auftretenswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden, sondern nur der „kritische Augenblick“ betrachtet wird. Ferner stehen für die Bewertung, mit Ausnahme der bereits analysierten Fachliteratur, keine quantitativen Messgrößen zur Verfügung. Es findet lediglich ein paarweiser Vergleich jedes einzelnen Parameters mit jedem anderen statt.

Die Zielgröße „Bauteilqualität von Pultrudaten in der automobilen Großserie“ (BTQ) ist ebenfalls Teil der Matrix, obwohl er selbst keine anderen Parameter beeinflusst, jedoch stark von anderen Parametern beeinflusst wird. Einige beispielhafte Bewertungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Beispielhafte Bewertungen der Intensitäts-Beziehungsmatrix

Von Parameter	Nach Parameter	Bewertung	Begründung	Quelle
Wzg. Beschichtung	BTQ	2	Rauigkeit hat Einfluss auf die Oberflächenqualität des Pultrudates	[Bla99]
Radien/Wandstärke	BTQ	2	Einfluss auf Aushärtegrad; gleichmäßige Wandstärke für geringen Verzug	[Maz02]
Formfüllgrad	BTQ	3	niedriger Füllgrad beeinflusst mech. Eigenschaften und Oberflächenqualität	[Sum08]
Matrix	Geom. Inj.Kammer	2	Topfzeit als Argument für Größe der Injektionskammer	[CKS+05]
Dorngeometrie	Dornlagerung	5	Bei langen/schlanken Dornen aufwendige Lagerung nötig	-
C-Grammatur Einzellage (EL)	Formfüllgrad	1	Bei hoher Grammatur niedrigerer Füllgrad (weniger UD mit höherer Packungsdichte)	-

Die auf diese Weise befüllte Matrix wird anschließend zeilen- und spaltenweise ausgewertet und die jeweilige Aktiv- und Passivsumme ermittelt. Das Ergebnis in Form der vollständigen Intensitäts-Beziehungsmatrix ist in Tabelle 6 dargestellt und wird im Folgenden diskutiert.

Tabelle 6: Intensitäts-Beziehungsmatrix

BTQ	Abzugsgeschw.	Injektionsdruck	Anzahl Komponenten	Geom. Inj. Kammer	Anzahl Angüsse	Matrixtemperatur	Faserverteilung	Spreizung	Halbzeutemperatur	WzgLänge	Dorngeometrie	Dornlagerung	Wzg. Beschichtung	Temperaturprofil	Überlappbereiche	Radien/Wandstärke	Formfüllgrad	Imprägnierbarkeit	Permeabilität	Prozesshilfsmittel	Kohlenstofffaser	Glasfaser	C-Winkel Einzellagen	G-Winkel Einzellagen	G-Winkel EL	H-Winkel Einzellagen	H-Grammatur EL	Matrix	Summe	Anteil
BTQ	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Abzugsgeschw.	9	0	0	1	0	2	1	2	3	0	0	1	0	5	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	29	11%
Injektionsdruck	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3%
Anzahl Komponenten	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1%	
Geom. Inj. Kammer	2	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	5	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	15	6%
Anzahl Angüsse	2	2	3	0	3	0	0	1	0	0	0	2	0	2	1	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	11%	
Matrixtemperatur	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	14	5%	
Faserverteilung	1	0	1	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	2	2	2	3	5	0	3	2	0	0	0	0	0	0	25	9%
Spreizung	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	2	2	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	20	7%
Halbzeutemperatur	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	3	3	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	6%
WzgLänge	3	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	5	2	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	23	9%
Dorngeometrie	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	4%
Dornlagerung	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	11	4%
Wzg. Beschichtung	9	5	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	29	11%
Temperaturprofil	3	0	1	0	2	1	0	5	0	0	2	0	0	2	2	5	0	2	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	29	11%
Überlappbereiche	2	2	2	0	2	1	3	0	0	1	1	0	2	2	1	1	0	1	2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	27	10%
Radien/Wandstärke	3	0	5	0	2	1	1	3	0	0	0	0	1	2	3	3	3	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	30	11%
Formfüllgrad	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3%
Imprägnierbarkeit	2	1	9	0	0	3	1	2	0	1	0	1	0	2	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	11%
Permeabilität	2	1	2	0	0	0	5	2	0	0	0	2	0	2	0	2	3	2	2	2	1	0	1	0	1	0	0	0	27	10%
Prozesshilfsmittel	5	1	2	0	2	1	3	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	27	10%
Kohlenstofffaser	5	1	2	0	2	0	1	2	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	21	8%
Glasfaser	3	0	1	0	5	2	1	2	0	0	0	0	5	1	0	1	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	28	10%
C-Winkel Einzellagen	2	0	1	0	1	0	1	2	0	1	0	0	0	0	1	2	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	6%
C-Grammatur EL	3	0	1	0	5	2	1	2	0	0	0	0	3	1	0	1	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	26	10%
G-Winkel Einzellagen	2	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	3	1	0	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	10%
H-Winkel Einzellagen	2	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	6%
H-Grammatur EL	5	3	1	2	2	2	5	2	0	2	2	0	1	5	1	1	2	3	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	44	16%
Summe	86	22	41	2	37	21	26	48	9	11	3	9	10	22	29	26	34	19	43	52	23	8	7	2	4	2	4	20	32%	
Anteil	8%	15%	1%	14%	8%	10%	18%	3%	4%	1%	3%	4%	8%	11%	10%	13%	7%	16%	19%	9%	3%	3%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	7%	

Durch Berücksichtigung der in Kapitel 2 analysierten Fachliteratur konnten 3,3 % der Intensitäts-Beziehungsmatrix befüllt werden. Das heißt, 29 Querbeziehungen von insgesamt 870 möglichen Querbeziehungen in der Matrix sind bereits in der Literatur betrachtet worden. Im Umkehrschluss bedeutet das allerdings, dass über 96,7 % möglicher Querbeziehungen keine dokumentierte Untersuchung gefunden werden konnte. Dies ist eine weitere Motivation für die in Kapitel 2.5 erarbeiteten Forschungsschwerpunkte. Nach vollständiger Befüllung der Matrix über die Literatur hinaus konnte, wie in Abbildung 17 dargestellt, für 34,8 % der möglichen Kombinationen eine Querbeziehung mit Gewichtung größer 0 festgestellt werden.

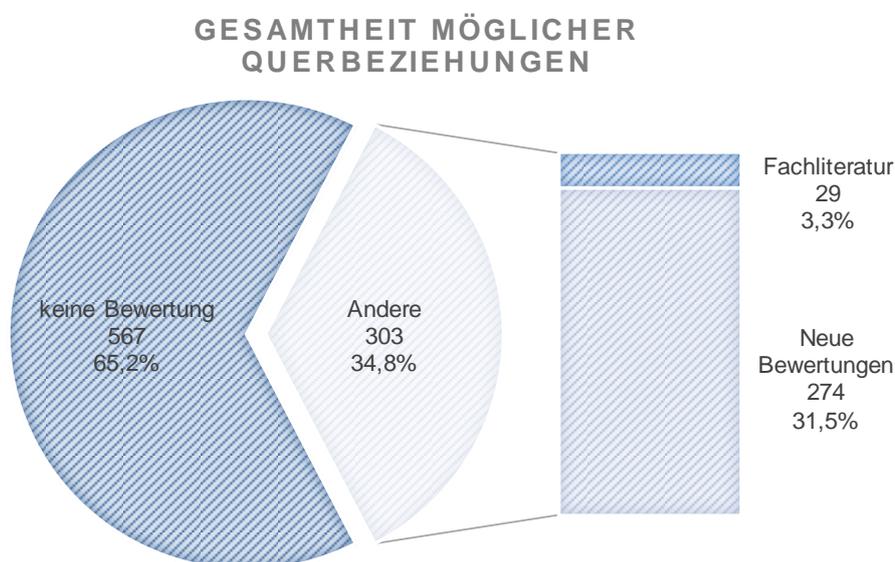


Abbildung 17: Gesamtheit möglicher Querbeziehungen

Auf die konkrete Verteilung der Aktiv- und Passivsummen wird im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

3.4.6 Identifikation relevanter Prozessparameter

Zur Analyse der Aktiv- und Passivsummen der Parameter in der Intensitäts-Beziehungsmatrix eignet sich eine Pareto-Darstellung gemäß Abbildung 18 [Ron17]. Hierfür werden Aktiv- und Passivsumme aller Parameter in einem Balkendiagramm dargestellt und nach der Höhe der Aktivsumme angeordnet. Aufgrund der Tatsache, dass die BTQ als Zielgröße erwartungsgemäß keine Aktivsumme sondern lediglich eine hohe Passivsumme hat, wird auf deren Darstellung verzichtet.

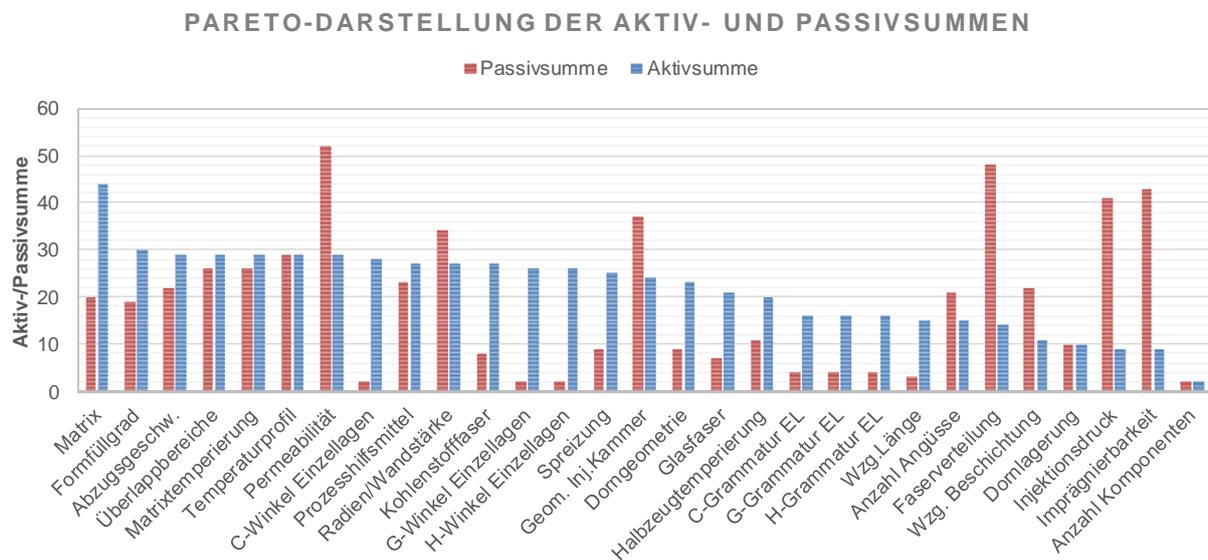


Abbildung 18: Pareto-Darstellung der Aktiv- und Passivsummen

Der Parameter „Matrix“ hat mit deutlichem Abstand die höchste Aktivsumme mit moderater Passivsumme. Somit beeinflusst dieser Parameter andere stark, wird aber nur moderat von anderen beeinflusst. Weiterhin hohe Aktivsummen zeigen die Parameter Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Überlappbereiche, Matrixtemperierung, Temperaturprofil, Permeabilität, C-Winkel EL, Prozesshilfsmittel, Kohlenstofffaser und Radien/Wandstärke. Ebenfalls auffällig ist, dass Parameter mit hoher Aktivsumme gleichzeitig eine moderate bis hohe Passivsumme aufweisen. Erst unter einer Aktivsumme von 27 wird, mit Ausnahme der Permeabilität als kritischer Parameter, die Passivsumme geringer. Dieses Verhältnis von Aktiv- und Passivsumme für die Top-10 Parameter im Diagramm zeigt, dass es nahezu keine isolierbaren Parameter gibt, die selbst stark beeinflussen aber nur wenig beeinflusst werden.

Durch Betrachtung starker Wechselwirkungen (Gewichtung >3) ausgehend von Top-10 Parametern zeigt sich, dass 3 dieser Wechselwirkungen direkt mit der Bauteilqualität und 8 innerhalb der Top-10 Parameter stattfinden. Die verbleibenden 8 Wechselwirkungen finden mit Parametern außerhalb der Top-10 statt. Die beeinflussten Parameter sind somit stark passiv. Dieser Sachverhalt bestärkt die Relevanz der Top-10 Parameter der Pareto-Darstellung.

Abgesehen von der Intensität der Wechselwirkungen spielt die Anzahl der Wechselwirkungen eine wichtige Rolle. Die Verteilung ist in nachfolgender Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Aktiv-/Passivsummen und Anzahl der Wechselwirkungen (WW)

Parameter	Aktiv- summe	Anzahl aktiver WW	Parameter	Passiv- summe	Anzahl passiver WW
Matrix	44	19	Permeabilität	52	15
Formfüllgrad	30	13	Faserverteilung	48	21
Abzugsgeschw.	29	12	Imprägnierbarkeit	43	17
Überlappbereiche	29	12	Injektionsdruck	41	21
Matrixtemperierung	29	10	Geom. Inj.Kammer	37	17
Temperaturprofil	29	8	Radien/Wandstärke	34	16
Permeabilität	29	11	Temperaturprofil	29	14
C-Winkel Einzellagen	28	11	Überlappbereiche	26	18
Prozesshilfsmittel	27	14	Matrixtemperierung	26	19
Radien/Wandstärke	27	18	Prozesshilfsmittel	23	14
Kohlenstofffaser	27	12	Abzugsgeschw.	22	13
G-Winkel Einzellagen	26	11	Wzg. Beschichtung	22	10
H-Winkel Einzellagen	26	11	Anzahl Angüsse	21	12
Spreizung	25	11	Matrix	20	6
Geom. Inj.Kammer	24	13	Formfüllgrad	19	12
Dorngeometrie	23	15	Halbzeugtemperierung	11	8
Glasfaser	21	11	Dornlagerung	10	4
Halbzeugtemperierung	20	13	Spreizung	9	4
C-Grammatur EL	16	11	Dorngeometrie	9	5
G-Grammatur EL	16	11	Kohlenstofffaser	8	5
H-Grammatur EL	16	11	Glasfaser	7	5
Wzg.Länge	15	7	C-Grammatur EL	4	3
Anzahl Angüsse	15	8	G-Grammatur EL	4	3
Faserverteilung	14	6	H-Grammatur EL	4	3
Wzg. Beschichtung	11	6	Wzg.Länge	3	2
Dornlagerung	10	5	C-Winkel Einzellagen	2	2
Injektionsdruck	9	6	G-Winkel Einzellagen	2	2
Imprägnierbarkeit	9	5	H-Winkel Einzellagen	2	2
Anzahl Komponenten	2	2	Anzahl Komponenten	2	1

Diese Darstellung zeigt, dass eine hohe Aktiv-/Passivsumme mit vielen Wechselwirkungen einhergeht, eine geringe Aktiv-/Passivsumme geht einher mit wenigen Wechselwirkungen. Festzuhalten ist somit, dass weniger die Intensität der Beziehungen, sondern mehr deren Anzahl ausschlaggebend ist. Auch diese Erkenntnis verdeutlicht die Relevanz der Top-10 Parameter der Pareto-Darstellung, da die Top-10 Parameter gemessen an der Aktivsumme nahezu deckungsgleich sind mit den Parameter mit der höchsten Anzahl der Wechselwirkungen.

Die Darstellung der Aktiv- und Passivsummen in einem Intensitäts-Beziehungsdiagramm gemäß Abbildung 19 ermöglicht die Einordnung der Parameter in die vier Quadranten „Aktiv“, „Kritisch“, „Träge“ und „Reaktiv“. Die TOP-10 Parameter sind grau hinterlegt.

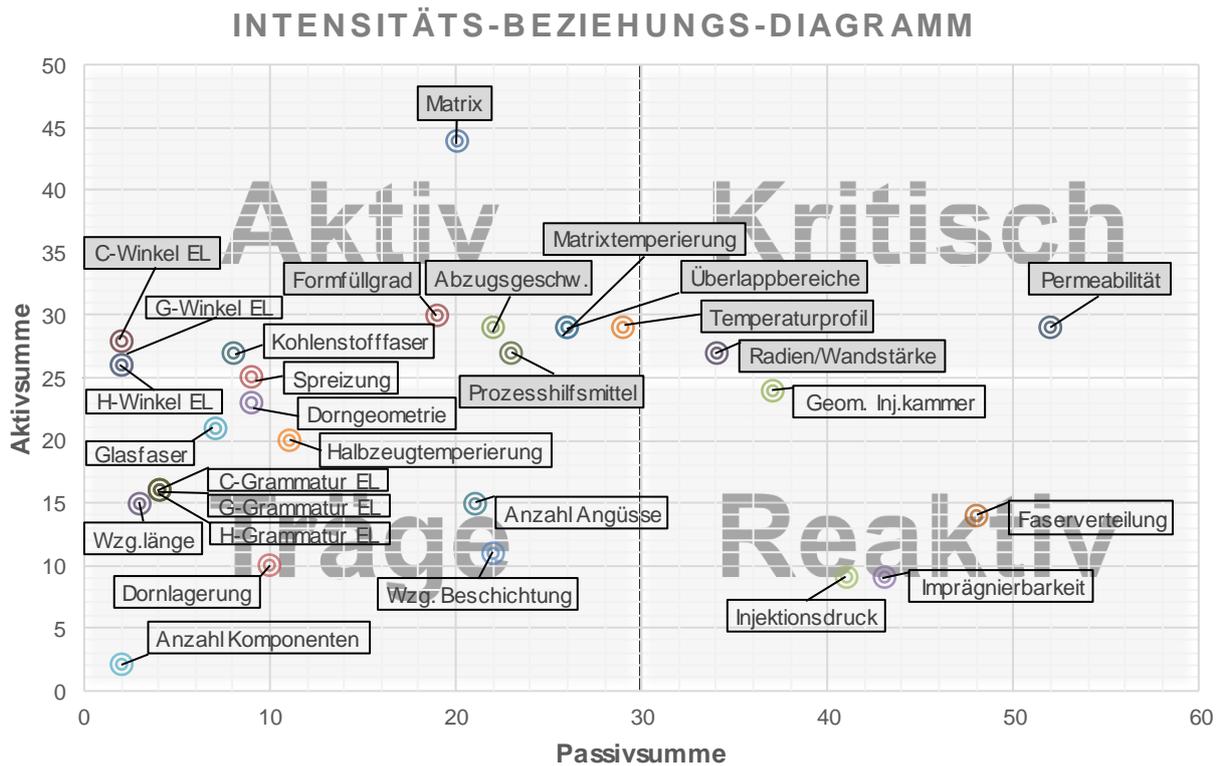


Abbildung 19: Intensitäts-Beziehungsdiagramm (gesamt)

Für einen später abzuleitenden Versuchsplan sind primär Parameter im aktiven und kritischen Feld zu berücksichtigen. Auch hier zeigt sich, dass die Top-10 Parameter, gemessen an der Aktivsumme, gesamthaft im aktiven und kritischen Feld zu finden sind. Nachfolgende Abbildung 20 zeigt die Einordnung der TOP-10 Parameter im aktiven und kritischen Feld.

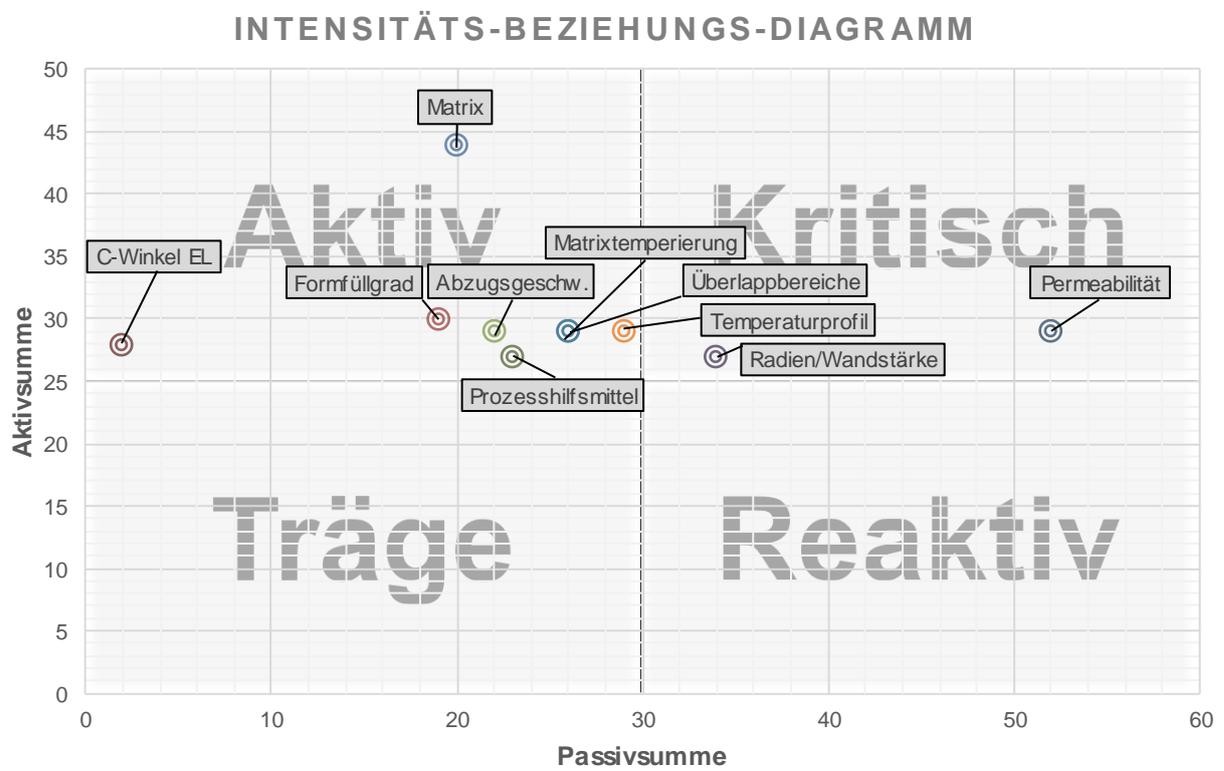


Abbildung 20: Intensitäts-Beziehungsdiagramm (TOP-10 Parameter)

Aus den genannten Gründen werden die Parameter Matrix, Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Überlappbereiche, Matrixtemperierung, Temperaturprofil, Permeabilität, C-Winkel EL, Prozesshilfsmittel und Radien/Wandstärke als relevante Prozessparameter identifiziert.

4 Versuchsaufbau und -durchführung

4.1 Methodische Herangehensweise

Auf Basis der Ergebnisse der Systemanalyse soll ein geeigneter Versuchsplan erstellt werden. Aufgrund des Standes der Forschung und Technik wird zunächst eine schrittweise Annäherung zum eigentlichen Zielsystem (Injektion, CF, EP, Gelegeverstärkung) über Vorversuche vollzogen. Diese Vorgehensweise geht auf ein Experteninterview mit Herbert Engelen zurück [Eng16b]. Die Ziele dieser Vorversuche sind:

- Erweiterung des allgemeinen Prozessverständnisses durch schrittweise Erhöhung der Komplexität ausgehend vom Stand der Forschung und Technik bis zum Zielsystem
- Ermittlung eines Anlagensetups für einen stabilen und reproduzierbaren Prozess
- Prüfen der Umsetzbarkeit des Zielsystems
- Definition der Parameterstufen für alle Parameter des Versuchsplans
- Prüfen der Umsetzbarkeit aller Parameterkombinationen des Versuchsplans

Mit Hilfe des Versuchsplans gilt es, die Auswirkungen der Parameterkombinationen auf die, im Kapitel 3.3 „Zielgrößen“ beschriebene **Zielgröße Bauteilqualität** zu ermitteln. Hierfür ist es erforderlich eine, auf die Anforderungen der automobilen Großserie angepasste, Prüfmethodik zu definieren.

4.2 Versuchsplanung

Mit Hilfe eines Versuchsplans sollen die Auswirkungen von mehreren Einflussparametern auf die Zielgrößen untersucht und somit mögliche Wechselwirkungen erkannt werden. Die Möglichkeit zur Bestimmung der Wechselwirkungen und die verbesserte Auswertbarkeit gelten als Vorteile gegenüber der ungeplanten Datensammlung durch Einzelversuche [Ron17].

Die Systemanalyse hat die Parameter Matrix, Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Überlappbereiche, Matrixtemperierung, Temperaturprofil, Permeabilität, C-Winkel EL, Prozesshilfsmittel und Radien/Wandstärke als relevante Prozessparameter identifiziert. Für diese Versuchsreihen wird zunächst ein Matrixsystem nach dem Stand der Technik gewählt, da eine Variation der Matrix in einer Versuchsreihe bedeutet, dass das Prozessfenster bei jeder Änderung neu ermittelt werden muss. Aufgrund der deutlichen Relevanz dieses Parameters werden jedoch noch über die Versuchsreihe hinaus weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Der Parameter Überlappbereiche wird nicht untersucht, da Überlappbereiche bei der für diese Versuchsreihe verwendeten Profilgeometrie (Auswahl Profilgeometrie siehe Kapitel 4.3) nicht relevant sind. Die Parameter Permeabilität und C-Winkel EL zielen primär auf eine

Halbzeugentwicklung und werden somit nicht weiter verfolgt. Prozesshilfsmittel, wie z.B. Oberflächenvliese, werden mit Hinblick auf eine Minimierung von Fremdmaterial ebenfalls nicht weiter betrachtet. Eine Variation von Radien und Wandstärken würde mehrere verschiedene Werkzeuge erfordern. Vor dem Hintergrund, dass für diesen Parameter gute Leitlinien im Stand der Technik existieren, wird der Parameter Radien/Wandstärke nicht weiter untersucht. Eine direkte Temperierung der Matrix ist unter den gegebenen anlagentechnischen Randbedingungen nicht möglich, da zur Injektion ein Drucktopf anstelle einer Misch- und Dosieranlage verwendet wird. Stattdessen wird die Injektionskammer des Werkzeuges temperiert. Hintergrund dieses Parameters ist die definierte Einstellung der Viskosität der Matrix. Eine Temperierung der Injektionskammer, also eine indirekte Temperierung der Matrix beim Eintritt in das Faserpaket, kann bei moderaten Abzugsgeschwindigkeiten somit als äquivalent angesehen werden. Der Parameter Matrixtemperierung wird für die weiteren Untersuchungen als Kammertemperierung weitergeführt. Aus den Parametern Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil wird der Versuchsplan generiert.

Für den Versuchsplan wird eine teilfaktorielle Variante gewählt, da hier das Verhältnis von Versuchsanzahl zu Erkenntnisgewinn im besten Verhältnis steht. Bei einer teilfaktoriellen Parameterstudie ergibt sich die Anzahl der Versuche n nach folgender Gleichung (1):

$$n = \text{Parameterstufen}^{\text{Eingangsparameter}-p} \quad (1)$$

Wobei p die Anzahl an doppelt belegten Parametersätzen darstellt (Variation von zwei Parametern bei einer Parameterstufe) [Fra10, Gig16]. Somit resultieren bei zwei Parameterstufen und vier Eingangsparametern insgesamt acht Versuche gemäß nachfolgender Gleichung (2):

$$n = 2^{4-1} = 8 \quad (2)$$

Zur Verbesserung der Erkenntnis wird zudem ein Mittelwertsversuch hinzugefügt. Für den Mittelwertsversuch wird jeweils das arithmetische Mittel von oberer und unterer Parameterstufe gewählt. Der vorläufige Versuchsplan ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Vorläufiger Versuchsplan

Konfig. Nr.	Formfüllgrad	Kammertemperierung	Abzugsgeschw.	Temperaturprofil
1	y	k2	v1	t1
2	y	k2	v2	t2
3	y	k1	v2	t1
4	y	k1	v1	t2
5	$(x+y)/2$	$(k1+k2)/2$	$(v1+v2)/2$	$(t1+t2)/2$
6	x	k1	v1	t1
7	x	k1	v2	t2
8	x	k2	v2	t1
9	x	k2	v1	t2

Die Stufen der Parameter werden im Rahmen von Vorversuchen ermittelt, da nur so gewährleistet werden kann, dass die Parameterkombinationen unter praxisrelevanten Bedingungen prozessstabil sind. Ausgehend vom Stand der Forschung und Technik wird, für die schrittweise Annäherung zum Zielsystem (Injektion, CF, EP, Gelegeverstärkung), der in Abbildung 21 dargestellte Ablauf gewählt. Das stufenweise Vorgehen von Aufbau 1-5 geht auf ein Experteninterview mit Herbert Engelen zurück [Eng16b].

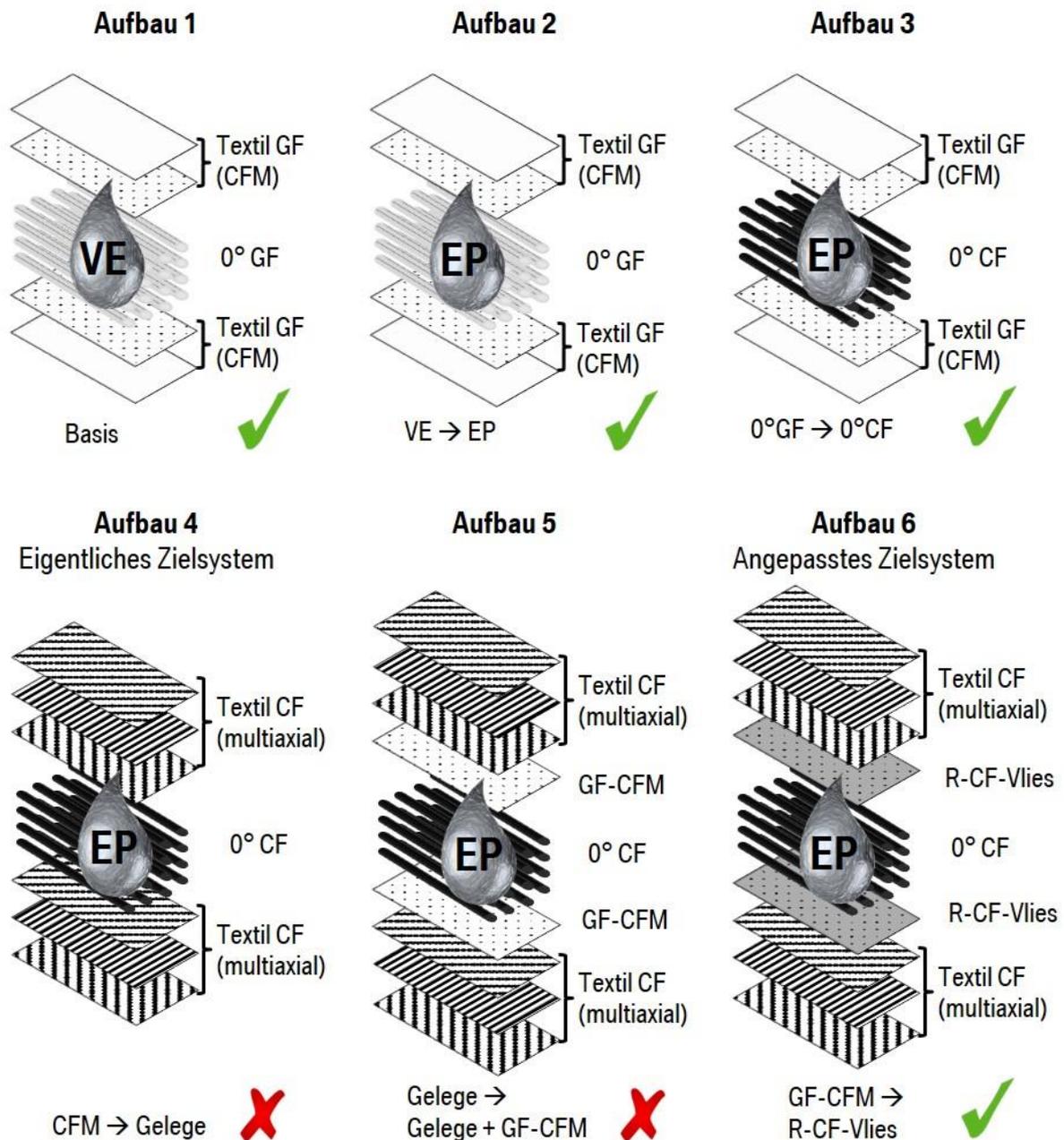


Abbildung 21: Schrittweise Annäherung zum Zielsystem durch Vorversuche

Als Ausgangspunkt (Aufbau 1) dient eine Kombination von GF-Rovings in der Mittelebene des Profils, ein GF-Textil an den Oberflächen (Oberflächenvlies vernäht mit CFM - Continuous Filament Mat) und eine VE-Matrix. Die genauen Daten der verwendeten Materialien werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert. Ausgehend von dieser Basis wird zunächst das Matrixsystem durch eine EP-Matrix ersetzt (Aufbau 2). Der Aufbau der Verstärkungsfasern bleibt zunächst unverändert. In einem nächsten Schritt werden die GF-Rovings in der Mittelebene des Profils durch CF-Rovings ersetzt (Aufbau 3). Der verbleibende

Schritt zum eigentlichen Zielsystem (Aufbau 4) ist der Einsatz eines triaxialen CF-Geleges anstelle des GF-Textils. Dieser Aufbau kann unter den gegebenen Randbedingungen jedoch nicht vollständig imprägniert werden. Näheres dazu ist in Kapitel 5 dargestellt. Aufgrund der unzureichenden Imprägnierung des Aufbaus im eigentlichen Zielsystem wird dem Aufbau ein weiteres Textil hinzugefügt. In Aufbau 5 wird zusätzlich ein GF-CFM verwendet. Hier zeigt sich zwar eine bessere Imprägnierqualität als bei Aufbau 4, jedoch noch keine vollständige Imprägnierung. Für Aufbau 6 wird dieses GF-CFM durch ein R-CF-Vlies (Vlies aus recycelten CF) ersetzt. Aufbau 6 ist somit das angepasste Zielsystem.

Aus diesen Vorversuchen werden die Parameterstufen des Versuchsplans am angepassten Zielsystem (Aufbau 6) ermittelt. Um den Parameter Formfüllgrad eindeutig messbar und einstellbar zu machen wird dieser für alle durchgeführten Untersuchungen, gemäß Abbildung 22, als Anzahl der Rovings festgelegt.

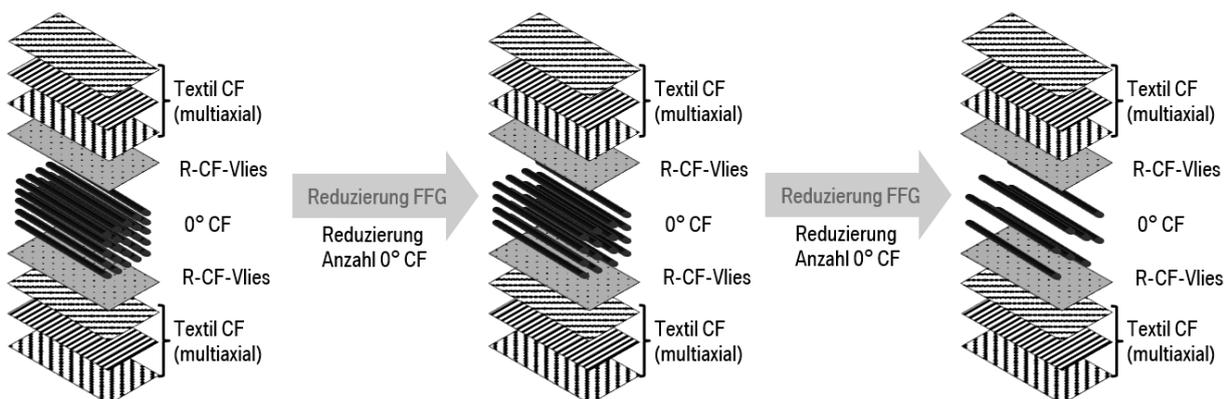


Abbildung 22: Formfüllgrad: Schematische Darstellung

Das Prozessfenster für den Formfüllgrad, charakterisiert durch die Anzahl der CF-Rovings in der Mittelebene des Profils, wird auf 113-125 CF-Rovings festgelegt. Die Abzugsgeschwindigkeit wird zwischen 0,3 m/min und 0,45 m/min variiert. Das Temperaturprofil des Werkzeuges ist in 4 Zonen aufgeteilt. Zone 1 befindet sich direkt nach der Injektionskammer und wird für alle Versuche auf 150 °C eingestellt. Zone 2-4 folgen in Abzugsrichtung und werden mit jeweils gleicher Temperatur beaufschlagt. Das zu untersuchende Prozessfenster für die Zonen 2-4 liegt zwischen 170 °C und 190 °C. Für die Bestimmung des Prozessfensters der Kammertemperatur wird nachfolgende Abbildung 23 der Matrixviskosität herangezogen. Die genauen Daten des verwendeten EP-Matrixsystems werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

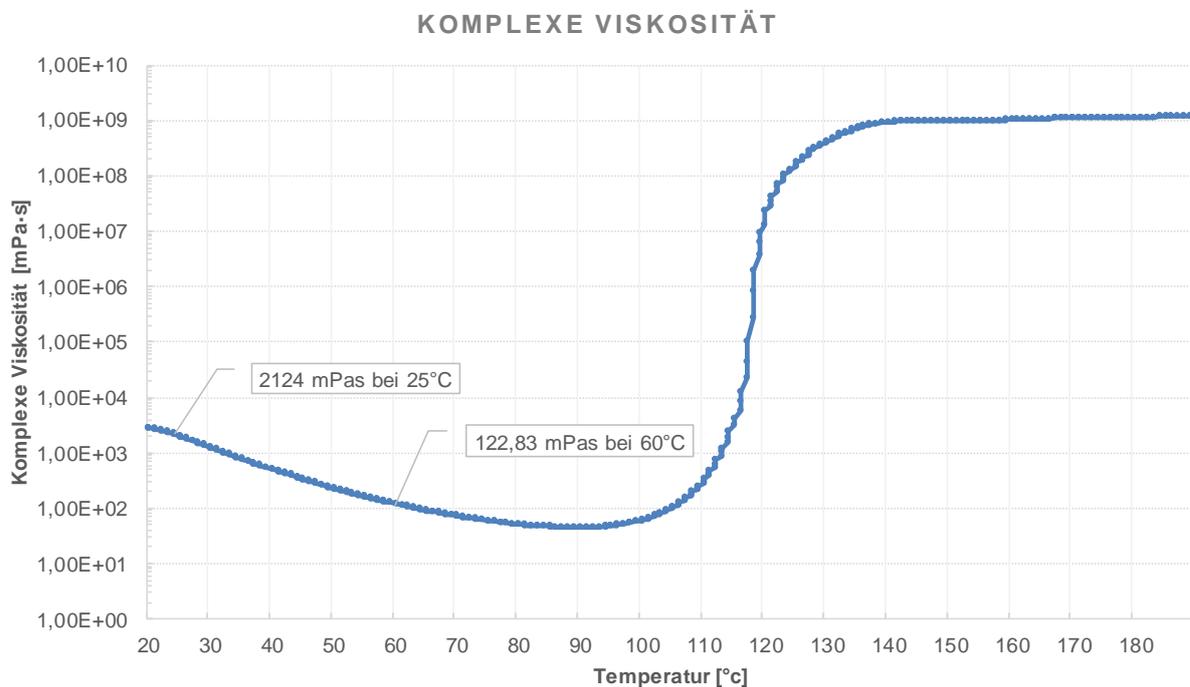


Abbildung 23: Komplexe Viskosität des EP-Matrixsystems

Als untere Grenze für die Kammertemperatur wird 25 °C gewählt, da Vorversuche gezeigt haben, dass hier das Minimum des anlagentechnisch Einstellbaren liegt. Die obere Grenze wird auf 60 °C festgelegt, da hier noch genug Abstand zum Gelbereich der Matrix verbleibt. Eine höhere Kammertemperatur ist bei diesem Matrixsystem nicht umsetzbar, da sonst die Reaktion bereits in der Injektionskammer beginnt und zum Prozessabbruch führen kann. Unter Annahme direkter Wärmeübertragung bei Einlauf der Matrix in die Injektionskammer wird die Matrixviskosität damit zwischen 2124 mPas bei 25 °C und 123 mPas bei 60 C eingestellt. Der vollständige Versuchsplan für das angepasste Zielsystem (Aufbau 6) ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Vollständiger Versuchsplan

Konfig. Nr.	Formfüllgrad ¹ [Stk.]	Kammertemperatur [°C]	Abzugsgeschw. [m/min]	Temperaturprofil [°C]
1	125	60	0,3	170
2	125	60	0,45	190
3	125	25	0,45	170
4	125	25	0,3	190
5	119	43	0,38	180
6	113	25	0,3	170
7	113	25	0,45	190
8	113	60	0,45	170
9	113	60	0,3	190

4.3 Versuchsumgebung und Randbedingungen

Im Rahmen dieser Studien werden zwei unterschiedliche Matrixsysteme sowie verschiedene textile Halbzeuge und Rovings verwendet. Die betrachteten Materialien und Halbzeuge, die verwendete Anlagentechnik und die Versuchsumgebung werden im Folgenden näher erläutert. Die verwendete Pultrusionanlage ist eine Serienanlage vom Typ Px500-10T der Firma Pultrex in Manningtree, UK nach dem Stand der Technik und wird betrieben durch das Fraunhofer IGCV in Augsburg. Sie verfügt über umfangreiche Messtechnik und Datenerfassung für folgende Größen:

- Abzugsgeschwindigkeit gemessen an einem Roving [m/min]
- Abzugskraft gemessen am Werkzeug [N]
- Temperatur der Thermoelemente über die Werkzeuglänge [°C]
- Temperatur im Profil über mitlaufenden Thermodraht [°C]
- Werkzeuginnendrucke [bar]
- Prozentualer Anteil der an den Heizelementen anliegenden elektrischen Leistung [%]

Alle Daten werden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die Anlage ist mit alternierenden, pneumatischen Klemmgreifern und einer mitlaufenden Säge ausgestattet. Zur Injektion der Matrix wird ein Drucktopf anstelle einer Misch- und Dosieranlage verwendet. Ausführliche Anlagendaten sowie das Datenblatt des Herstellers sind in Anhang E aufgeführt.

Als zu untersuchende Profilgeometrie wird, in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT in Pfinztal, ein U-Profil gewählt [Eng16a]. Diese Geometrie ermöglicht sowohl eine Probenentnahme in Anlehnung an entsprechende DIN-Normen, als auch eine Untersuchung des Vorformungsprozesses der textilen Halbzeuge aufgrund der enthaltenen Radien. Ferner ist ein

¹ Formfüllgrad - festgelegt durch die Anzahl der Rovings in der Mittelebene des Profils

U-Profil eine offene Geometrie und lässt somit Rückschlüsse auf das Verzugsverhalten der Bauteile unter Parametervariation zu. Die verwendete Profilgeometrie ist in Abbildung 24 dargestellt. Alle Maße sind in mm angegeben.

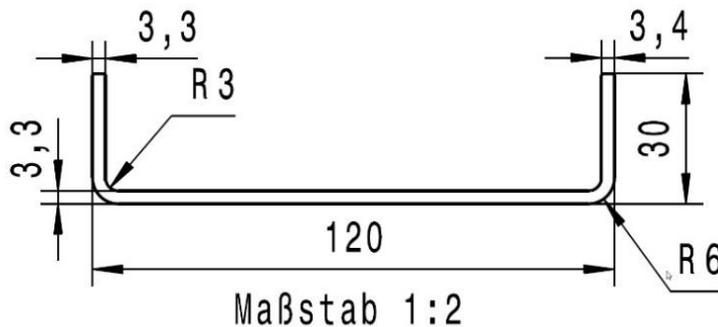


Abbildung 24: Profilgeometrie

Das verwendete Pultrusionswerkzeug für das U-Profil ist zweiteilig, die Trennebene liegt an den Enden der Flanken des U-Profils. Ober- und Unterwerkzeug sind poliert und hartverchromt und somit ausreichend gegen Abrasion geschützt. Die tropfenförmige Injektionskammer, mit je zwei Injektionsstellen oben und unten, ist in das Werkzeug integriert. Ferner verfügt das Werkzeug über zahlreiche Bohrungen für Thermoelemente im Unterwerkzeug zur Steuerung der Heizungen. Die Druckmessstellen 1-3 sind in das Oberwerkzeug integriert und befinden sich kurz hinter den Injektionsstellen (Druckmessstelle 1), am Ende der Injektionskammer (Druckmessstelle 2) und am Beginn der parallelen Kavität nach der Injektionskammer (Druckmessstelle 3). Druckmessstelle 3 kommt nicht zum Einsatz, da die Druckwerte in diesen Untersuchungen nicht relevant sind. Die schematische Verteilung der Druckmessstellen ist in Abbildung 25 dargestellt. Eine ausführliche Zeichnung des Werkzeuges ist in Anhang F zu finden.

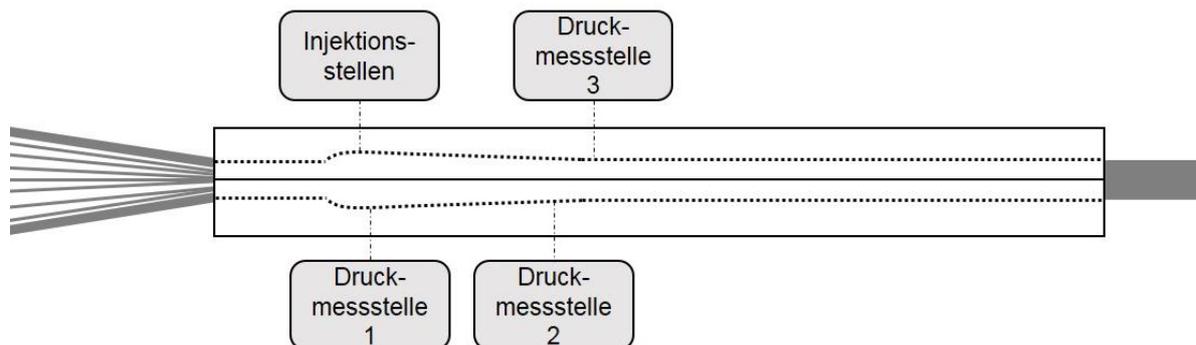


Abbildung 25: Schematische Verteilung der Druckmessstellen im Werkzeug

Die Bereitstellung der Kohlenstofffasern und Glasfasern erfolgt auf Spulen aus mehreren Spulengattern, textile Halbzeuge werden auf Rollen zugeführt. Nach der Bereitstellung erfolgt die Vorformung der textilen Halbzeuge über die Führungsblenden 01-04. Führungsblende 01 stellt die erste Führung der Rovings auf Werkzeughöhe dar. In Führungsblende 02 werden die Rovings erstmals den Bauteilabmessungen entsprechend angeordnet. Führungsblende 03 führt die bereits angeordneten Rovings mit den textilen Halbzeugen zusammen und stellt somit gleichzeitig die erste Drapiereinrichtung der textilen Halbzeuge dar. Führungsblende 04 gleicht Führungsblende 03 und ist somit die zweite Drapiereinrichtung der textilen Halbzeuge. Die Zeichnungen der Führungsblenden sind in Anhang G zu finden

Ein Schema des Versuchsaufbaus mit allen Führungsblenden ist in Abbildung 26 dargestellt.

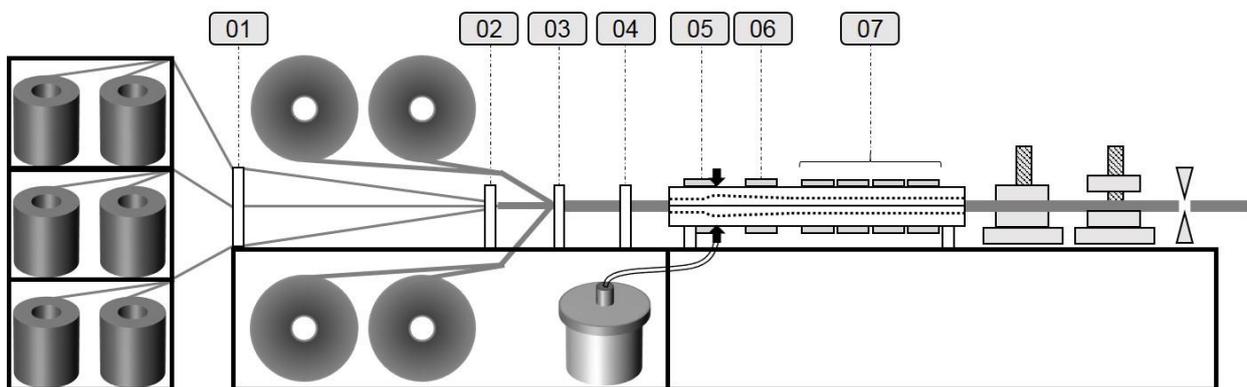


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Zur Temperierung des Werkzeugeingangs und der Injektionskammer ist oben und unten jeweils ein Temperierelement 05 angebracht. Das kühlende Temperierelement 06 dient zur thermischen Entkopplung der Injektionskammer von den Temperierelementen 07, die das Werkzeug heizen. Als VE-Matrixsystem wird eine Mischung aus Atlac 430 der Firma Aliancys AG in Schaffhausen, Schweiz mit verschiedenen Peroxiden, Additiven, Füllstoffen und einem internen Trennmittel verwendet. Zur farblichen Kodierung und Unterscheidung zu den Profilen mit EP-Matrix werden grüne Pigmente hinzugefügt. Das Mischungsverhältnis ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Verwendete Mischung des VE-Matrixsystems

Komponente	Bezeichnung	Anteil [pbw]
Harz	Aliancys Atlac 430	100,0
IMR	Axel INT Pul 24	1,4
Additiv 1	Byk W 9010	0,6
Additiv 2	Byk A 515	0,6
CaCO ₃	OMYA Millicarb	30,0
Pigmente	Masterbatch „grün“	3,0
Peroxid 1	Pergan Peroxan PND	0,4
Peroxid 2	Pergan Peroxan PO	0,5
Peroxid 3	Pergan Peroxan PB-50	0,8

Atlac 430 ist ein Vinylester auf Basis von Bisphenol A Epoxid, gelöst in Styrol [Ali15]. Als internes Trennmittel kommt INT Pul 24 der Firma AXEL Plastics Research Laboratories Inc. in Woodside, USA zum Einsatz. Dieses Trennmittel ist speziell für den Pultrusionsprozess entwickelt. Zu den Vorteilen zählen verbesserte Abzugsgeschwindigkeit, reduzierter Werkzeugverschleiß, reduzierte Abzugskraft, reduzierte Matrixviskosität und verbesserte Imprägnierqualität. Die mechanischen Eigenschaften sind unverändert oder gar verbessert [Axe09]. Ein lösemittelfreies Netz- und Dispergieradditiv vom Typ W 9010 sowie ein silikonfreier Entlüfter zur Verbesserung der Faserbenetzung vom Typ A 515 der Firma BYK-Chemie GmbH in Wesel sind ebenfalls Teil der Mischung [Byk15, Byk16]. Der verwendete Füllstoff Millicarb stammt von der Firma Omya GmbH in Köln und ist ein natürliches, sehr feines und leicht dispergierbares Calciumcarbonat in Pulverform, hergestellt aus reinem, weißem Kalkstein. Es besteht zu 99,3 % aus CaCO₃ [Jos15]. Die Peroxide des Herstellers PERGAN GmbH in Bocholt vom Typ Peroxan PND, PO und PB-50 sind organische Peroxide und wirken als Reaktionsinitiator [Per17]. Als EP-Matrixsystem wird eine Mischung, bestehend aus dem Harz LY 3585 mit dem anhydridischen Härter Aradur 917-1 und einer Mischung verschiedener Beschleuniger der Firma Huntsman Advanced Materials in Basel, Schweiz verwendet. Zusammen mit dem internen Trennmittel Chemlease IC25 der Firma Chem-Trend GmbH in Maisach weist die Mischung eine Topfzeit von ca. 24 h auf [Hun12]. Das Mischungsverhältnis ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Verwendete Mischung des EP-Matrixsystems

Komponente	Bezeichnung	Anteil [pbw]
Harz	Huntsman LY 3585	100,0
Härter	Huntsman Aradur 917-1	80,0
IMR	Chem-Trend Chemlease IC 25	4,0
Beschleuniger	Huntsman Beschleunigermischung	x

Die verwendeten GF Rovings sind Standard-Parallelrovings vom Typ Advantex 399 der Firma 3B Fibreglass in Hoeilaart, Belgien. Der Filamentdurchmesser liegt bei 24 μm und der Titer bei 2400 tex bzw. 4800 tex. Zur Verwendung mit VE- und EP-Matrix wird eine multikompatible Silanschlichte verwendet [3B 12]. Die Bereitstellung erfolgt auf stehenden Spulen mit Innenabzug.

Die verwendeten CF Rovings der Firma SGL ACF GmbH & Co. KG, München bestehen aus 50.000 Einzelfilamenten je Roving und sind vergleichbar mit den Standardrovings SIGRAFIL C 30 T050 der Firma SGL Technologies GmbH, Meitingen [SGL17]. Die Bereitstellung geschieht auf rotierenden, gebremsten Spulen mit Außenabzug.

Das verwendete GF-Textil UNICOMPLEX C526 der Firma Owens Corning in Toledo, USA ist eine Kombination aus einem CFM vom Typ Unifilo mit einer Grammtur von 450 g/m^2 und einem Polyester-Oberflächenvlies mit einer Grammtur von 50 g/m^2 . Die Kombination weist somit eine Grammtur von 500 g/m^2 auf, ist mit einem synthetischen Garn vernäht und kompatibel mit VE- und EP-Matrixsystemen [Owe08, Har17].

Das verwendete GF-CFM vom Typ Conformat N720 der Firma Superior Composites Company LLC in Vanceburg, USA ist eine poröse Matte, gebunden durch ein Polyester-Bindersystem. Die Grammtur beträgt 150 g/m^2 [Sup15].

Sowohl das GF-Textil UNICOMPLEX C526, als auch das GF-CFM vom Typ Conformat N720 beruhen auf Vorschlägen des Fraunhofer ICT in Pfinztal.

Als CF-Gelege wird der Typ K-C-400 g/m^2 der Firma SAERTEX GmbH & Co. KG in Saerbeck verwendet. Die Grammtur beträgt 400 g/m^2 , die Faserarchitektur ist $+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ relativ zur Abzugsrichtung gemäß nachfolgender Abbildung 27 [Sae17b].

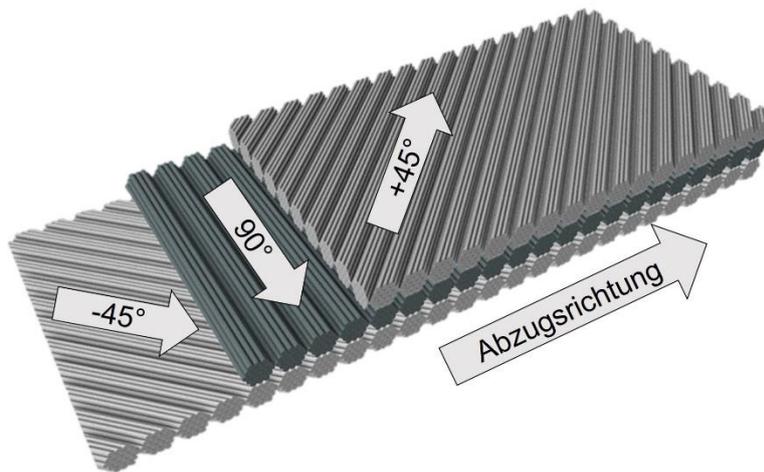


Abbildung 27: Faserarchitektur des CF-Geleges, nach [Sae17a]

An der Ober- und Unterseite des Profils wird das gleiche Gelege in unterschiedlichen Breiten verwendet (Breite oben 168 mm, Breite unten 182 mm), somit ist der Lagenaufbau nicht vollständig symmetrisch. Die im Gelege verwendeten CF Rovings vom Typ HTS40 F13 stammen von der Firma Toho Tenax Europe GmbH in Wuppertal.

Das verwendete R-CF-Vlies ist ein vernadelter, gerichteter Vliesstoff aus recycelten CF der Firma AUTEFA Solutions Germany GmbH in Friedberg. Der Fasertyp entspricht dem der verwendeten CF Rovings [Soe16].

4.4 Prüfmethodik

Wie bereits in Kapitel 2.5.3 dargelegt, wurden in den analysierten Quellen entweder Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften oder die Bauteilqualität untersucht. Im Hinblick auf potentielle Wechselwirkungen ist es jedoch wichtig beide Bereiche zu untersuchen, da gegebenenfalls Parameterkombinationen existieren, die auf beide Bereiche Auswirkungen haben. Daher kommt die in Abbildung 28 dargestellte, gesamthafte Prüfmethodik zur Anwendung.

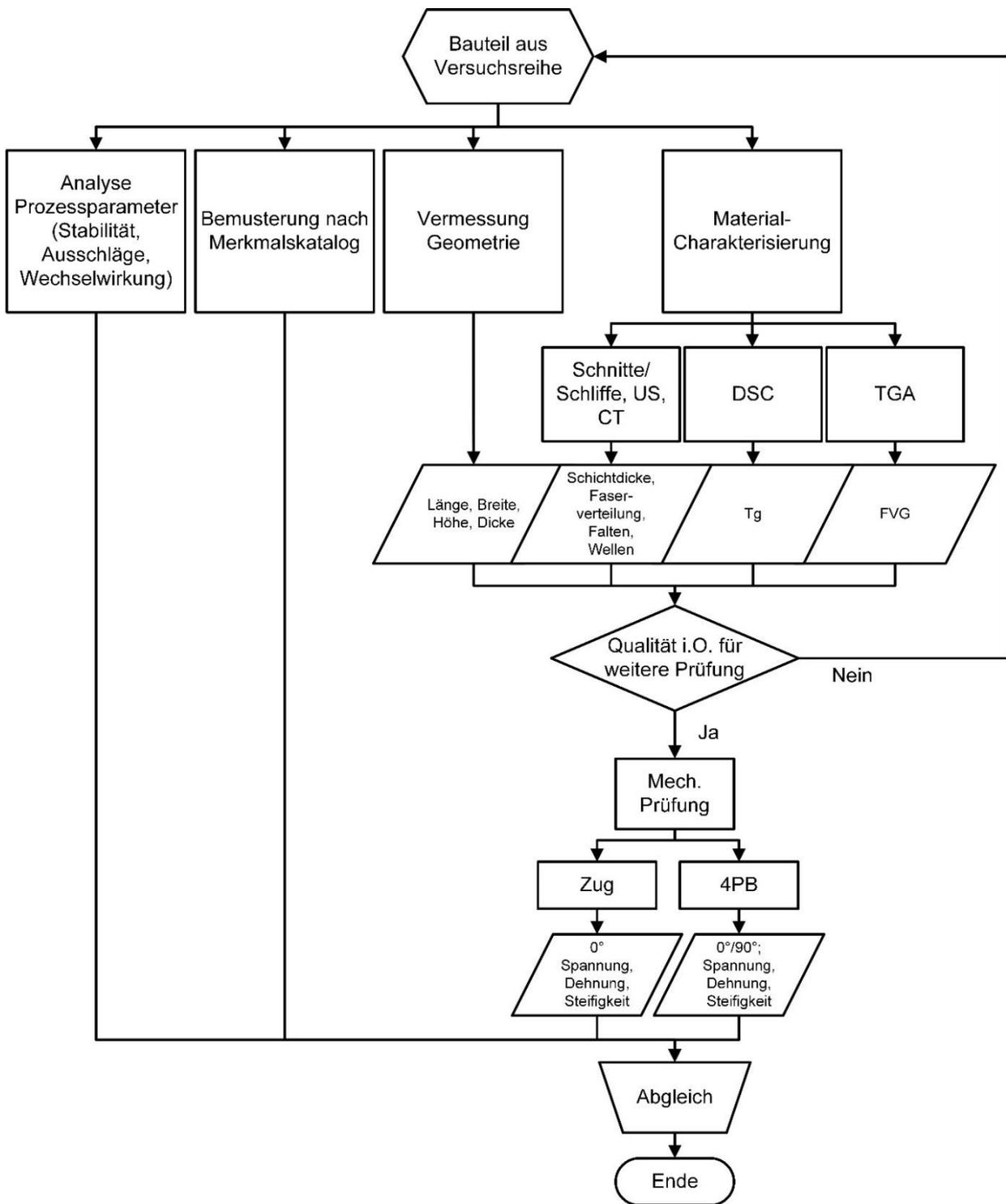


Abbildung 28: Prüfmethodik

Im Anschluss an die Versuchsreihe sollen die Ergebnisse der Untersuchungen Rückschlüsse auf vorhandene Wechselwirkungen und die Eignung der jeweils gewählten Parameterkonfiguration zulassen. Die Prüfmethodik kann in vier Kernumfänge unterteilt werden:

- Analyse der Prozessparameter

- Bemusterung nach Merkmalskatalog
- Vermessung der Geometrie
- Materialcharakterisierung

Zusätzlich wird in folgende Materialcharakterisierungen unterschieden:

- Physikalisch-chemische und thermische Untersuchungen wie beispielsweise thermogravimetrische Analyse (TGA) zur Ermittlung des FVG, dynamische Differenzkalorimetrie (DSC – differential scanning calorimetry) zur Ermittlung der Glasübergangstemperatur (T_g) und Bauteilveraschung zur Analyse des Laminataufbaus
- Mikrostrukturelle Untersuchungen wie beispielsweise Schlifffbilder, Ultraschall (US) und Computertomographie (CT)
- Mechanische Prüfungen wie beispielsweise Zug in 0°-Richtung, und 4-Punkt-Biegung (4PB) in 0°- und 90°-Richtung (Zug in 90°-Richtung ist aufgrund der benötigten Probengeometrie nicht möglich)

Essentiell bei dieser Vorgehensweise ist, dass die Erkenntnisse der vier Kernumfänge anschließend in einem Abgleich zusammengeführt werden.

Die TGA wird in Anlehnung an DIN 51006 [DIN05] durchgeführt. Je Parameterkonfiguration werden drei Probekörper mit Abmaßen von 8,7x26,1 mm² und einer Ausrichtung von 90° zu Abzugsrichtung untersucht. Um eine Aussage über die Homogenität der Verteilung des FVG zu erlangen, werden die Probekörper über die Profilbreite verteilt.

Die DSC wird nach DIN EN ISO 11357-1 [DIN10] durchgeführt, wobei die Ermittlung der Glasübergangstemperatur nach DIN EN ISO 11357-2 [DIN14b] stattfindet. Der Zuschnitt der Probekörper erfolgt grundsätzlich in den Maßen 50x3 mm² in 90° zur Abzugsrichtung, die eigentliche Messung erfolgt jedoch an einem Bruchstück davon. Geprüft werden drei Probekörper je Parameterkonfiguration.

Bauteilveraschungen geben Rückschlüsse auf die Materialbeschaffenheit im Inneren. Hierbei können Aussagen über den Laminataufbau, die Flächengewichte der Einzellagen, den Faserverlauf und die Merkmale in verdeckten Lagen getroffen werden. Ausgehend von einer Probe mit den Abmaßen 120x100 mm² erfolgt die Veraschung in einem Mikrowellenofen von Typ PYROfast des Herstellers MLS GmbH aus Leutkirch [MLS17]. Nach der Veraschung verbleiben lediglich die Kohlenstofffasern. Das verwendete Temperaturprofil beruht auf einer Expertenabschätzung [Sch16] und ist in nachfolgender Abbildung 29 dargestellt.

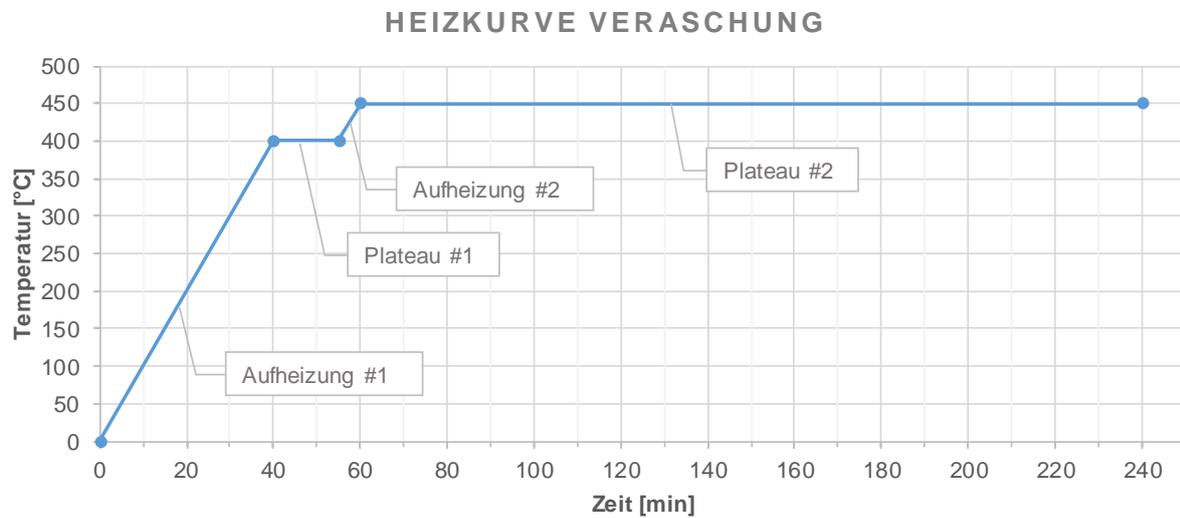


Abbildung 29: Heizkurve der Bauteilveraschung

Die veraschte Probe wird anschließend lagenweise analysiert und fotodokumentiert.

Der Zuschnitt der Probekörper für die Schlibfbildanalysen erfolgt auf einer flüssigkeitsgekühlten Säge, das Schleifen auf einem Schleif- und Poliergerät vom Typ Automet 300 Pro des Herstellers Buehler in Esslingen [Bue14] mit den Körnungen P 400, P 800, P 1200, P 2000 und P 4000 gemäß DIN ISO 6344 [DIN00]. Die eigentliche Schlibfbilderzeugung erfolgt auf drei unterschiedlichen Geräten:

- Scanner vom Typ Perfection V800 Photo des Herstellers Epson in Meerbusch mit einer optischen Auflösung von bis zu 4.800 dpi² [Eps17]
- Stereomikroskop vom Typ SteREO Discovery.V20 des Herstellers Carl Zeiss Microscopy GmbH in Jena mit bis zu 150facher Vergrößerung [Car07]
- Lichtmikroskop vom Typ Axio Imager M2 des Herstellers Carl Zeiss Microscopy GmbH in Jena mit bis zu 50facher Vergrößerung [Car15]

Die US-Prüfung wird in Anlehnung an DIN EN ISO 16810 [DIN14a] auf einem Gerät vom Typ OmniScan MX2 des Herstellers Olympus Europa SE & CO. KG durchgeführt [Oly15]. Als Referenz zur Kalibrierung der Anlage auf das zu prüfende Material wird ein sogenannter Stufenkeil aus dem Material des Mittelwertversuchs hergestellt. In nachfolgender Abbildung 30 ist der Stufenkeil exemplarisch dargestellt.

² dpi - dots per inch, englisch für „Punkte pro Zoll“. Eine Maßeinheit für die Auflösung im Druck und anderen Wiedergabesystemen

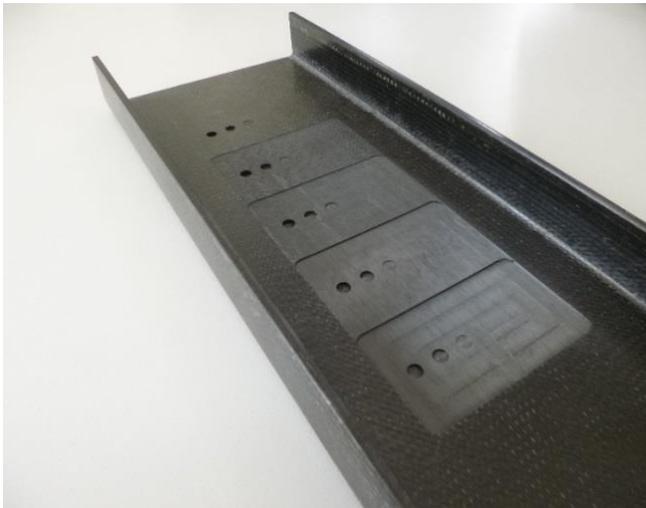


Abbildung 30: Stufenkeil zur Kalibrierung der US-Prüfung

Die Taschenfräsungen haben Abmaße von $40 \times 70 \text{ mm}^2$ und eine Tiefe von 0,00 mm (keine Taschenfräsung), 0,25 mm, 0,75 mm, 1,25 mm und 1,75 mm. In jeder Taschenfräsung sind zusätzlich drei Flachbodenbohrungen eingebracht, die jeweils bis auf 10 %/50 %/90 % der Wanddicke gebohrt sind. Gescannt wird jeweils das gesamte Bauteil mit einer Länge von 1 m. Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt die Kalibrierung und Justierung der Anlage mit Hilfe des Stufenkeils.

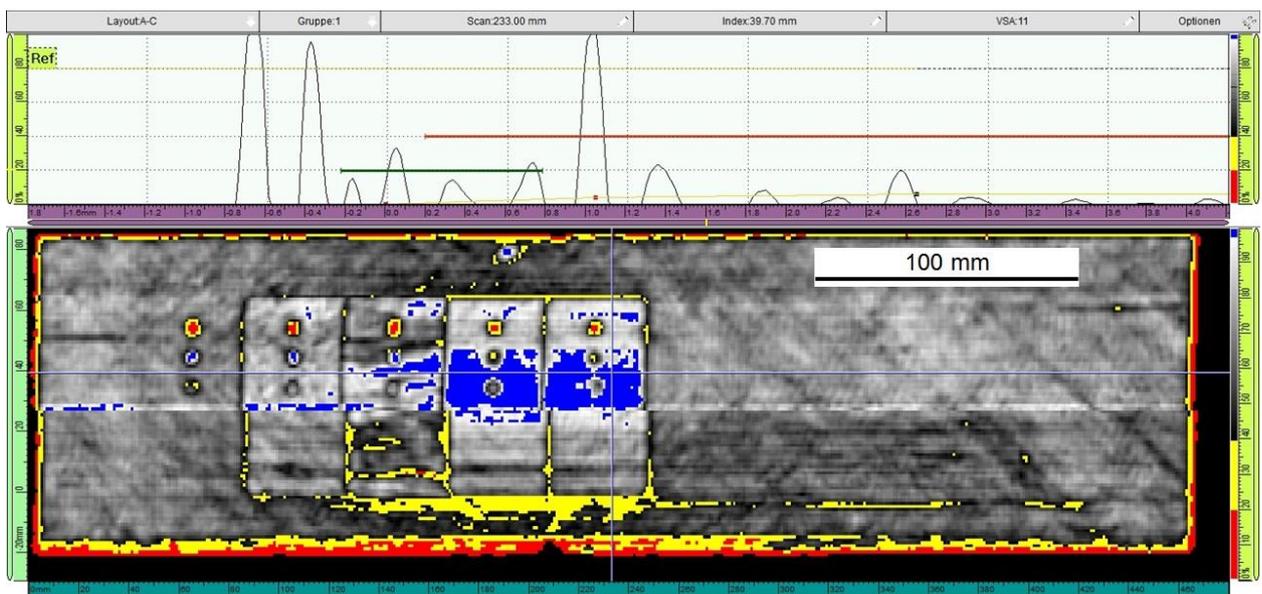


Abbildung 31: Kalibrierung der US-Prüfung am Stufenkeil

Als Erwartungswert wird 80 % des emittierten Schalls festgelegt. Das bedeutet, dass ein merkmalfreies Material vorliegt, wenn 80 % des emittierten Schallpegels nach Reflektion an der

Rückwand des Bauteils wieder am Prüfkopf detektiert wird. Der Erwartungswert stellt eine graue Kolorierung dar, welche sich bis hin zu 40 % des emittierten Schallpegels kontinuierlich verdunkelt und die Farbe schwarz erreicht. Eine gelbe Kolorierung liegt vor, wenn 40 % bis 20 % des emittierten Schallpegels detektiert werden. Dieser Bereich wird als mögliches Merkmal klassifiziert. Bei einem Wert von unter 20 % ist von einem Merkmal auszugehen und der Bereich wird rot dargestellt. Werden mehr als 80 % detektiert, werden diese Bereiche mit steigendem Wert von grau bis hin zu weiß abgebildet. In seltenen Fällen können, aufgrund von Materialanhäufungen oder einer ungenauen Kalibrierung (Referenz für die maximale Dichte bezieht sich auf einen Bereich mit geringerer Dichte), blaue Bereiche festgestellt werden. Die Ursache hierfür ist das, durch die Toleranz des Fräsens, verbleibende Material einer darüber liegenden Lage und somit Anhäufung von Material in Bezug auf die Referenzlage, oder die durch Welligkeiten in Bauteildicke verursachte Inhomogenität.

Die CT-Untersuchungen werden in Anlehnung an DIN EN 16016-1-4 [DIN11a, DIN12b, DIN12a, DIN12c] durchgeführt. Zur Anwendung kommt eine Anlage vom Typ phoenix v|tome|x L 240 des Herstellers GE Sensing & Inspection Technologies GmbH in Wunstorf mit einer maximalen Voxel-Auflösung³ von 1 µm [GE 13].

Nach TGA, DSC, Schlibbildern, US und CT folgt eine Verzweigung im Flussdiagramm der Prüfmethodik. Abhängig von den Ergebnissen der bis dahin durchgeführten Untersuchungen wird an dieser Stelle entschieden, ob die mechanischen Prüfungen an dem entsprechenden Bauteil durchgeführt werden oder ein neues Bauteil gewählt werden muss.

Die Zugversuche in 0°-Richtung werden nach DIN EN ISO 527-4-2 durchgeführt [DIN97]. Geprüft werden 6 Probekörper je Konfiguration. Die Abmaße betragen 250x25 mm² in Abzugsrichtung.

Die 4PB in 0°-Richtung werden nach DIN EN ISO 14125 [DIN11b] durchgeführt. Geprüft werden 6 Probekörper je Konfiguration. Die Abmaße betragen 96x15 mm² in Abzugsrichtung.

Die 4PB in 90°-Richtung werden nach DIN EN ISO 14125 [DIN11b] durchgeführt. Geprüft werden 6 Probekörper je Konfiguration. Die Abmaße betragen 96x15 mm² quer zur Abzugsrichtung.

In Kapitel 3.3 wurden die Zielgrößen der Systemanalyse dargelegt. Da jedoch insbesondere Oberflächeneigenschaften und Laminatqualität nur schwer quantifizierbar sind, bedarf es hierfür einer besseren Charakterisierung. Vor diesem Hintergrund gilt es zunächst eine eindeutige Definition von möglichen Abweichungen vom Idealzustand festzulegen, um die Bemusterung der Profile nach einheitlichen Kriterien zu ermöglichen.

³ Voxel bezeichnet ein Volumenelement in einem dreidimensionalen Gitter [SZC14]

4.4.1 Begriffsdefinition Merkmal

Ein Merkmal lässt sich als lokale Inhomogenität beschreiben. Der Zustand des jeweiligen Bauteils weicht also vom Sollzustand ab. Neben Merkmalen, die im Produktionsprozess selbst entstehen, werden auch Merkmale betrachtet, die bereits in den Halbzeugen existieren. Merkmale, die erst durch Nachbehandlung, wie beispielsweise den Zuschnitt, in das Bauteil eingebracht werden, werden ebenfalls untersucht.

Die finale Bewertung hinsichtlich i.O. oder n.i.O. hängt stark vom späteren Lastfall und der Lage der Merkmale am Bauteil ab und ist somit nicht Bestandteil dieser Untersuchungen. Auftretende Merkmale sind daher nicht zwangsläufig als Mangel oder Fehler zu bezeichnen.

4.4.2 Merkmalscharakterisierung und -dokumentation

Eine zentrale Zielsetzung im Kontext der Prüfmethodik ist die Identifikation von Merkmalen, die Feststellung der Häufigkeiten von auftretenden Merkmalen sowie die geometrische Vermessung der Pultrudate durch eine Bemusterung der Pultrudate. Diese beinhaltet eine Sichtprüfung nach DIN EN 13018 [DIN01]. Die Bauteile werden systematisch von allen Seiten und unterschiedlichen Blickwinkeln untersucht. Zusätzlich wird das Erscheinen der Profile bei reflektierendem Licht begutachtet. Dabei können Erhebungen oder Vertiefungen, wie zum Beispiel Blasen oder Einfallstellen, festgestellt werden. Der Abstand zwischen der Probe und dem Auge des Prüfers beträgt dabei weniger als 600 mm. Die relevanten Merkmale sind nachfolgend einzeln beschrieben und beruhen teilweise auf einem bestehenden Merkmalskatalog für andere Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe [BMW14].

Trockenstellen sind von der Matrix nicht imprägnierte Bereiche und zeichnen sich meist durch freiliegende, trockene Fasern aus. Größere Trockenstellen sind bereits in den Schnittflächen erkennbar, kleinere lassen sich in Schliiffbildern detektieren. Als Prüfmethode eignet sich der Test mit einer Nadel auf Durchgängigkeit. Ebenso ist ein Farbunterschied ein erstes Indiz auf eine Trockenstelle.

Freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche treten auf, wenn die Reinharzschicht an der Bauteiloberfläche beschädigt oder zu dünn ausgeprägt ist. Die Hilfsfasern der textilen Halbzeuge (bspw. Nähfäden) sind meist nicht vollständig in die Matrix eingebettet. Dieses Merkmal betrifft primär die Nähfäden der textilen Halbzeuge.

Riefen entlang des Profils sind gekennzeichnet durch eine Vertiefung (Furchung) entlang des Profils. Vereinzelt können Matrixrückstände in der Riefe vorhanden sein, die teils leicht vom Bauteil zu lösen sind. Da es sich beim Pultrusionsverfahren um einen dynamischen und kontinuierlichen Prozess handelt, können Schwingungsphänomene auftreten. Daher können Riefen über die Bauteilbreite wandern.

Anhäufung offener kleiner Poren ist durch eine nicht geschlossene oder nur sehr dünne Matrixschicht gekennzeichnet. Es sind jedoch keine freiliegenden Fasern vorhanden. Die Poren bilden sich meist an den Einstichstellen der Nähfäden der textilen Halbzeuge. Dieses Merkmal ist oft in Zusammenhang mit einer rauen und beschädigten Reinharzschicht vorzufinden.

Einzelne an der Oberfläche sichtbare Blasen sind Luft-, Gaseinschlüsse oder Delaminationen. Blasen, die durch eine Delamination entstehen, sind durch eine lokale Wandstärkenerhöhung erkennbar. Blasen, die durch Luft- oder Gaseinschlüsse entstehen, rufen meist keine feststellbare Änderung der Wandstärke hervor.

Mehrere an der Oberfläche sichtbare Blasen (Blasenfeld) zeichnen sich durch eine Anhäufung von rundlichen oder ovalen und weißen Luft- oder Gaseinschlüssen aus. Als Nachweis dieses Merkmals eignet sich ein Kratztest. Bei diesem wird die oberste Reinharzschicht und/oder Textilschicht mit Hilfe eines scharfen Gegenstandes gezielt beschädigt. Dadurch kann bis zum Einschluss vorgedrungen werden und es zeichnen sich kleine, lokale Delaminationen sowie trockene Fasern im Bereich des Merkmales ab.

Einschlüsse durch C-Fasern, Nähfäden und Glasfasern sind beispielsweise Faserreste vom Beschnitt der Halbzeuge. Sie zeichnen sich abweichend vom Faserverlauf der textilen Halbzeuge an der Oberfläche der Bauteile ab.

Einschlüsse Fremdmaterialien sind beispielsweise Fremdfasern / -fäden, Klammern oder Flusen, die von Matrix umschlossen sind. Sie zeichnen sich abweichend vom Faserverlauf der textilen Halbzeuge an der Oberfläche der Bauteile ab.

Querfalten in sichtbarer Faserlage (Winkel zur Faserrichtung $>5^\circ$) sind Falten im textilen Halbzeug in Bauteildicke mit einer Abweichung von mehr als 5° zur sichtbaren Faserlage und Materialanhäufungen bis zur 3-fachen Überlappung von Einzellagen oder mehreren Lagen quer oder schräg zur Faserrichtung. Bei undefinierter Faserlage wie zum Beispiel bei Oberflächenvliesen, R-CF-Vliesen, oder Wirrfasermatten dient die Abzugsrichtung als Referenz.

Längsfalte in sichtbarer Faserlage (Winkel zur Faserrichtung $\leq 5^\circ$) sind Falten im textilen Halbzeug in Bauteildicke mit einer Abweichung von weniger als 5° zur sichtbaren Faserlage und Materialanhäufung bis zur 3-fachen Überlappung von Einzellagen oder mehreren Lagen längs zur Faserrichtung. Bei undefinierter Faserlage wie zum Beispiel bei Oberflächenvliesen, R-CF-Vliesen, oder Wirrfasermatten dient die Abzugsrichtung als Referenz.

Lageneinzug in Bauteildicke zeichnet sich durch eine Faltung des textilen Halbzeugs aus, bei der der UD-Kern verdrängt wird. Dabei ist die Oberfläche geschlossen. Ist dies nicht gegeben, existiert das Merkmal Riefe entlang des Profils zugleich. Lageneinzüge treten häufig zusammen mit Fehlstellen in oberster Matrixschicht und Riefen entlang des Profils auf.

Rovingfalte (Lockenbildung) äußert sich in Welligkeiten mit lokaler Faltenbildung. Der durchgängige Textil-/Rovingverlauf ist stark unduliert und nicht mehr erkennbar.

Welligkeit in Faserverlauf in BT-Ebene in sichtbarer Faserlage sind Ondulationen einzelner oder mehrerer Rovings in sichtbarer Faserlage. Dieses Merkmal kann durch eine Stauchung oder Verzug des textilen Halbzeuges verursacht werden. Welligkeiten treten häufig im Bereich von Radien und bei Lageneinzügen auf. Die Ausprägung x der Ondulation wird über das Verhältnis von a (Amplitude der Ondulation) zu l (Länge eine Ondulation) gemäß nachfolgender Abbildung 32 charakterisiert.

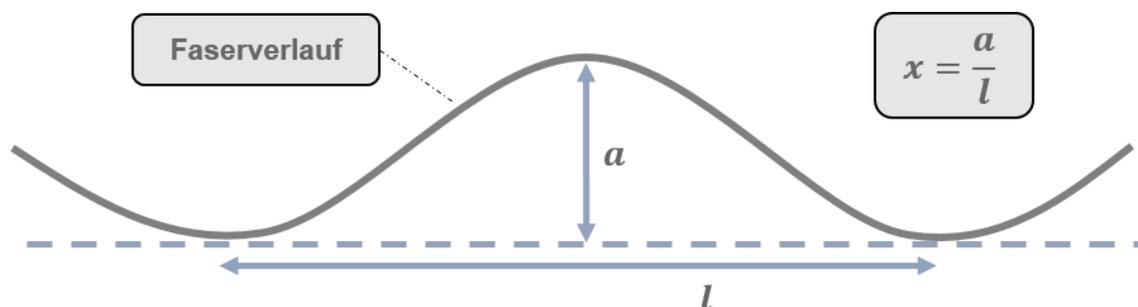


Abbildung 32: Charakterisierung der Ausprägung einer Ondulation

Fasergassen (Gaps) am Gelege zeichnen sich durch einen parallelen Verzug oder das Fehlen eines oder mehrerer Faserbündel/Rovings in der Decklage aus. Es entsteht ein Abstand zwischen zwei Faserbündeln in der sichtbaren Faserlage. Gassen können bereits im textilen Halbzeug enthalten sein oder während des Prozesses entstehen.

Flächig milchige Glasfasern sind einzelne Glasfilamente, die trotz Reinharzschicht an der Oberfläche als Erhebungen spürbar oder als solche weißlich schimmernd erkennbar sind. Dieses Merkmal ist bei Glas-Gelegen und Wirrfasermatten vorzufinden und kann ein Zeichen für mangelhafte Imprägnierung sein.

Flächig milchige Hilfsfasern sind Nähfäden der textilen Halbzeuge, die in der sichtbaren Faserlage weißlich erscheinen. Die Nähfäden sind meist von einer Reinharzschicht bedeckt, können aber auch in Verbindung mit freigelegten Glas- und Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche auftreten.

Fehlstellen in oberster Matrixschicht sind Bereiche der Profile, an denen die oberste Matrixschicht beschädigt ist oder vollständig fehlt. Das Merkmal tritt häufig zusammen mit den Merkmalen freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche, Riefen entlang des Profils und Lageneinzüge in Bauteildicke auf.

Reinharzbereiche sind Stellen, bei denen sich eine dickere Reinharzschicht als üblich ausbildet und keine Verstärkungsfasern beinhaltet. Diese Bereiche können sich farblich deutlich vom

restlichen Bauteil abheben. Die Reinharzschicht weist eine glatte und nicht beschädigte Oberfläche auf.

Ablagerungen am Bauteil ist ein Sammelbegriff für Ablagerungen, die nach der Entformung des Bauteils auf diesem verbleiben und ohne genauere Analysen nicht weiter charakterisiert werden können. Ablagerungen können zum Beispiel voreilende Matrix, Trennmittel, Additive oder auch Fremdmaterialien sein, die sich vor, während oder nach dem Prozess an der Oberfläche absetzen oder anhaften.

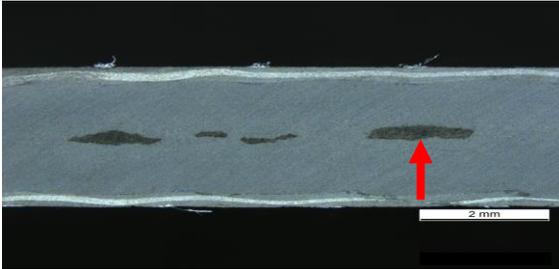
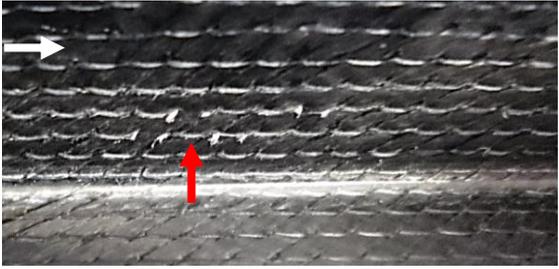
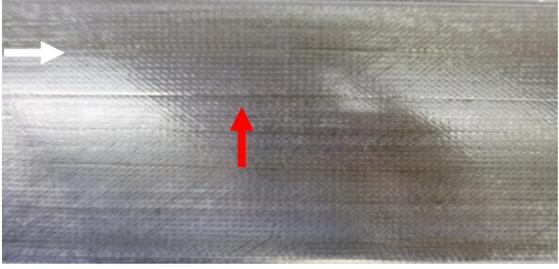
Decklage unvollständig liegt vor, wenn die Decklage nicht vollständig mit dem Profilrand abschließt oder die vorgesehene Position einnimmt. Ebenso kann dieses Merkmal auf ein zu schmales textiles Halbzeug der Decklage hinweisen. Die darunterliegende Faserlage ist zu erkennen. Dieses Merkmal kann in Verbindung mit Riefen, Längs-/Querfalten, Lageneinzügen und Rovingfalten auftreten.

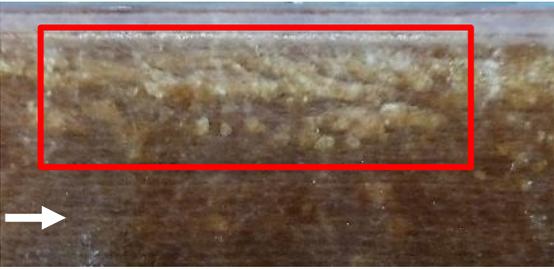
Weißer Abrieb zeichnet sich durch eine dünne Schicht pulverartigen Abriebs an der Bauteiloberfläche aus. Nach der Reinigung der Profile gibt es meist keine weiteren Anzeichen für die Existenz des Merkmals. Vereinzelt ist noch ein weißlicher Schleier zu erkennen. Dieses Merkmal kann in Verbindung mit freigelegten Glas- und Hilfsfasern auftreten.

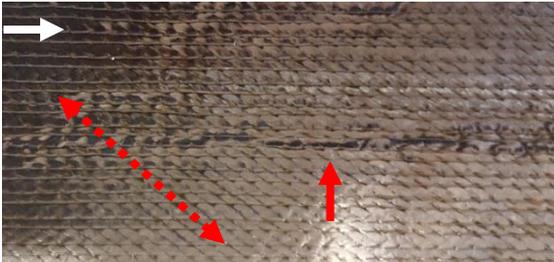
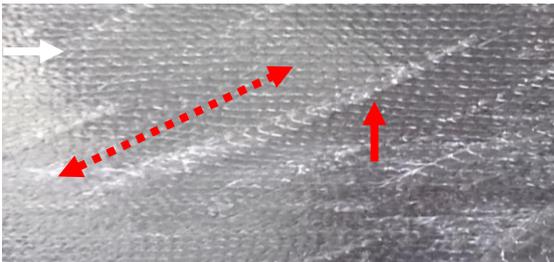
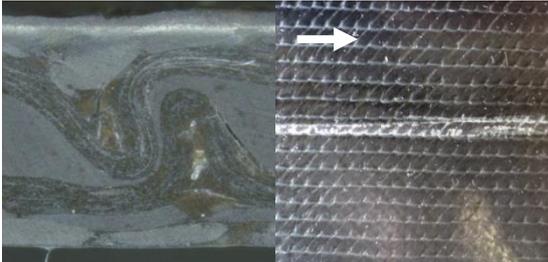
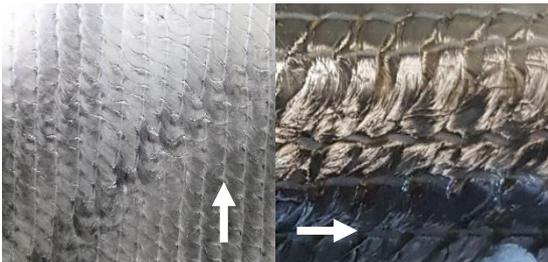
Verzug in der Decklage ist gekennzeichnet durch eine Winkelabweichung im textilen Halbzeug. Beim Auftreten dieses Merkmals ist das Bauteil ebenfalls auf Längs-/Querfalten, Decklage unvollständig und Welligkeit in Faserverlauf zu prüfen.

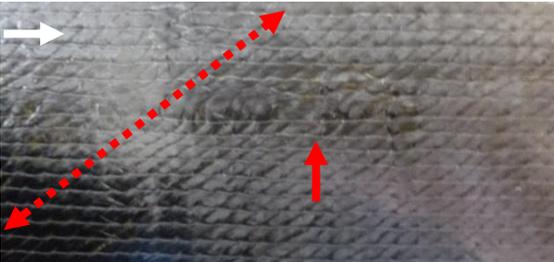
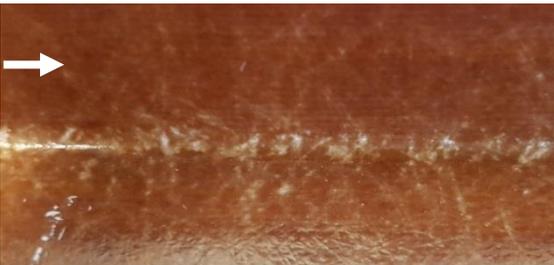
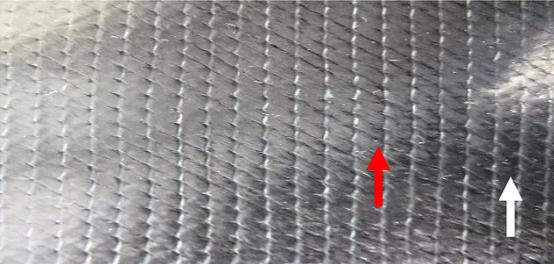
Die im Umfang der Bemusterung dokumentierten Merkmale werden in einem Merkmalskatalog gelistet und anschließend fotodokumentiert. Je nach Laminataufbau können unterschiedliche Erscheinungsbilder der Merkmale resultieren. Wichtig für die Charakterisierung und Dokumentation von Merkmalen ist ein eindeutiger Titel des Merkmals. Zudem bedarf es einer Beschreibung des jeweiligen Merkmals in Textform, ggf. mit einer klaren Unterscheidung zu ähnlichen Merkmalen. Ferner ist jedem Merkmal eine oder mehrere Methoden zu dessen Prüfung und Vermessung zuzuordnen. Da es sich bei der Pultrusion um einen kontinuierlichen Prozess handelt und Reibung zwischen Werkzeug und Pultrudat entsteht, können Merkmale auftreten, die sich kontinuierlich über ein oder mehrere Bauteile fortsetzen. Dies wird bei der Auswahl der Prüfmethode berücksichtigt und in der Dokumentation vermerkt. Zur Veranschaulichung und Wiedererkennung werden jedem Merkmal ein oder mehrere Fotos zugeordnet. Der eigens für diese Studien erarbeitete Merkmalskatalog ist in Tabelle 12 dargestellt. Weiße Pfeile kennzeichnen die Abzugsrichtung, rote Markierungen kennzeichnen das Merkmal (ggf. in Relation zur Faserorientierung).

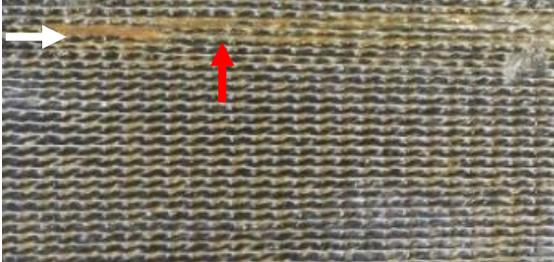
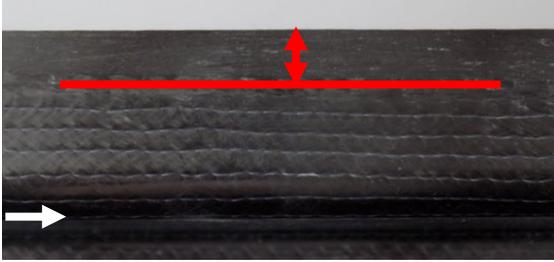
Tabelle 12: Merkmalskatalog

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
<p>Trockenstelle</p>  <p>Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p><u>Beschreibung:</u> Trockenstellen sind nicht imprägnierte Bereiche im Bauteil.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Nadel für Prüfung auf Durchgängigkeit, Schliffbild, CT</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	-
<p>Freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehalteter Oberfläche</p>  <p>Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p><u>Beschreibung:</u> Freigelegte Fasern sind Glas- oder Hilfsfasern wie Nähfäden, die nicht mit Matrix bedeckt sind.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	-
<p>Riefen entlang des Profils</p>  <p>Kontinuierliches Merkmal: Ja</p>	<p><u>Beschreibung:</u> Eine Vertiefung entlang des Profils (Furchung). Vereinzelt können Matrixrückstände in der Riefe vorhanden sein, die teils leicht vom Bauteil zu lösen sind.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Dickenmesstaster</p> <p><u>Ausprägung:</u> Länge, Breite, Tiefe</p>	Längs-/Querfalten, Lageneinzug
<p>Anhäufung offener kleiner Poren (bzw. nur mit dünner Matrixschicht überzogen)</p>  <p>Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p><u>Beschreibung:</u> Offene Poren sind durch eine nicht geschlossene Matrixschicht gekennzeichnet bzw. nur mit einer dünnen Matrixschicht überzogen. Es sind keine freiliegenden Fasern vorhanden.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Nadel bei dünner Matrixschicht</p> <p><u>Ausprägung:</u> Anzahl auf Prüffläche 100x100 mm²</p>	-

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
<p data-bbox="145 405 715 465">Einzelne an der Oberfläche sichtbare Blasen</p>  <p data-bbox="145 741 715 801">Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p data-bbox="715 405 1193 465"><u>Beschreibung:</u> An der Oberfläche sichtbare Blasen. Lokale, meist undefinierte Wandstärkeänderungen. Die Matrixoberfläche ist geschlossen.</p> <p data-bbox="715 472 1193 533"><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p data-bbox="715 539 1193 600"><u>Ausprägung:</u> Größte Ausprägung der Blase (Länge x Breite)</p>	<p data-bbox="1193 584 1410 622">Trockenstelle</p>
<p data-bbox="145 801 715 875">Mehrere an der Oberfläche sichtbare Blasen (Blasenfeld)</p>  <p data-bbox="145 1167 715 1220">Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p data-bbox="715 801 1193 862"><u>Beschreibung:</u> Eine Anhäufung von einzelnen Blasen. Merkmale mit einem Abstand < 20 mm sind als ein Merkmal zu erfassen. Merkmal liegt vor, wenn auf einer Fläche von 30x20 mm² min. 2 Blasen vorliegen.</p> <p data-bbox="715 869 1193 929"><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p data-bbox="715 936 1193 996"><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	<p data-bbox="1193 987 1410 1025">Trockenstelle</p>
<p data-bbox="145 1220 715 1294">Einschlüsse durch C-Fasern, Nähfäden und Glasfasern</p>  <p data-bbox="145 1585 715 1639">Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p data-bbox="715 1220 1193 1281"><u>Beschreibung:</u> C-Fasern, Nähfäden und/oder Glasfasern die abweichend vom Faserverlauf des Halbzeuges an der Oberfläche sichtbar werden (bspw. Fasern aus Beschnitt).</p> <p data-bbox="715 1288 1193 1348"><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p data-bbox="715 1355 1193 1415"><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	<p data-bbox="1193 1413 1410 1451">-</p>
<p data-bbox="145 1639 715 1697">Einschlüsse Fremdmaterialien</p>  <p data-bbox="145 1980 715 2020">Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>	<p data-bbox="715 1639 1193 1700"><u>Beschreibung:</u> Einschlüsse von z.B. Fremdfasern / -fäden, Klammern, Flusen, etc., die von Matrix umschlossen sind.</p> <p data-bbox="715 1706 1193 1767"><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p data-bbox="715 1774 1193 1834"><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	<p data-bbox="1193 1816 1410 1854">-</p>

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
<p>Querfalte in sichtbarer Faserlage (quer oder schräg zur Faserrichtung)</p> 	<p><u>Beschreibung:</u> Materialanhäufung bis zur 3-fachen Überlappung von Einzellagen oder mehreren Lagen quer oder schräg zur Faserrichtung. Winkel zur Faserrichtung >5°.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Winkelmesser</p> <p><u>Ausprägung:</u> Länge</p>	<p>Trockenstelle, Lageneinzug in Bauteildicke</p>
<p>Längsfalte in sichtbarer Faserlage (längs zur Faserrichtung)</p> 	<p><u>Beschreibung:</u> Materialanhäufung bis zur 3-fachen Überlappung von Einzellagen oder mehreren Lagen längs zur Faserrichtung. Winkel zur Faserrichtung ≤5°.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Winkelmesser</p> <p><u>Ausprägung:</u> Länge</p>	<p>Trockenstelle, Lageneinzug in Bauteildicke</p>
<p>Lageneinzug in Bauteildicke</p> 	<p><u>Beschreibung:</u> Bereich, in dem die Deck-Lage(n) durch eine Falte im Gelege in Bauteildicke eingezogen wurde(n) und der UD-Kern verdrängt wird. Im Gegensatz zu Längs-/Querfalten wird der UD-Kern verdrängt.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Schliffbild, CT</p> <p><u>Ausprägung:</u> Länge</p>	<p>Riefen, Längs-/Querfalten, Fehlstellen in oberster Matrixschicht</p>
<p>Rovingfalte (Lockenbildung)</p> 	<p><u>Beschreibung:</u> Rovingfalten („eingepresste Lockenbildungen“) äußern sich in Welligkeiten mit lokaler Faltenbildung. Der durchgängige Textil-/Rovingverlauf ist nicht mehr erkennbar.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	<p>Längs-/Querfalten</p>
<p>Kontinuierliches Merkmal: Nein</p>		

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
Welligkeit in Faserverlauf in BT-Ebene in sichtbarer Faserlage	<p><u>Beschreibung:</u> Welligkeiten sind eine oder mehrere Gestaltabweichungen im Faserverlauf in der Bauteilebene.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Verhältnis Amplitude / Wellenlänge</p>	Verzug in der Decklage
	Kontinuierliches Merkmal: Nein	
Fasergassen (Gaps) im Gelege	<p><u>Beschreibung:</u> Abstand zwischen zwei Faserbündeln im Gelege der sichtbaren Faserlage.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Länge, Breite</p>	Reinharz-bereiche
	Kontinuierliches Merkmal: Ja	
Flächig milchige Glasfasern	<p><u>Beschreibung:</u> Zusammenhängende Fläche von milchigen Glasfasern. Zusammenhängende Fläche wird dadurch beschrieben, dass die einzelnen Fasern weniger als 50 mm voneinander entfernt sind. Die Matrixoberfläche ist geschlossen.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Schliffbild</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	Freigelegte Glas- und Hilfsfasern, Flächig milchige Hilfsfasern
	Kontinuierliches Merkmal: Ja	
Flächig milchige Hilfsfasern	<p><u>Beschreibung:</u> Zusammenhängende Fläche von milchigen Hilfsfasern. Die Matrixoberfläche ist geschlossen.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	Freigelegte Glas- und Hilfsfasern, Flächig milchige Glasfasern
	Kontinuierliches Merkmal: Ja	

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
Fehlstellen in oberster Matrixschicht	<p><u>Beschreibung:</u> Fehlstellen in oberster Matrixschicht sind flächige Ausbrüche, die eine Dickenänderung hervorrufen.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	Freigelegte Glas- und Hilfsfasern, Riefen entlang des Profils, Lageneinzug in Bauteildicke
	Kontinuierliches Merkmal: Ja	
Reinharzbereiche	<p><u>Beschreibung:</u> Reinharzbereiche zeichnen sich durch fehlende Verstärkungsfasern in der Matrix aus.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	-
	Kontinuierliches Merkmal: Nein	
Ablagerungen am Bauteil	<p><u>Beschreibung:</u> Rauhe Ablagerungen, die nach der Entformung am Bauteil verbleiben.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)</p>	-
	Kontinuierliches Merkmal: Nein	
Decklage unvollständig	<p><u>Beschreibung:</u> Decklage schließt nicht mit dem Profilrand ab. UD-Rovings, oder darunterliegende Lagen zu erkennen.</p> <p><u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal</p> <p><u>Ausprägung:</u> Abstand Decklage zu Profilrand</p>	Riefen, Längs-/Querfalten, Lageneinzug, Rovingfalte
	Kontinuierliches Merkmal: Ja	

Titel / Bild	Beschreibung / Prüfung / Ausprägung	Mögliche Kombinationen
Weißer Abrieb	<u>Beschreibung:</u> Das Merkmal zeichnet sich durch eine Schicht weißlichen Abriebs an der Oberfläche des Bauteiles aus. <u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Wischtest, Stahllineal <u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)	Freigelegte Glas- und Hilfsfasern
Verzug in der Decklage	<u>Beschreibung:</u> Das Merkmal ist gekennzeichnet durch eine Winkelabweichung im textilen Halbzeug in mehreren Richtungen. <u>Prüfung:</u> Visuelle Prüfung, Stahllineal, Winkelmesser <u>Ausprägung:</u> Betroffene Fläche (größte Länge x größte Breite)	Längs-/Querfalten, Decklage unvollständig, Welligkeit in Faserverlauf

Die Charakterisierung der Merkmale erfolgt anhand der Ergebnisse aus der Sichtprüfung. Sollten diese Erkenntnisse nicht zur eindeutigen Charakterisierung ausreichen, werden weitere Prüfmethode, wie beispielsweise Ultraschall, CT oder Schlibfbildanalysen herangezogen.

Ein weiterer Schritt der Bemusterung ist die Erfassung geometrischer Eigenschaften. Dazu werden Länge, Breite, Höhe, sowie Dicke der Flanken und des Gurtes aufgenommen und dokumentiert. Abschließend folgt eine Wägung der Profile.

Durch diesen, speziell für Pultrudate erarbeiteten Merkmalskatalog sowie die beschriebene Prüfmethode ist es nun möglich, die Auswirkungen der Parameterkonfigurationen auf die Zielgröße zu bestimmen.

5. Ergebnisdarstellung und Diskussion

Im Folgenden werden sowohl die Ergebnisse aus den Vorversuchen mit Aufbau 1-6 (siehe Abbildung 21), als auch die Ergebnisse der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 (siehe Tabelle 9) dargestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse der Prozessdatenauswertung, der Bemusterung nach Merkmalskatalog, der physikalisch-chemischen und thermischen Untersuchungsmethoden, der mikrostrukturellen Untersuchungsmethoden und der mechanischen Prüfungen werden zunächst separat dargestellt und analysiert. Abschließend erfolgt die Sammlung und der Abgleich der Erkenntnisse aus den Einzeluntersuchungen.

5.1 Prozessdatenauswertung

Alle zur Analyse herangezogenen Prozessdaten stammen aus stabilen Prozessen und erstrecken sich jeweils über einen Messzeitraum von mehr als 20 min. Daher wird angenommen, dass die verwendeten Daten repräsentativ für die jeweils analysierten Parameterkonfigurationen und Lagenaufbauten sind.

Die Auswertung der Drücke in der Injektionskammer bei ausgewählten Vorversuchen lässt Rückschlüsse auf die Imprägnierbarkeit und Prozesszierbarkeit der unterschiedlichen Lagenaufbauten zu. Nachfolgende Abbildung 33 zeigt einen Vergleich der Drücke an Kammeranfang und Kammerende für die Aufbauten 3, 4 (eigentliches Zielsystem) und 6 (angepasstes Zielsystem) aus den Vorversuchen mit Schliffbildanalysen zur Überprüfung der Imprägnierqualität. Die Lage der Druckmessstellen im Werkzeug sind in Abbildung 25 dargestellt.

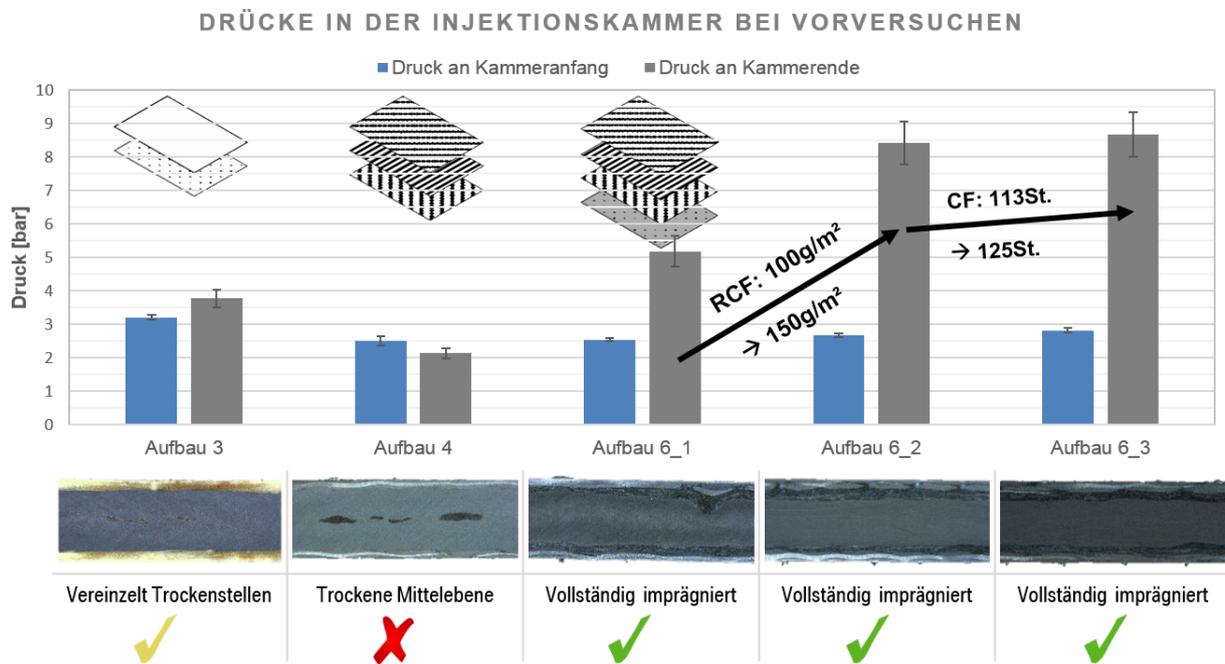


Abbildung 33: Drücke in der Injektionskammer bei ausgewählten Vorversuchen

Keiner der Aufbauten zeigt wesentliche Auswirkungen auf die Drücke an Kammeranfang. Hier stellt sich nahezu der vorgesehene Injektionsdruck von 3 bar ein.

Auffällig ist zunächst, dass die Standardabweichungen der Druckwerte am Anfang der Kammer deutlich geringer sind als am Ende der Kammer. Dies lässt sich auf die Materialinhomogenitäten der verwendeten textilen Halbzeuge zurückführen. Das GF-Textil in Aufbau 3 (Oberflächenvlies + CFM – Continuous Filament Mat) und das R-CF-Vlies in Aufbau 6 (Vlies aus recycelten CF) weisen durch ihre regellose Faseranordnung Dick- und Dünnstellen auf, das CF-Gelege in Aufbau 4 und 6 bildet durch die Vernähung Gassen. Zudem hat die aus den Aufbauten entweichende Luft ebenfalls Einfluss auf die Standardabweichungen der Druckwerte am Ende der Kammer.

Das eigentliche Zielsystem, Aufbau 4, ist unzureichend imprägniert (Trockenstellen in der Mittelebene) und der Druck am Ende der Kammer ist geringer als am Anfang. Der kompakte Lageraufbau mit geringer Permeabilität nimmt nicht genug Matrix auf. Stattdessen entweicht die Matrix am Werkzeugeingang. Dadurch gelangt zu wenig Matrix in den Aufbau und der Druck am Ende der Kammer reicht nicht für eine vollständige Imprägnierung aus. Durch den Wärmeeintrag sinkt die Viskosität der Matrix bis zum Ende der Kammer. Es kann davon ausgegangen werden, dass die unvollständige Imprägnierung und die damit einhergehenden Trockenstellen aufgrund der gesunkenen Viskosität teilweise aufgehoben werden und somit am Kammerende einen geringeren Druck als am Kammeranfang entsteht.

Aufbau 3 (GF-Textil) weist ebenfalls Trockenstellen in der Mittelebene auf. Der Druck am Kammerende ist jedoch deutlich höher als beim eigentlichen Zielsystem (Aufbau 4). Auch der Matrixaustritt am Werkzeugeingang ist geringfügig geringer als bei Aufbau 4.

Das angepasste Zielsystem mit R-CF-Vlies (Aufbau 6) zeigt einen deutlich höheren Druck am Ende der Kammer und eine vollständige Imprägnierung. Es ist kein Matrixaustritt zu verzeichnen. Eine Erhöhung der Grammaturn des R-CF-Vlieses erhöht auch den Druck am Ende der Kammer. Zusammengefasst sind zwei Effekte zu beobachten:

- Bauscheffekt: Bauschige Halbzeuge dichten den Werkzeugeingang gegen Matrixaustritt und Druckverlust ab und gewährleisten den vorgesehenen Injektionsdruck am Kammeranfang.
(CF-Gelege $400 \text{ g/m}^2 < \text{GF-Textil} < \text{R-CF-Vlies } 100 \text{ g/m}^2 < \text{R-CF-Vlies } 150 \text{ g/m}^2$)
- Schwammefekt [Eng17]: Schwammartige Halbzeuge tragen mehr Matrix vom Injektionspunkt zum Ende der Kammer und erhöhen dort den Druck zum Imprägnieren des Aufbaus.
(CF-Gelege $400 \text{ g/m}^2 < \text{GF-Textil} < \text{R-CF-Vlies } 100 \text{ g/m}^2 < \text{R-CF-Vlies } 150 \text{ g/m}^2$)

Hier zeigt sich noch kein Einfluss des Formfüllgrades⁴ (113CF auf 125CF) auf den Druck am Ende der Kammer.

Der Bausch- und Schwammefekt des GF-CFM wird durch den Wechsel von Aufbau 4 (eigentliches Zielsystem) zu Aufbau 5 im laufenden Prozess bestätigt. Fügt man dem Aufbau das GF-CFM hinzu, zeigt sich der in Abbildung 34 dargestellte Druckverlauf. Diese Änderung geschieht FVG-neutral durch Anpassung der Rovinganzahl.

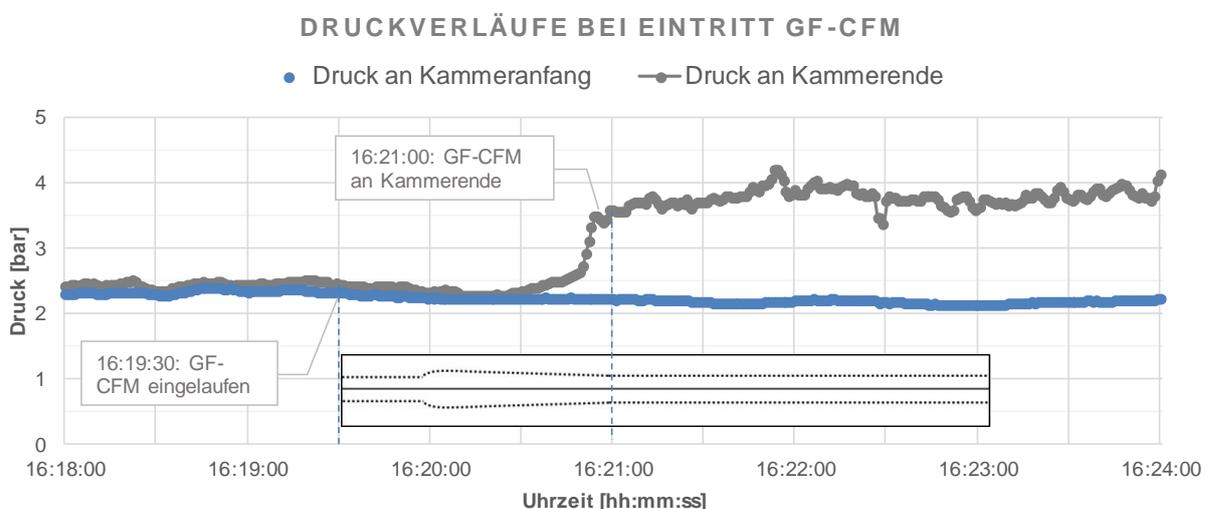


Abbildung 34: Druckverläufe bei Eintritt GF-CFM (Wechsel von Aufbau 4 zu Aufbau 5)

⁴ Formfüllgrad - festgelegt durch die Anzahl der Rovings in der Mittelebene des Profils

Zum Zeitpunkt des Eintritts des GF-CFM (Uhrzeit: 16:19:30) ist die Kammer abgedichtet, die injizierte Matrix wird durch das Halbzeug ans Kammerende getragen und sorgt für einen entsprechenden Druckanstieg (Uhrzeit: 16:21:00)⁵. Der zu diesem Zeitpunkt in der Kammer befindliche Aufbau (nur CF-Gelege), dargestellt durch Schliffbilder in Abbildung 35, wird vollständig imprägniert.

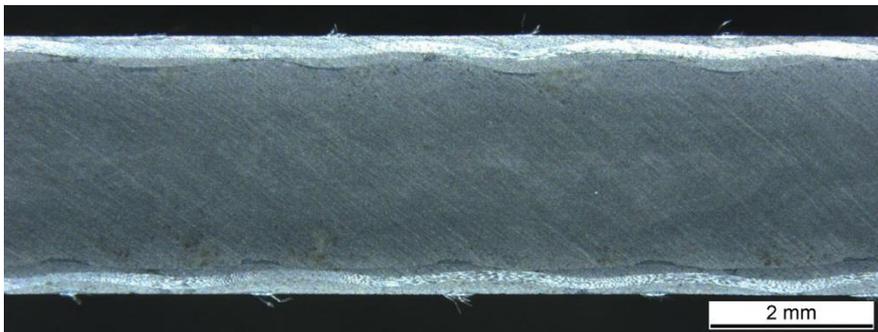


Abbildung 35: Schliffbild Aufbau 5 zum Zeitpunkt des Eintritts des GF-CFM

Eine Erhöhung der Rovinganzahl könnte zwar ebenfalls eine Wirkung ähnlich des Bauscheffektes erzielt, hätte dann jedoch an anderen Stellen im Prozess Nachteile. Nachfolgende Abbildung 36 zeigt schematisch die Einflüsse einer erhöhten Rovinganzahl im Prozessverlauf.

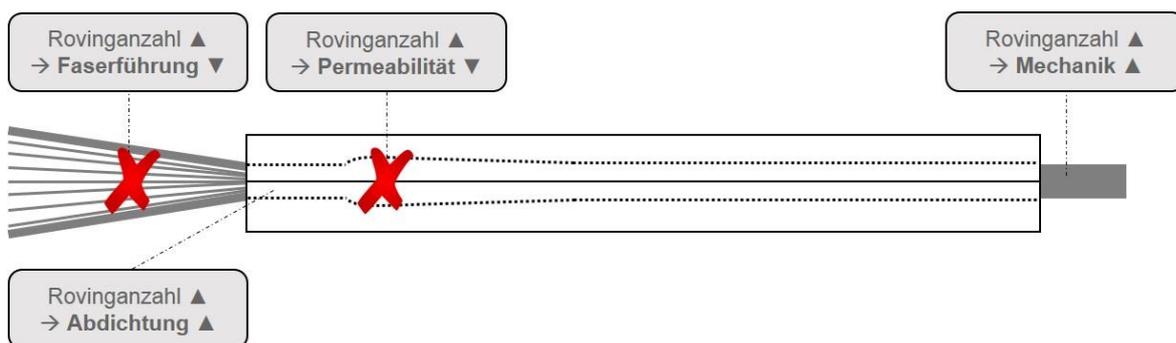


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Einflüsse erhöhter Rovinganzahl im Prozessverlauf

Vor dem Werkzeug bedeutet eine erhöhte Rovinganzahl eine aufwendigere Faserführung, aber auch eine verbesserte Abdichtung des Werkzeuges gegen Matrixaustritt. Am Injektionspunkt resultiert aus einer erhöhten Rovinganzahl eine geringere Permeabilität des Aufbaus und damit

⁵ 90 Sekunden von Eintritt bis Druckanstieg entsprechen 0,45 m zurückgelegtem Weg (Abzugsgeschwindigkeit von 0,3 m/min), also der Distanz von Werkzeugeingang bis Ende Injektionskammer.

einhergehend eine schlechtere Imprägnierbarkeit. Im ausgehärteten Profil bewirkt eine erhöhte Rovinganzahl wiederum bessere mechanische Eigenschaften in Längsrichtung. Diese konkurrierenden Auswirkungen können durch Nutzung des Bauscheffektes weitestgehend vermieden werden.

Die Auswertung der Drücke in der Injektionskammer bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 zeigt die Einflüsse von Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperatur und Temperaturprofil. Nachfolgende Abbildung 37 zeigt einen Vergleich der Drücke an Kammeranfang und Kammerende für die Konfigurationen 1-9, vgl. Tabelle 9.

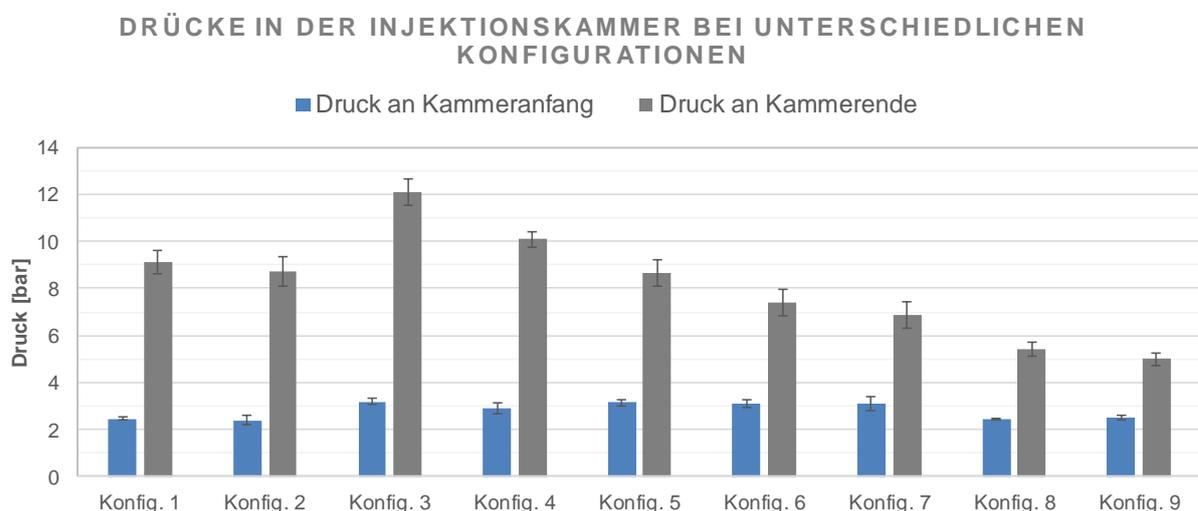


Abbildung 37: Drücke in der Injektionskammer an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Bei keiner der Konfigurationen ist ein Matrixaustritt am Werkzeugeingang zu verzeichnen, daher können die dargestellten Werte für die Analyse herangezogen werden. Bestätigt wird dies dadurch, dass keine der Konfigurationen nennenswerte Auswirkungen auf die Drücke an Kammeranfang zeigt. Es stellt sich nahezu der vorgesehene Injektionsdruck ein. Auch hier zeigt sich, wie schon in den Vorversuchen, dass die Standardabweichungen der Druckwerte am Anfang der Kammer deutlich geringer sind als am Ende der Kammer. Dies lässt sich ebenfalls auf die Materialinhomogenitäten der verwendeten textilen Halbzeuge zurückführen.

Entgegen den Erkenntnissen aus den Vorversuchen (kein Einfluss des Formfüllgrades auf die Drücke in der Kammer erkennbar) ist in der Parameterstudie ein Einfluss festzustellen. Der Druck am Ende der Kammer ist geringer bei weniger Rovings (Konfiguration 1-4 – 125CF; Konfiguration 5-9 – 113CF). Zurückzuführen ist dies auf die geringere Packungsdichte und damit höhere Permeabilität. Der Zusammenhang wird durch das jeweilige Verhältnis von Druck am

Ende der Kammer zu Druck am Anfang der Kammer bestätigt. Diese Quotienten stellen das Maß der Druckerhöhung durch die Höhenänderung der Kammer von Anfang zum Ende dar und eliminieren somit Druckunterschiede am Anfang der Kammer. Die auf diese Weise normierten Werte sind in nachfolgender Abbildung 38 dargestellt.

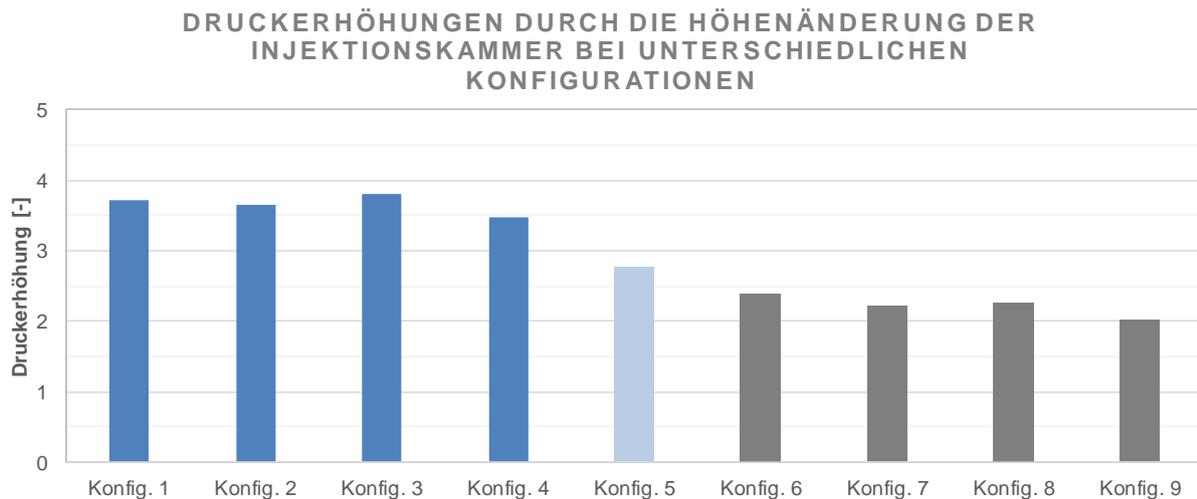


Abbildung 38: Druckerhöhung durch die Höhenänderung der Injektionskammer an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Für die Konfigurationen 1-4 (125CF) liegen die Quotienten über 3,5. Bei den Konfigurationen 5-9 (113CF) ist die Druckverstärkung mit Werten bis 2,4 deutlich geringer. Der Quotient für den Mittelwertsversuch (Konfiguration 5) liegt mit 2,7 zwischen denen der oberen und unteren Parameterstufe und bestätigt somit den Zusammenhang zwischen Formfüllgrad und Druck am Kammerende.

Eine Auswirkung der Abzugsgeschwindigkeiten auf die Drücke in der Kammer kann nicht festgestellt werden.

Konfiguration 1+2 sind mit höherer Kammertemperatur (60 °C) produziert worden. Die Drücke am Ende der Kammer bei diesen Versuchen sind, gemäß Abbildung 37, deutlich geringer als bei Konfiguration 3+4 (25 °C Kammertemperatur). Gleiches gilt für Konfiguration 8+9 (60°C Kammertemperatur) im Vergleich zu Konfiguration 6+7 (25 °C Kammertemperatur). Dieser Sachverhalt lässt sich auf die geringere Viskosität der Matrix bei höherer Temperatur in diesem Bereich zurückführen. Der entstehende Druck durch Imprägnieren der Fasern am Ende der Kammer sinkt mit geringerer Viskosität der Matrix.

Aufgrund der Tatsache, dass sich eine Variation der Temperaturprofile örtlich gesehen erst hinter der Injektionskammer ausprägen kann, sind keine Auswirkungen der Temperaturprofile auf die Drücke in der Kammer festzustellen.

Nachfolgende Abbildung 39 zeigt die Einflüsse von Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperatur und Temperaturprofil auf die Abzugskraft bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9.

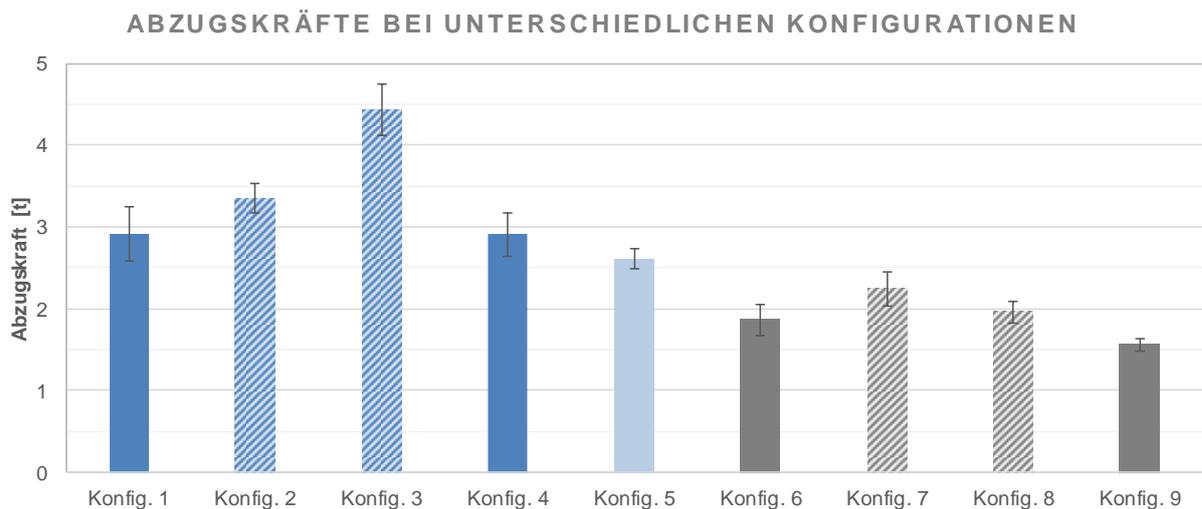


Abbildung 39: Abzugskräfte an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Abzugskraft ist geringer bei geringerem Formfüllgrad (Konfiguration 6-9 – 113CF; Konfiguration 1-4 – 125CF). Dies wird durch den Mittelwertversuch mit 119 Rovings bestätigt. Hier liegt die Abzugskraft zwischen den Werten der oberen und unteren Parameterstufe. Bei Analyse des Verlaufs der Abzugskraft innerhalb eines Versuches, bei dem die Rovinganzahl kontinuierlich verringert wurde, bestätigt sich der Zusammenhang von Abzugskraft und Formfüllgrad ebenfalls. Nachfolgende Abbildung 40 zeigt den Verlauf der Abzugskraft, ausgehend von 129CF bis hin zu Konfiguration 9 (113CF), bei kontinuierlicher Verringerung der Rovinganzahl.

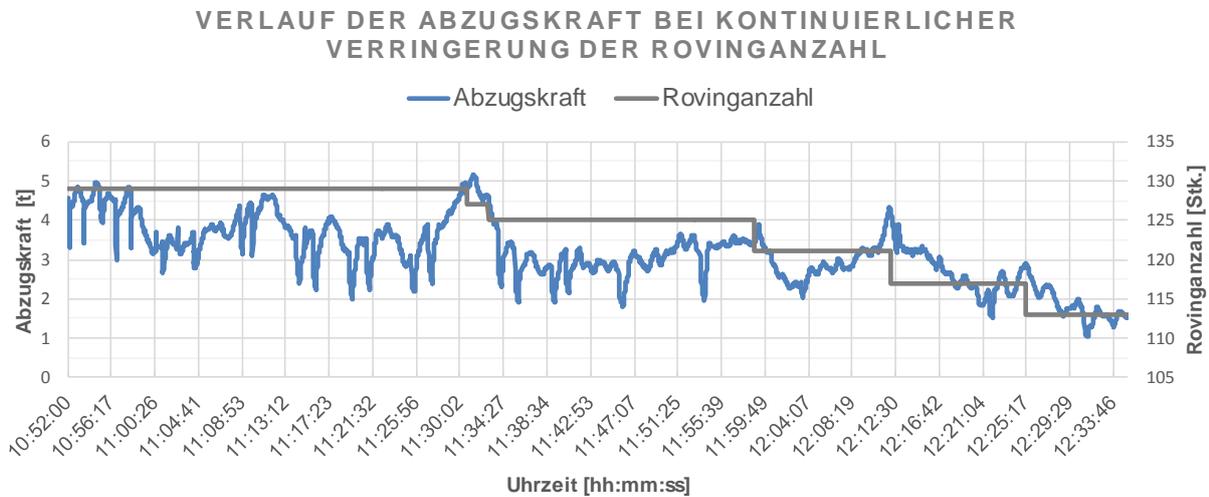


Abbildung 40: Verlauf der Abzugskraft an Aufbau 6, ausgehend von 129CF bis hin zu Konfiguration 9 (113CF), bei kontinuierlicher Verringerung der Rovinganzahl

Konfiguration 2+3+7+8 sind mit 0,45 m/min, also der höheren Abzugsgeschwindigkeit produziert worden.

Gemäß Abbildung 39 resultieren daraus für Konfiguration 2+3 höhere Abzugskräfte als bei Konfiguration 1+4 (gleiche Rovinganzahl 125CF, aber 0,3 m/min). Gleiches ist für Konfiguration 7+8 festzuhalten. Diese Konfigurationen zeigen höhere Abzugskräfte als Konfiguration 6+9 (gleiche Rovinganzahl 113CF, aber 0,3 m/min). Auch hier liegt die Abzugskraft im Mittelwertsversuch mit 0,38 m/min und 119CF zwischen den Werten der oberen und unteren Parameterstufe.

Diese Abhängigkeit der Abzugskraft von der Abzugsgeschwindigkeit lässt sich mathematisch hinterlegen. Unter der Annahme, dass die viskose, flächenbezogene Reibung zwischen Matrix und Werkzeugwand im Gelbereich den maßgeblichen Anteil der Reibungskraft darstellt, zeigt sich der lineare Zusammenhang von Abzugsgeschwindigkeit und viskoser, flächenbezogener Reibungskraft (charakterisiert durch Schubspannung aufgrund von Scherung) in den nachfolgenden Gleichungen (3-5). Dieser mathematische Nachweis setzt eine konstante Abzugsgeschwindigkeit, eine laminare Grenzschichtströmung und einen dünnen Reinharzfilm an der Werkzeugoberfläche voraus [Bla99, BeP13, ZiB13, OBR15] und wurde bereits in den Untersuchungen von [Bla99] dargelegt.

$$\tau = \eta (\alpha, T) \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{dy} \quad (4)$$

$$\tau = \eta (\alpha, T) \cdot \frac{u}{dy} \quad (5)$$

τ = Schubspannung

η = dynamische Viskosität

α = Reaktionsumsatz

T = Temperatur

$\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit

u = Abzugsgeschwindigkeit

dy = Dicke des Reinharzfilms

Auswirkungen von Kammertemperierung und Temperaturprofil auf die Abzugskräfte können nicht festgestellt werden.

Nachfolgende Abbildung 41 zeigt die Einflüsse von Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil auf die Heizleistung der Zone 1 bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9. Die Heizleistung ist als prozentualer Anteil an der Maximalleistung von 3 kW je Zone dargestellt. Die Anordnung der Heizzonen ist in Abbildung 26 veranschaulicht.

Konfiguration 2+3+7+8 wurden mit 0,45 m/min, also der höheren Abzugsgeschwindigkeit produziert. Daraus resultieren für Konfiguration 2+3 höhere Heizleistungen in Zone 1 als bei Konfiguration 1+4 (0,3 m/min). Gleiches ist für Konfiguration 7+8 festzuhalten. Diese Konfigurationen zeigen höhere Heizleistungen in Zone 1 als Konfiguration 6+9 (0,3 m/min). Auch hier liegt die Heizleistung in Zone 1 im Mittelwertsversuch mit 0,38 m/min zwischen den Werten der oberen und unteren Parameterstufe.

Begründet werden kann diese Erkenntnis durch den höheren Materialdurchsatz bei höherer Abzugsgeschwindigkeit. Das heißt, es gelangen mehr kalte Matrix, Rovings und textile Halbzeuge in der gleichen Zeit in das Werkzeug. Dadurch erhöht sich die von der Heizung in Zone 1, zum Halten der eingestellten Temperatur (150 °C), benötigte Heizleistung. Dieser Effekt ist in den Zonen 2-4 nicht zu verzeichnen, da das Gemenge aus Faser und Matrix bereits in Zone 1 die größte Temperaturdifferenz erfahren hat (von Raumtemperatur auf 150 °C). Die Temperaturdifferenz von Zone 1 zu Zone 2 beträgt lediglich zwischen 20 °C und 40 °C.

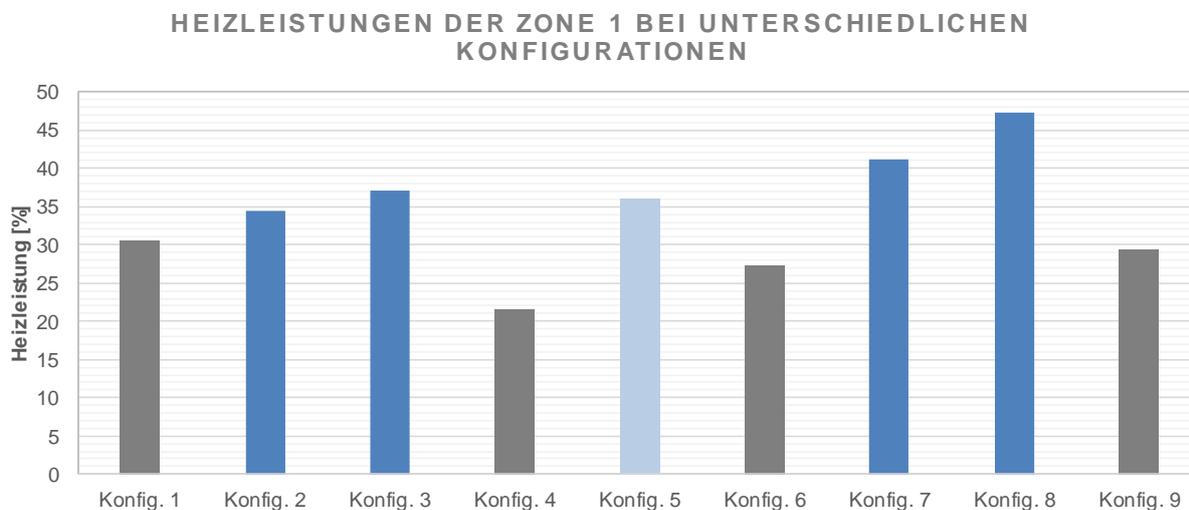


Abbildung 41: Heizleistungen der Zonen 1 an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Aus der Analyse der benötigten Heizleistungen der Zonen 2-4 können keine wesentlichen Unterschiede bei den untersuchten Parameterkombinationen festgestellt werden. Der Vergleich der benötigten Heizleistungen aller Zonen ist in Anhang H dargestellt.

5.2 Bemusterung nach Merkmalskatalog

Der im Kapitel 4.4.2 erarbeitete Merkmalskatalog dient als Bewertungsgrundlage für die Bemusterung der Profile aus der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9.

Die zentrale Zielsetzung dieser Methode ist die Identifikation von Merkmalen, die Feststellung der Häufigkeiten von auftretenden Merkmalen sowie die geometrische Vermessung der Pultrudate. Die Ermittlung der Häufigkeiten der Merkmale wurde im Rahmen einer Studienarbeit von Tobias Helm durchgeführt.

Nachfolgende Abbildung 42 zeigt die relativen Häufigkeiten der Merkmale „Riefen entlang des Profils“, „Lageneinzug in Bauteildicke“, „Verzug in der Decklage“ jeweils für die Konfigurationen 1-9. Die Anzahl der bemusterten Bauteile je Konfiguration ist in Anhang I zu finden.

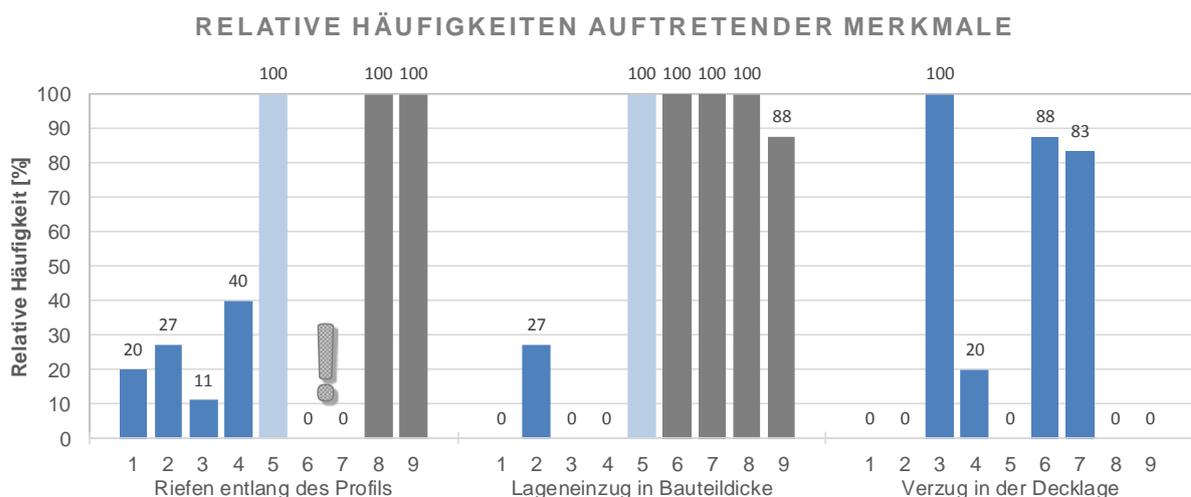


Abbildung 42: Relative Häufigkeiten der Merkmale „Riefen entlang des Profils“, „Lageneinzug in Bauteildicke“, „Verzug in der Decklage“ an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die relativen Häufigkeiten des Merkmals **„Riefen entlang des Profils“** zeigen eine Korrelation zum FFG. Die Konfigurationen 1-4 wurden mit dem hohen FFG (Rovinganzahl 125CF) und die Konfigurationen 6-9 mit dem niedrigen FFG (Rovinganzahl 113CF) produziert. Die Konfigurationen mit hohem FFG zeigen deutlich geringe Häufigkeiten als die Konfigurationen mit geringem FFG. Zu beachten ist jedoch, dass die Konfigurationen 6+7 durch das Merkmal „Verzug in der Decklage“ überlagert sind. „Verzug in der Deck-Lage“ beschreibt eine Winkelabweichung des textilen Halbzeugs in mehrere Richtungen. Dabei zieht sich das Textil oftmals ausschließlich

in den Gurt der Profile. Somit kommt es dort lokal zu einer Erhöhung des Formfüllgrades, wodurch sich wiederum keine Riefen entlang des Profils ausbilden.

Eine Untersuchung der Profile aus den Vorversuchen bestätigt die Korrelation zwischen dem FFG und dem Merkmal „Riefen entlang des Profils“. Tabelle 13 zeigt eine Auswertung zum Auftreten von „Riefen entlang des Profils“ in Abhängigkeit von der Rovingzahl aus den Vorversuchen (Glas Rovings, Glas Gelege, EP-Matrix). Beim dargestellten Versuch wurde die Rovinganzahl sukzessiv von 230 auf 252GF erhöht.

Tabelle 13: „Riefen entlang des Profils“ in Abhängigkeit von der Rovingzahl aus Vorversuchen

Probe	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17
Auftreten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FFG⁶	230	230	230	230	230	230	230	231	232	232	234	236	236	236	238	239	239
Probe	#18	#19	#20	#21	#22	#23	#24	#25	#26	#27	#28	#29	#30	#31	#32	#33	#34
Auftreten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FFG	239	239	239	241	241	241	241	243	243	243	243	243	243	243	243	243	243
Probe	#35	#36	#37	#38	#39	#40	#41	#42	#43	#44	#45	#46	#47	#48	#49	#50	#51
Auftreten	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FFG	243	243	244	244	246	246	246	246	246	246	246	247	248	249	250	252	252

„x“ Merkmal tritt auf; „-“ Merkmal tritt nicht auf

Bis zu einer Rovinganzahl von 244GF bilden sich Riefen entlang des Profils aus. Diese verringern sich in ihrer Ausprägung, bis sie vollständig verschwinden. Die Korrelation von „Riefen entlang der Profils“ und dem FFG kann einerseits durch Verschmutzungen im Werkzeug aufgrund von anhaftenden Matrixrückständen erklärt werden. Diese Werkzeugverschmutzungen bilden sich bevorzugt bei geringem FFG und prägen sich in schmalen Streifen längs der Abzugsrichtung im Werkzeug aus. An den Stellen der Verschmutzungen wird das Faserpaket deformiert und von der Werkzeugoberfläche weggedrückt. Eine weitere Ursache ist der geringe Gegendruck durch das Faserpaket bei geringem FFG. Es wird also nicht genug Druck auf die äußeren Lagen aufgebaut, um diese flächig an der Werkzeugoberfläche zu halten. Dies begünstigt die Entstehung von „Riefen entlang des Profils“, da der Selbstreinigungseffekt durch die Fasern abnimmt oder gar fehlt.

Das Zusammenspiel von geringem FFG und Werkzeugverschmutzungen ist in nachfolgender Abbildung 43 beispielhaft dargestellt (Vorversuche an Aufbau 3).

⁶ Formfüllgrad - festgelegt durch die Anzahl der Rovings in der Mittelebene des Profils

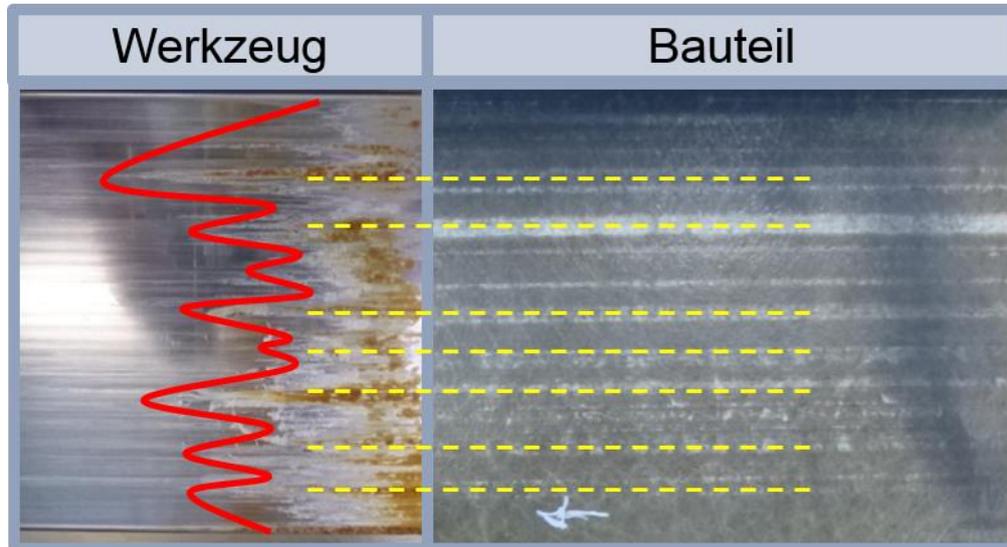


Abbildung 43: Werkzeugverschmutzungen bei geringem FFG aus Vorversuchen an Aufbau 3

Dargestellt sind die Werkzeugoberfläche des geöffneten Werkzeuges nach Versuchsende und ein dazugehöriges Bauteil (Die Höhe des Bildes entspricht der Breite des Gurtes, 120 mm). Die Positionen der weißlichen Streifen („Flächig milchige Glasfasern“) entlang des Profils stimmen mit den Positionen der Ablagerungen an der Werkzeugoberfläche überein. Diese Ablagerungen bilden sich wiederum bevorzugt an evtl. im Werkzeug vorhandenen Unebenheiten durch den Werkzeugherstellungsprozess. Aufgrund des Aufbaus (GF-Textil an der Oberfläche) sind die weißlichen Streifen („Flächig milchige Glasfasern“) als Vorstufe zu „Riefen entlang des Profils“ zu sehen.

Der gleiche Zusammenhang von FFG und relativer Häufigkeit zeigt sich für das Merkmal „**Lageneinzug in Bauteildicke**“. Die Konfigurationen 1-4 (hoher FFG) zeigen dieses Merkmal in geringerer Häufigkeit, wohingegen das Merkmal bei den Konfigurationen 5-9 bei nahezu allen Profilen auftritt. Die Ursache dieses Zusammenhangs lässt sich analog derer des Merkmals „Riefen entlang des Profils“ erklären.

Das Merkmal „**Verzug in der Decklage**“ zeigt nur bei den Konfigurationen 3+4+6+7 (25 °C Kammertemperatur) eine Ausprägung. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen der Kammertemperatur und der Entstehung des Merkmals „Verzug in der Decklage“.

Nachfolgende Abbildung 44 zeigt die relativen Häufigkeiten der Merkmale „Reinharzbereich“, „Flächig milchige Hilfsfasern“, „Freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche“ jeweils für die Konfigurationen 1-9.

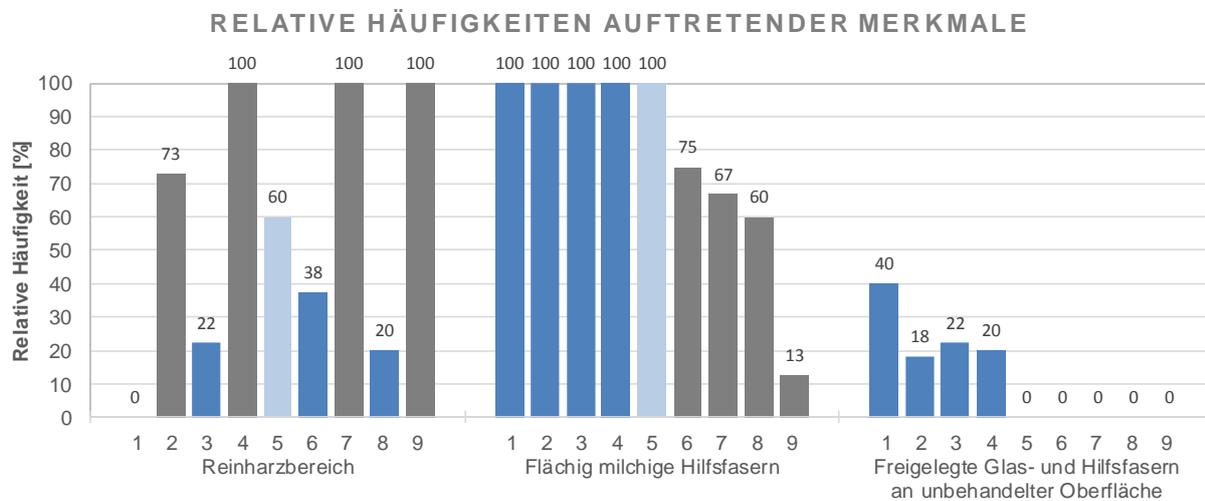


Abbildung 44: Relative Häufigkeiten der Merkmale „Reinharzbereiche“, „Flächig milchige Hilfsfasern“, „Freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehauelter Oberfläche“ an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die relativen Häufigkeiten des Merkmals **„Reinharzbereich“** zeigen eine Korrelation zum Temperaturprofil des Werkzeuges. Die Konfigurationen 1+3+6+8 wurden mit dem niedrigeren Temperaturprofil (170 °C) und die Konfigurationen 2+4+7+9 mit dem höheren Temperaturprofil (190 °C) produziert. Somit tritt das Merkmal bei geringer Werkzeugtemperatur weniger häufig auf. Dies spiegelt auch der Mittelwertsversuch mit einer Werkzeugtemperierung von 180 °C wieder. Hier liegt die relative Häufigkeit zwischen der oberen und unteren Parameterstufe.

Die Werkzeugtemperierung hat nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik keinen Einfluss auf die Ausbildung von Reinharzbereichen, da die Matrix beim Erreichen der hinteren Heizzonen bereits vernetzt ist und einen festen Aggregatzustand eingenommen hat. Zu beachten gilt es jedoch, dass sich die Matrix mit zunehmender Temperaturbeaufschlagung braun färbt. Reinharzbereiche werden daher bei der Bemusterung in Form einer Sichtprüfung nur bei starker Ausprägung oder starker Braunfärbung detektiert. Im Fall von geringeren Werkzeugtemperaturen (170 °C) kann das Merkmal „Reinharzbereiche“ folglich ebenso auftreten, wird aber aufgrund seiner Ausprägung oder Matrixfärbung nicht detektiert. Anhand der ermittelten Daten kann diesbezüglich kein eindeutiger Wirkzusammenhang festgestellt werden.

Die relativen Häufigkeiten des Merkmals **„Flächig milchige Hilfsfasern“** zeigen eine Korrelation zum FFG. Die Konfigurationen 1-4 wurden mit dem hohen FFG (Rovinganzahl 125CF) und die Konfigurationen 6-9 mit dem niedrigen FFG (Rovinganzahl 113CF) produziert. Somit tritt das Merkmal bei geringerem FFG weniger häufig auf. Aufgrund der hohen Packungsdichte des Faserpaketes bei hohem FFG werden die Hilfsfasern der textilen Halbzeuge zunehmende schlechter imprägniert. Dies zeigt sich in ihrem milchigen Erscheinungsbild.

„Freigelegte Glas- und Hilfsfasern“ treten nur bei den Konfigurationen 1-4 und somit bei hohem FFG (Rovinganzahl 125CF) auf. Dadurch ist eine signifikante Korrelation des Merkmals mit dem Formfüllgrad nachgewiesen. Zugleich korreliert die Entstehung des Merkmals „Flächig milchige Hilfsfasern“ mit dem Merkmal „Freigelegte Glas- und Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche“. Hier liegt die physikalische Erklärung für die Entstehung des Merkmals ebenso in der unzureichenden Imprägnierung der Hilfsfasern. Dies führt zu dem Schluss, dass es sich bei dem Merkmal „Flächig milchige Hilfsfasern“ um eine Vorstufe des Merkmals „Freigelegte Hilfsfasern an unbehandelter Oberfläche“ handelt. Eine Untersuchung der Profile mit Hilfe eines Kratztests bestätigt, dass „Flächig milchige Hilfsfasern“ mit geringer Krafteinwirkung freigelegt werden können.

Nachfolgende Abbildung 45 zeigt die relativen Häufigkeiten des Merkmals „Fehlstellen in oberster Matrixschicht“ für die Konfigurationen 1-9.

RELATIVE HÄUFIGKEITEN AUFTRETENDER MERKMALE

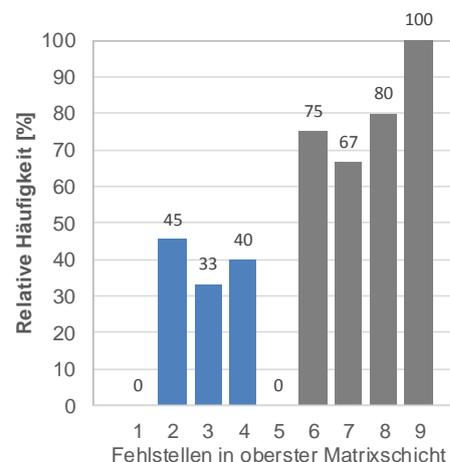


Abbildung 45: Relative Häufigkeiten des Merkmals „Fehlstellen in oberster Matrixschicht“ an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

„Fehlstellen in oberster Matrixschicht“ zeigen sich häufiger bei geringem FFG (Konfiguration 6-9). Diese Korrelation mit dem FFG zeigt sich analog bei den Merkmalen „Riefen entlang des Profils“ und „Lageneinzug in Bauteildicke“. Alle drei Merkmale stehen somit im gleichen Zusammenhang zum FFG und unterliegen in ihrer Entstehung den gleichen physikalischen Zusammenhängen.

5.3 Physikalisch-chemische und thermische Untersuchungsmethoden

Differential Scanning Calorimetry

Anhand der Ergebnisse der DSC werden Aussagen über die Glasübergangstemperaturen (T_g) bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 getroffen. Nachfolgende Abbildung 46 zeigt einen Vergleich der ermittelten Glasübergangstemperaturen für die unterschiedlichen Konfigurationen.

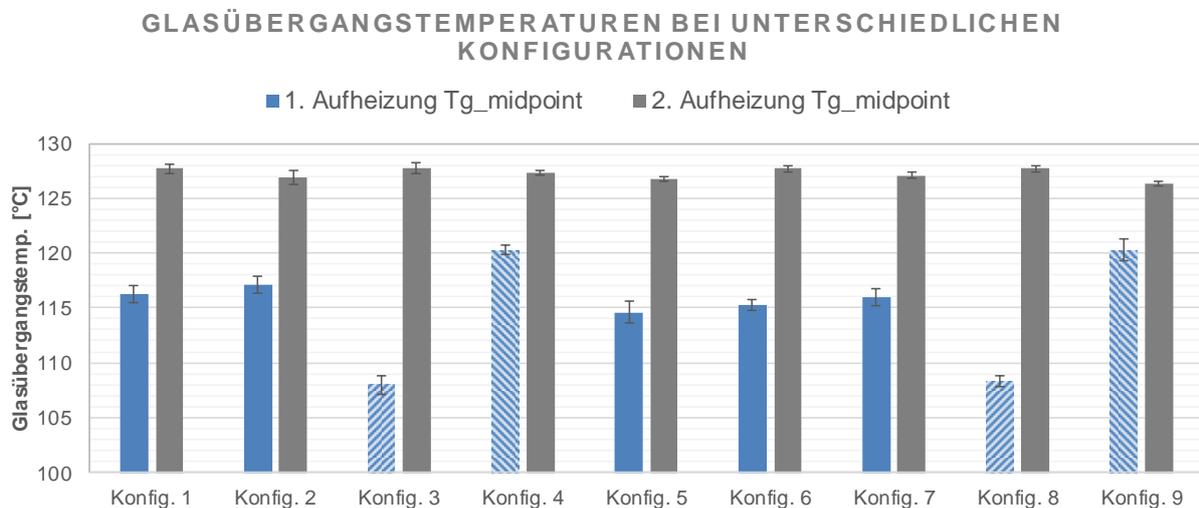


Abbildung 46: Glasübergangstemperaturen an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Werte für die zweite Aufheizung liegen alle auf gleichem Niveau und zeigen geringe Standardabweichungen. Das zeigt, dass die Zusammensetzungen der Matrix identisch sind und die Ergebnisse der Einzelprüfungen miteinander vergleichbar sind. Für die Untersuchung der Einflüsse der unterschiedlichen Konfigurationen wird der $T_{g_midpoint}$ der ersten Aufheizung herangezogen.

Konfiguration 3 und 8 sind mit 0,45 m/min und 170 °C, also der höheren Abzugsgeschwindigkeit und dem geringeren Temperaturprofil, produziert worden. Daraus resultieren für diese Konfigurationen geringere Glasübergangstemperaturen. Zurückzuführen ist diese Erkenntnis auf den geringeren Wärmeeintrag. Im Gegensatz dazu sind die Konfigurationen 4 und 9 mit 0,3 m/min und 190 °C, also der geringeren Abzugsgeschwindigkeit und dem höheren Temperaturprofil, produziert worden. Daraus resultieren für diese Konfigurationen höhere Glasübergangstemperaturen. Die Glasübergangstemperatur des Mittelwertversuches ist vergleichbar mit denen der Konfigurationen 1, 2, 6, 7. Das bedeutet, dass sich eine Erhöhung der

Abzugsgeschwindigkeit und gleichzeitige Erhöhung der Werkzeugtemperaturen in Bezug auf die Glasübergangstemperatur gegenseitig neutralisieren. Analog gilt der Zusammenhang für eine Verringerung der Abzugsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verringerung der Werkzeugtemperaturen.

Auswirkungen von Formfüllgrad und Kammertemperierung auf die Glasübergangstemperaturen können nicht festgestellt werden.

Thermogravimetrische Analyse

Basierend auf den Ergebnissen der TGA werden Schlussfolgerungen über die Auswirkungen von Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil auf die Faservolumengehalte bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 getroffen. Die Volumenanteile von anorganischen Bestandteilen und Glasfasern (beispielsweise Bestandteile des R-CF-Vlieses) liegen bei allen Konfigurationen unter 0,1 % und können somit vernachlässigt werden. Betrachtet werden allein die Volumenanteile der Kohlenstofffaser als Mittelwert des gesamten Lagenaufbaus (Gelege, R-CF-Vlies und CF-UD). Nachfolgende Abbildung 47 zeigt einen Vergleich der ermittelten Faservolumengehalte für die unterschiedlichen Konfigurationen.

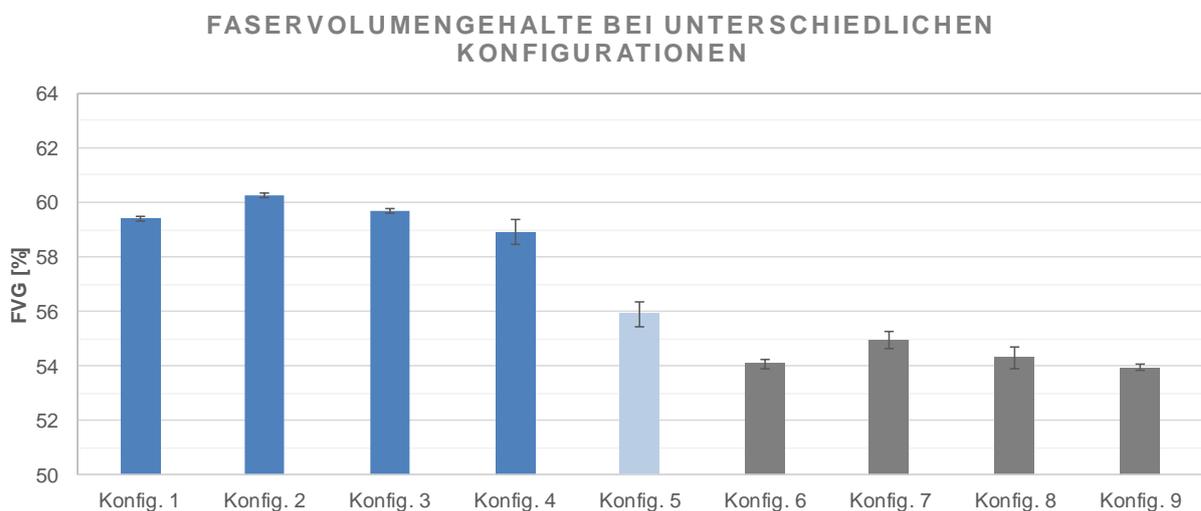


Abbildung 47: Faservolumengehalte an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Der Faservolumengehalt wird ausschließlich durch den Formfüllgrad beeinflusst. Bei geringem Formfüllgrad (Konfiguration 6-9 – 113CF) liegen die Werte im Bereich von 54-55 %, bei hohem Formfüllgrad (Konfiguration 1-4 – 125CF) liegen die Werte im Bereich von 59-60 %. Dies wird durch den Mittelwertsversuch mit 119 Rovings bestätigt. Hier liegt der Faservolumengehalt zwischen den Werten der oberen und unteren Parameterstufe.

Auswirkungen von Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperatur und Temperaturprofil auf die Faservolumengehalte können nicht festgestellt werden.

Veraschung

Mit Hilfe der Bauteilveraschung können Rückschlüsse auf die Materialbeschaffenheit im Inneren gezogen werden. Somit werden Aussagen über den Laminataufbau, die Flächengewichte der Einzellagen, den Rovingverlauf und die Merkmale in verdeckten Lagen ermöglicht. Die Veraschungsversuche wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Tobias Helm durchgeführt.

Als Ergebnis der Veraschungen an Bauteilen der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 sind zwei Korrelationen festzuhalten:

- Korrelation von Lageneinzug und Verdrängung des UD-Kerns
- Korrelation von Gasse in der Decklage und Ondulationen in verdeckten Lagen

Das Merkmal „Lageneinzug in Bauteildicke“, also ein Bereich in dem die Deck-Lage(n) durch eine Falte im Gelege in Bauteildicke eingezogen wurde(n), zeigt sich am Bauteil lediglich durch einen Streifen auf dem Profil (bei GF besser sichtbar als bei CF) der auf eine Falte hindeutet. Läuft der Streifen orthogonal auf eine Schnittkante zu, lässt sich an der Schnittfläche allenfalls eine Gelegeanhäufung feststellen. Die Bauteilveraschung zeigt jedoch einen gravierenden Einfluss auf die darunterliegenden Lagen in Form von Welligkeiten und auf die Verteilung der CF-UD-Fasern im Kern (Verdrängung bis hin zur kompletten Unterbrechung, also nicht durchgehender CF-UD-Kern) gemäß nachfolgender Abbildung 48. Der weiße Pfeil in der Abbildung kennzeichnet die Abzugsrichtung.

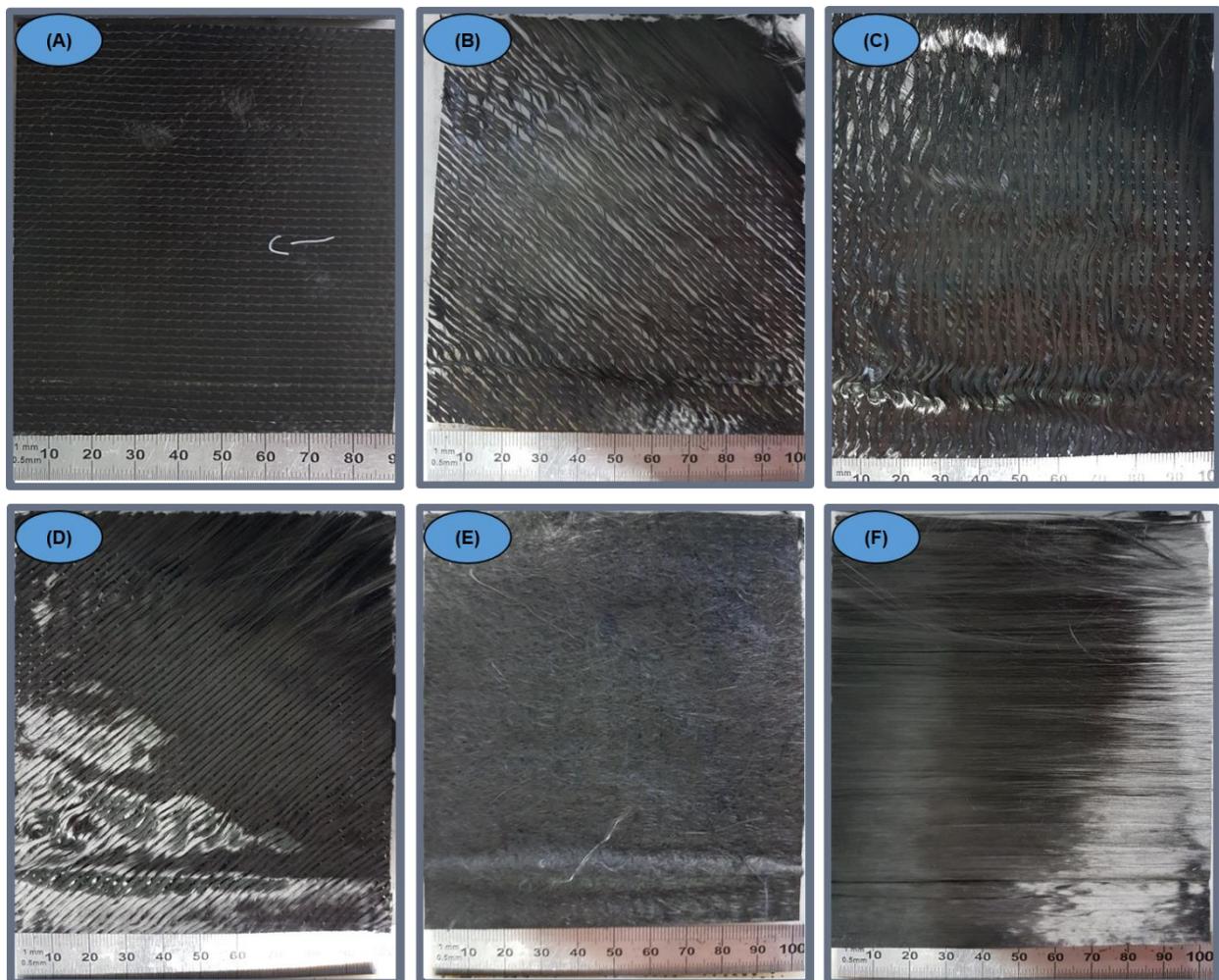


Abbildung 48: Korrelation von Lageneinzug und Verdrängung des UD-Kerns an Aufbau 6 (A: 45° unverschalt, B: 45° verschalt, C: 90° verschalt, D: -45° verschalt, E: R-CF-Vlies verschalt, F: UD-Kern verschalt)

Tritt als das Merkmal „Lageneinzug in Bauteildicke“ auf, ist sowohl die Decklage (+45°), als auch die darunterliegenden Lagen (90°, -45°, R-CF-Vlies und UD-Kern) betroffen.

Das Merkmal „Fasergassen (Gaps) im Gelege“, also ein Abstand zwischen zwei Faserbündeln im Gelege der sichtbaren Faserlage, zeigt sich am Bauteil lediglich durch die beschriebene Unregelmäßigkeit in der Decklage. Die Bauteilverdachungen haben jedoch gezeigt, dass mit einer Gasse in der Decklage (+45°) häufig auch eine Ondulation in der darunterliegenden Winkellage (90°) einhergeht. Nachfolgende Abbildung 49 zeigt die Korrelation von einer Gasse in der Decklage und Ondulationen in verdeckten Lagen. Der weiße Pfeil in der Abbildung kennzeichnet die Abzugsrichtung.

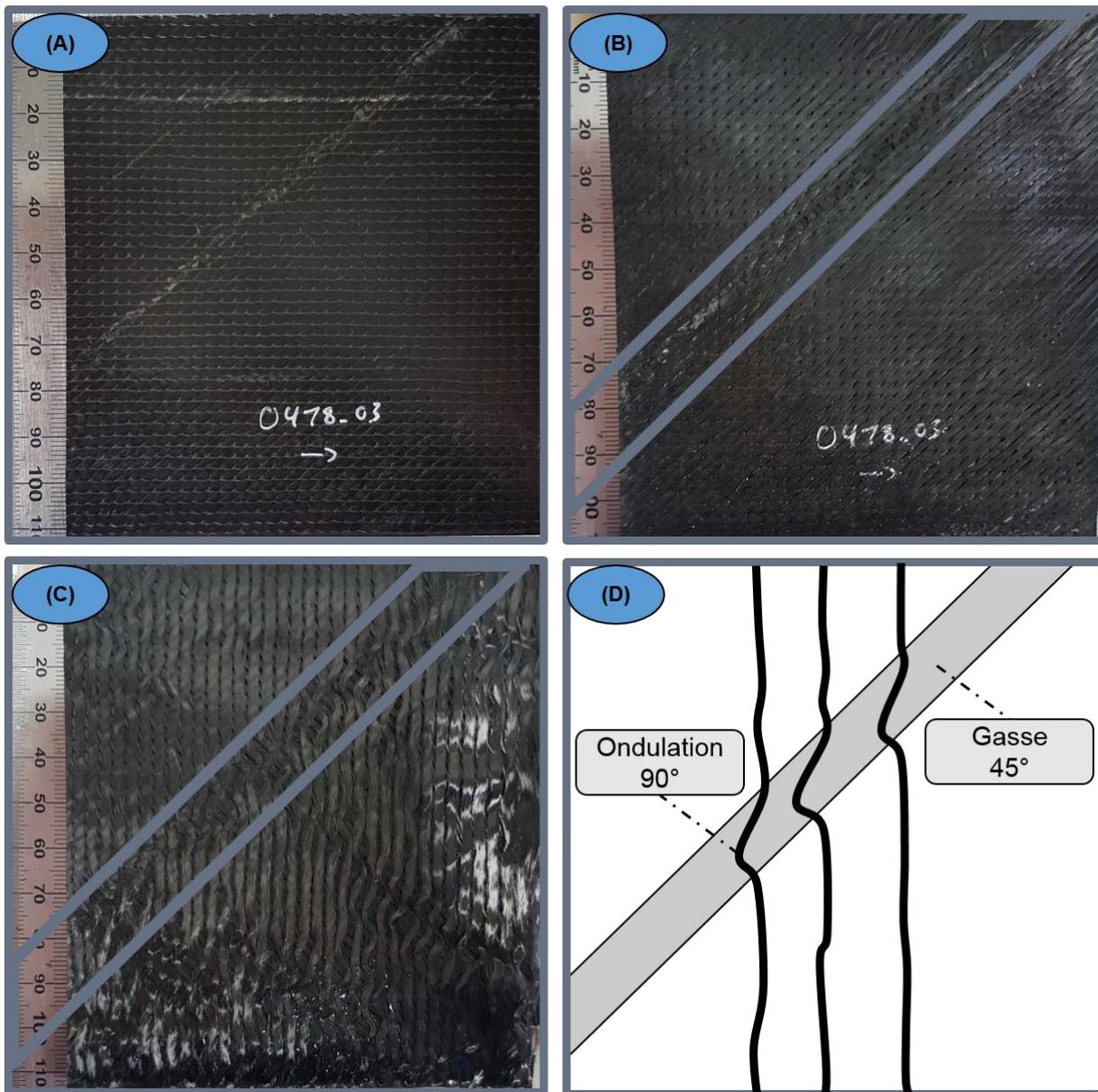


Abbildung 49: Korrelation von Gasse und Ondulationen an Aufbau 6 (A: 45° unverastet, B: 45° verastet, C: 90° verastet, D: Schema Korrelation)

Anders als bei der Korrelation von Lageneinzug und Verdrängung des UD-Kerns, bei dem +45°, 90°, -45°, R-CF-Vlies und UD-Kern betroffen sind, zeigen sich die Auswirkungen hier häufig nur in der Decklage (+45°) und der darunterliegenden Lage (90°).

5.4 Mikrostrukturelle Untersuchungsmethoden

Im Rahmen der mikrostrukturellen Untersuchungsmethoden werden Rückschlüsse auf Merkmale im Inneren der Bauteile, Faserverteilungen und Schichtdicken gezogen.

Schnitt-/Schliffbildanalyse

Mit Hilfe der Schnitt-/Schliffbildanalyse werden die Merkmale „Lageneinzug in Bauteildicke“, „Trockenstellen“ und „Brüche“ nachgewiesen und detailliert untersucht. Die Schnitt-/Schliffbildanalysen wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Tobias Helm durchgeführt.

Das Merkmal „Lageneinzug in Bauteildicke“ tritt, bei einer Gesamtheit von 32 untersuchten Profilen der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9, bei 70 % der Profile auf. Bilden sich Lageneinzüge in den oberen und unteren textilen Lagen an der gleichen Stelle, wird das Merkmal als „Doppelter Lageneinzug“ bezeichnet. Dieses Merkmal tritt bei 37 % der Gesamtheit der untersuchten Profile auf. Aufgrund der Ausdünnung/Verdrängung des UD-Kerns (siehe auch Kapitel 5.3 - Veraschung) bei einem doppelten Lageneinzug besteht die Gefahr einer Rissausprägung zwischen dem oberen und unteren Lageneinzug. Brüche in dieser Konstellation treten bei 6 % bezüglich der Gesamtheit der untersuchten Profile auf. Betrachtet man also den Fall der Existenz eines Lageneinzuges, so sind bei 54 % der Lageneinzüge doppelte Lageneinzüge zu verzeichnen. Bei der Existenz von doppelten Lageneinzügen ist wiederum in 16 % dieser Fälle ebenfalls ein Bruch vorhanden. „Lageneinzug“, „Doppelter Lageneinzug“ und „Bruch zwischen Lageneinzügen“ sind in nachfolgender Abbildung 50 dargestellt.

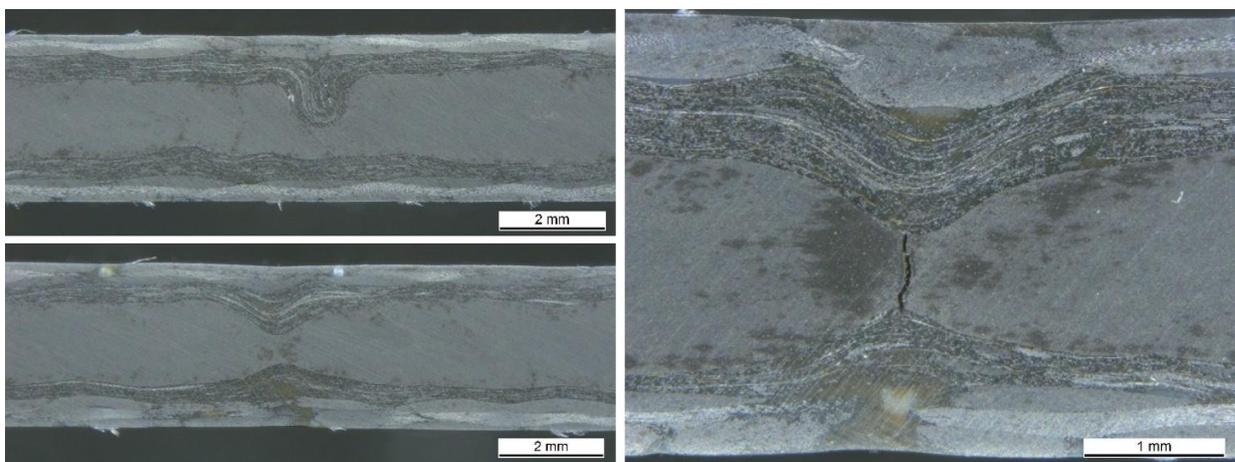


Abbildung 50: Schliffbilder von „Lageneinzug“ (links oben), „Doppelter Lageneinzug“ (links unten) und „Bruch zwischen Lageneinzügen“ (rechts) an Aufbau 6

In Bezug auf die Wechselwirkung der Prozessparameter und die Entstehung der Merkmale „Lageneinzug“, „Doppelter Lageneinzug“ und „Bruch zwischen Lageneinzügen“ zeigen die Schnitt-/Schliffbildanalysen einen Zusammenhang zum FFG. Bei den Konfigurationen 1-4 (hoher FFG, 125CF, Grundgesamtheit 16 Proben) zeigen 37,5 % das Merkmal „Lageneinzug“, 18,8 % das Merkmal „Doppelter Lageneinzug“ und keine der Proben einen Bruch zwischen einem doppelten Lageneinzug. Bei den Konfigurationen 5-9 (niedriger FFG, 113CF, Grundgesamtheit 16 Proben) zeigen alle Proben das Merkmal „Lageneinzug“, 56,3 % das Merkmal „Doppelter Lageneinzug“ und 12,5 % einen Bruch zwischen einem doppelten Lageneinzug. Die bevorzugte Entstehung dieser Merkmale bei geringem FFG lässt sich physikalisch durch einen lokal unzureichenden FVG erklären. Die textilen Halbzeuge können beispielsweise aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Drapierung oder durch Materialinhomogenitäten Falten ausbilden, die durch den unzureichenden FVG nicht gestützt werden und sich somit als Lageneinzüge ausprägen. Die textilen Halbzeuge können durch den lokal zu geringen FFG nicht flächig an den Werkzeugoberflächen gehalten werden.

Neben den Brüchen zwischen doppelten Lageneinzügen sind Brüche in den Radien der Profile zu beobachten. Nachfolgende Abbildung 51 zeigt einen solchen Bruch anhand eines Schliffbildes.

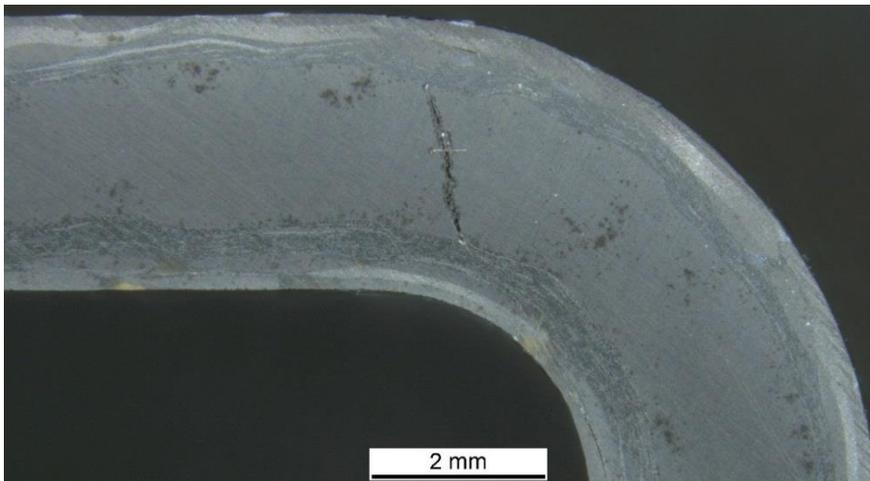


Abbildung 51: Schliffbild mit Bruch im Radius an Aufbau 6

Mögliche Ursachen für die Entstehung solcher Brüche in den Radien der Profile sind beispielsweise das Aufschrumpfen und -schwinden der Profile auf innenliegende Werkzeugoberflächen (das Innere des U-Profiles), Eigenspannungen durch die Aushärtung der Matrix oder das Einbringen von äußeren Kräften durch nachgelagerte Prozessschritte wie das Abziehen oder der Beschnitt. Mit Hilfe von Schliffbildanalysen in unterschiedlichen Entfernungen

zur Beschnittkante gemäß nachfolgendem Schema in Abbildung 52 kann die Ursache für die beobachteten Brüche in den Radien der Profile auf die Beschnittvorrichtung eingegrenzt werden.

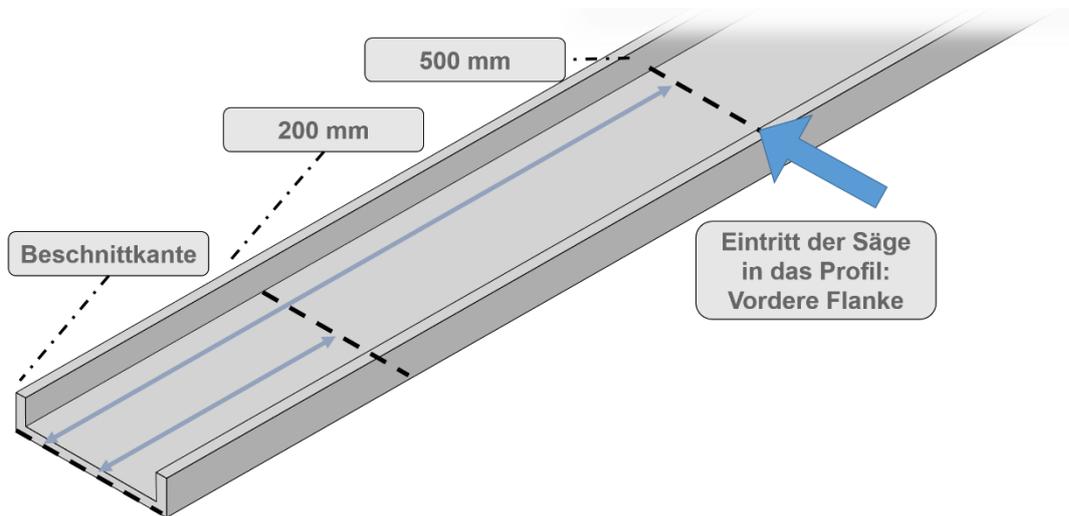


Abbildung 52: Schematische Darstellung der Probenentnahme zur Schliiffbildanalyse bei Brüchen in Radien

Die Probekörper der Schliiffanalyse werden an der Beschnittkante selbst sowie im Abstand von 200 mm und 500 mm zu dieser entnommen. Nachfolgende Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Tabelle 14: Schliiffbildanalysen in unterschiedlichen Entfernungen zur Beschnittkante

Probenentnahme an Beschnittkante																Relative Häufigkeit	
Probennr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Bruch vordere Flanke	-	x	x	x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	-	-	50 %
Bruch hintere Flanke	-	-	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	31 %
Probenentnahme 200 mm von Beschnittkante																	
Probennr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Bruch vordere Flanke	-	-	-	x	x	x	x	x	-	-	-	x	-	-	-	-	38 %
Bruch hintere Flanke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 %
Probenentnahme 500 mm von Beschnittkante																	
Probennr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Bruch vordere Flanke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 %
Bruch hintere Flanke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 %

50 % der Proben, die direkt an der Beschnittkante entnommen wurden, zeigen Brüche in den Radien zur vorderen Flanke, 31 % in den Radien zur hinteren Flanke. Hierbei charakterisiert die

vordere Flanke den Eintritt der Säge in das Profil. Bei den, in 200 mm Abstand zur Beschnittkante entnommen Proben, verringert sich die Häufigkeit der Brüche. Hier zeigen 38 % der Proben Brüche in den vorderen Flanken und keine in den hinteren Flanken. Bei einer weiteren Erhöhung des Abstandes zur Beschnittkante auf 500 mm sind weder an der vorderen, noch an der hinteren Flanke Brüche zu beobachten. Somit ist die Entstehung der Brüche in den Radien der Profile eindeutig auf die Krafteinleitung durch den Beschnittvorgang zurückzuführen.

Auswertung der Schichtdickenmessungen

Die Auswertung der Schichtdicken der textilen Halbzeuge erfolgt im Rahmen der Schliffbildanalysen. Da die Schichten des CF-Gelege und des R-CF-Vlieses im Querschnitt nicht exakt genug unterschieden werden können, werden die Schichtdicken beider Lagen zusammen gemessen. Nachfolgende Abbildung 53 zeigt die Schichtdicken aus der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 in Abhängigkeit des FFG. Dargestellt sind die untere und obere Parameterstufe (113CF, 125CF) sowie der Mittelwertsversuch (119CF). Die Anzahl der Messungen je FFG ist in Anhang I zu finden.

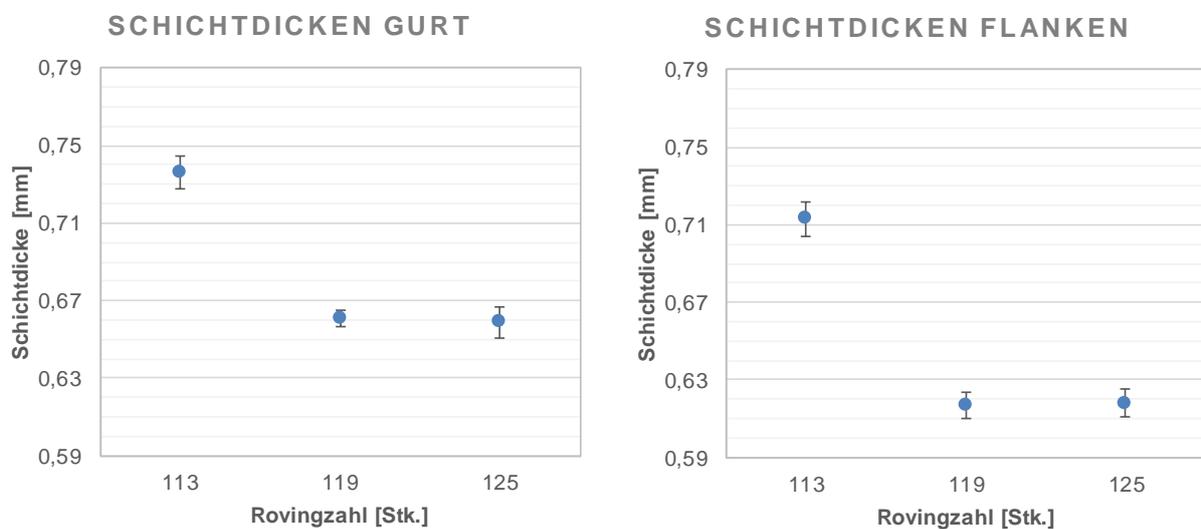


Abbildung 53: Schichtdicken der textilen Halbzeuge bei unterschiedlichen FFG an Aufbau 6 (links: Gurt, rechts: Flanken)

Der linke Graph beschreibt die Schichtdicken von CF-Gelege und R-CF-Vlies im Gurt der Profile, der rechte Graph die Schichtdicken von CF-Gelege und R-CF-Vlies in den Flanken der Profile. Die unterschiedlichen Schichtdicken für Gurt und Flanken, bei gleichem FFG, sind auf eine ungleiche Verteilung der Rovings über den Profilquerschnitt zurückzuführen. Sowohl die Auswertungen im Gurt, als auch in den Flanken, zeigen jedoch eine deutliche Verringerung der Schichtdicken mit steigendem FFG. Bei einem FFG von 119CF ist das Erreichen einer Art

Grenzschichtdicke erkennbar. Um diesen Sachverhalt statistisch zu belegen, werden weitere Schichtdickenmessungen aus den Vorversuchen herangezogen.

Nachfolgende Abbildung 54 zeigt die Schichtdicken aus Vorversuchen an Aufbau 2 in Abhängigkeit des FFG. Dargestellt sind steigende Rovinganzahlen, beginnend bei 230GF bis 285GF. Die Anzahl der Messungen je FFG ist in Anhang I zu finden.

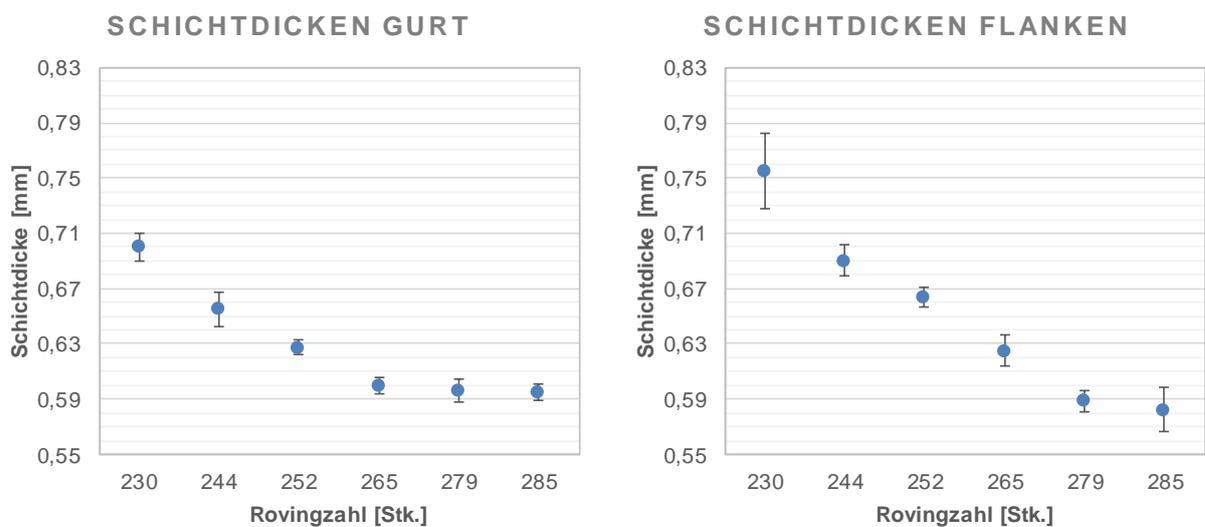


Abbildung 54: Schichtdicken der textilen Halbzeuge bei unterschiedlichen FFG aus Vorversuchen an Aufbau 2 (links: Gurt, rechts: Flanken)

Der linke Graph beschreibt die Schichtdicken des GF-CFM im Gurt der Profile, der rechte Graph die Schichtdicken des GF-CFM in den Flanken der Profile. Die unterschiedlichen Schichtdicken für Gurt und Flanken bei gleichem FFG, analog der eigentlichen Versuchsreihe, sind auf eine ungleiche Verteilung der Rovings über den Profilquerschnitt zurückzuführen. Beide Graphen zeigen auch hier eine Korrelation zwischen dem FFG und der Schichtdicke des GF-CFM. Mit steigender Rovinganzahl fällt die Schichtdicke mit asymptotischem Verlauf. Gesamthaft betrachtet verringert sich die Schichtdicke im Gurt um ca. 0,1 mm durch Zuführen von 55GF und erreicht bereits bei 265GF den Sättigungsbereich. Weitere Schlibfbildanalysen, wie in nachfolgender Abbildung 55 dargestellt, haben gezeigt, dass bei einem FFG von 285GF und darüber hinaus von einer Beeinflussung der Imprägnierqualität auszugehen ist.

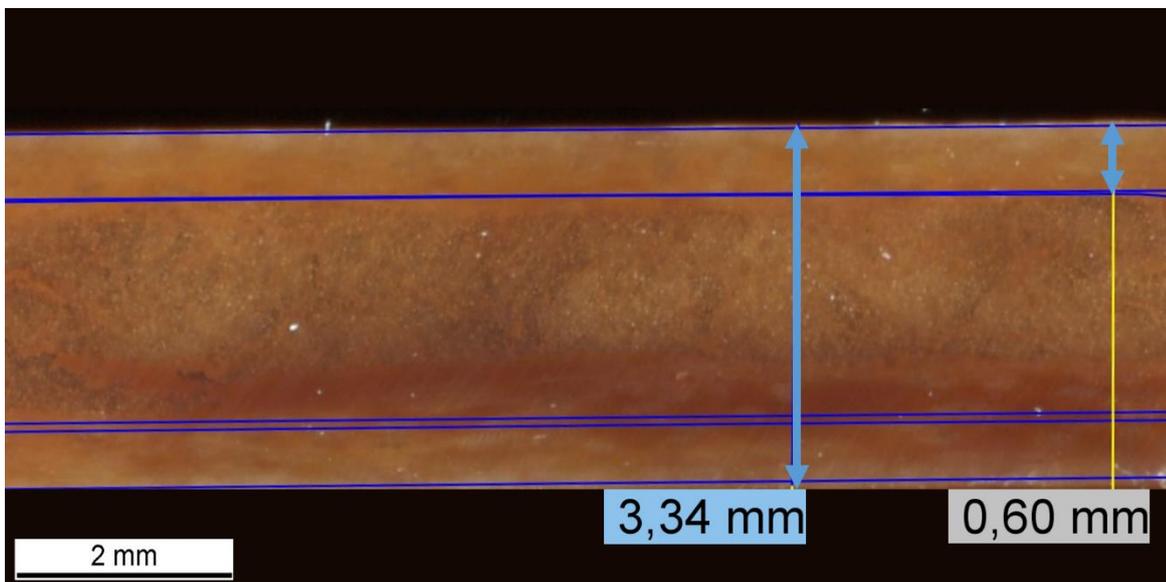


Abbildung 55: Schliffbild an Aufbau 2 mit 285GF

Das dargestellte Schliffbild zeigt den Aufbau 2 im Bereich des Gurtes mit einem FFG von 285GF. Anhand der unterschiedlichen Färbungen innerhalb des UD-Kerns ist eine verminderte Imprägnierqualität festzustellen. Somit ist die Schichtdickenmessung ein wichtiger Indikator für den maximal erreichbaren FFG im Zusammenhang mit der Imprägnierqualität.

Insbesondere bei neuen Werkzeugen und Profilgeometrien stellt sich die Frage nach der Anzahl benötigter Spulen für den Prozessstart. Wird die Anzahl zu gering gewählt, kommt es zu starkem Voreilen der Matrix beim Prozessstart. Dadurch wird das Werkzeug bereits zu Beginn des Prozesses stark verschmutzt und ein vorzeitiger Prozessabbruch ist möglich. Weiterhin führt eine zu geringe Rovinganzahl zu einer ungenügenden Abdichtung der Injektionskammer. Die Matrix tritt am Werkzeugeingang aus und der Druck in der Injektionskammer reicht nicht aus, um den Aufbau vollständig zu imprägnieren (siehe auch Kapitel 5.1 Prozessdatenauswertung). Wird die Rovinganzahl hingegen zu hoch gewählt, steigt die Abzugskraft stark an (siehe auch Abbildung 40 in Kapitel 5.1 Prozessdatenauswertung).

Ist die Schichtdicke der textilen Halbzeuge bekannt (z.B. durch oben aufgeführte Schichtdickenmessungen aus Vorversuchen mit den gewünschten textilen Halbzeugen), kann die benötigte Spulenzahl für die UD-Schicht näherungsweise über den Filamentdurchmesser und den Ziel-FVG in der UD-Schicht berechnet werden. Unter Annahme konstanter Schichtdicke über den Querschnitt, ideal runder Filamentquerschnitte und vollständiger Imprägnierung berechnet sich die Anzahl benötigter Spulen näherungsweise gemäß nachfolgender Gleichungen (6-10).

$$\varphi_{UD} = \frac{V_F}{V_{UD}} = \frac{A_F \cdot l}{A_{UD} \cdot l} = \frac{A_{Rov} \cdot n_{Spul}}{A_{UD}} \quad (6)$$

φ_{UD} = Faservolumengehalt der UD – Schicht

V_F = Volumen der Fasern in der UD – Schicht

V_{UD} = Volumen der UD – Schicht

A_F = Fläche der Fasern im Querschnitt der UD – Schicht

A_{UD} = Querschnittsfläche der UD – Schicht

l = Länge des Pultrudates

A_{Rov} = Querschnittsfläche eines Rovings

n_{Spul} = Anzahl der Spulen

Eine Umstellung der Gleichung nach der Anzahl der Spulen ergibt:

$$n_{Spul} = \frac{A_{UD}}{A_{Rov}} \cdot \varphi_{UD} \quad (7)$$

$$A_{UD} = A_{Verbund} - A_{Tex} = b \cdot (h - 2 \cdot t_{Tex}) \quad (8)$$

$$A_{Rov} = A_{Fil} \cdot n_{Fil} = \left(\frac{d_{Fil}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot n_{Fil} \quad (9)$$

$$n_{Spul} = \frac{b \cdot (h - 2 \cdot t_{tex})}{\left(\frac{d_{Fil}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot n_{Fil}} \cdot \varphi_{UD} \quad (10)$$

$A_{Verbund}$ = Querschnittsfläche des Verbundes

A_{Tex} = Querschnittsfläche der textilverstärkten Lagen

b = Breite des Querschnitts

h = Höhe des Querschnitts

t_{Tex} = Schichtdicke der textilverstärkten Lagen (oben + unten)

A_{Fil} = Querschnittsfläche eines Filaments

n_{Fil} = Anzahl der Filamente je Roving

d_{Fil} = Filamentdurchmesser

Aufgrund fehlender Werte für den FVG der UD-Schicht kann die Genauigkeit dieser näherungsweise Berechnung jedoch nicht überprüft werden.

Alternativ lässt sich mit den dargestellten Gleichungen, unter Annahme einer Anzahl von Spulen, näherungsweise der Ziel-FVG berechnen. Durch Erweiterung der Gleichungen um zusätzliche

Faktoren, wie zu produzierende Lauflänge bei gewählter Abzugsgeschwindigkeit (alternativ Betriebszeit), Längengewicht der Rovings, Dichte der Matrix und Material- und Halbzeugpreise lassen sich die benötigten Material- und Halbzeuggewichte und deren Kosten abschätzen.

Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung wird einerseits zur Auswahl der Bauteile für die mechanischen Prüfungen herangezogen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass nur Bauteilbereiche mit ausreichender Bauteilqualität mechanisch geprüft werden. Weiterhin gibt die Ultraschalluntersuchung Auskunft über die Laminatqualität im Inneren der Bauteile. Zur eindeutigen Identifikation von Merkmalen ist eine Kombination der Ergebnisse mit anderen Prüfmethode, wie beispielsweise der Bemusterung, jedoch unerlässlich. Somit stellen die im Folgenden dargestellten Ergebnisse eine Verifizierung vorheriger Erkenntnisse dar. Die Ultraschallprüfungen wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Tobias Helm durchgeführt.

Nachfolgende Abbildung 56 zeigt das Ergebnis der Ultraschallprüfung eines Bauteils aus Konfiguration 1 der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6. Die Randbereiche der Bauteile werden bei allen folgenden Auswertungen ausgeschlossen, da an diesen, aufgrund von Beugung des Schalls an Radien und Kanten, fehlerhafte Werte ermittelt werden (1). Der Scankopf fährt zwei Bahnen in Längsrichtung ab. Dabei kommt es zu einer geringfügigen Überschneidung in der Mitte der Bauteile, aufgrund derer ebenso fehlerhafte Werte ermittelt werden können (2). Ebenfalls erkennbar sind blaue Bereiche, die durch die Beschriftung der Bauteile begründet sind (3).

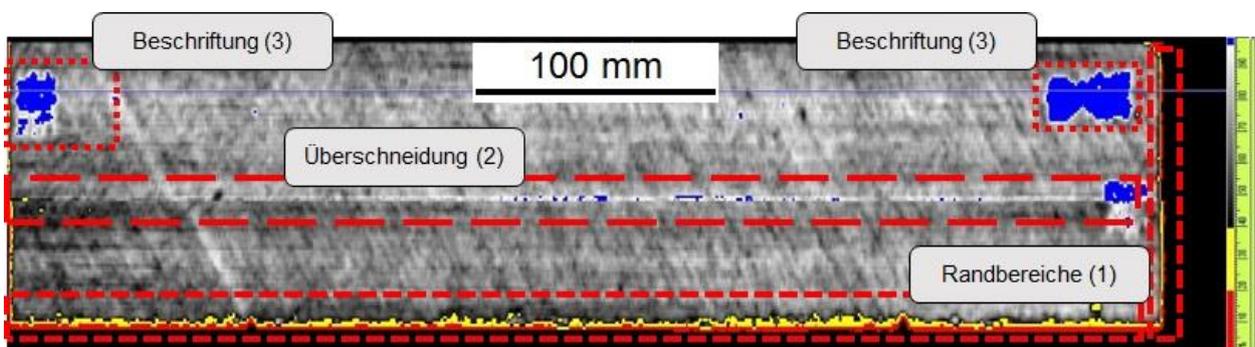


Abbildung 56: Ultraschallprüfung an Konfiguration 1 der Parameterstudie

Aufgrund der Sägeteranz unterscheiden sich die Längen der Profile und damit deren Fläche geringfügig. Daher erfolgt die Auswertung auf Basis der relativen Häufigkeiten der farbigen Pixel. Werden, wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, mehr als 80 % des emittierten Schallpegels nach Reflektion an der Rückwand des Bauteils wieder am Prüfkopf detektiert, sind die Pixel grau dargestellt. Bis hin zu 40 % verdunkeln sich die Pixel und werden schwarz dargestellt. Unter 40 %

werden die Pixel gelb dargestellt und es ist von einem Merkmal auszugehen. Unter 20 % ist die Ausprägung des Merkmals deutlich erhöht und die Pixel werden rot dargestellt. Blaue Bereiche kennzeichnen die Beschriftung der Bauteile und sind vernachlässigbar. Nachfolgende Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der Ultraschallprüfung an Bauteilen der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9 in Form von relativen Häufigkeiten detektierter Pixelfarben.

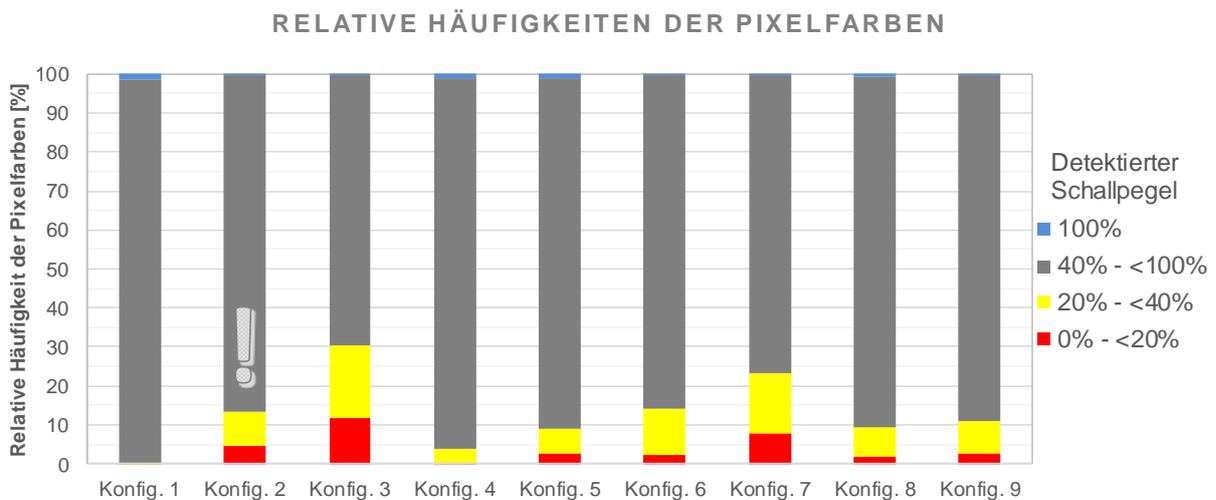


Abbildung 57: Ultraschallprüfung an Aufbau 6 – Relative Häufigkeiten detektierter Pixelfarben für die unterschiedlichen Konfigurationen

Zu beachten ist, dass die Werte für Konfiguration 2 aufgrund leicht tordierter Bauteile nicht repräsentativ sind. Diese Torsion der Profile prägt sich diagonal über die Bauteillänge aus und führt zu fehlerhaften Messwerten, die ohne Torsion geringer wären. Die Konfigurationen 3, 6 und 7 zeigen deutlich mehr gelbe und rote Bereiche mit Merkmalsausprägungen (Konfiguration 2 vernachlässigt). Beim Abgleich dieser Werte mit den Erkenntnissen der Bemusterung in Kapitel 5.2 wird deutlich, dass genau diese Konfigurationen das Merkmal „Verzug in der Decklage“ aufweisen. Dieses Merkmal ist gekennzeichnet durch eine großflächige Verschiebung der textilen Halbzeuge im Gurt der Profile und sorgt für starke Inhomogenität in der Decklage, einhergehend mit einer Verringerung des detektierbaren Schallpegels. Die bei der Bemusterung festgestellte Korrelation von Kammertemperatur und der Entstehung des Merkmals „Verzug in der Decklage“ wird somit durch die Ultraschallprüfung bestätigt.

Computertomographie

Die Computertomographie dient zur Analyse der Bauteilqualität hinsichtlich Merkmale im Inneren der Bauteile. Zu den, mit Hilfe der Computertomographie detektierbaren Merkmalen zählen Gassen, Ondulationen in den Einzellagen ($\pm 45^\circ$ -Lagen, 90° -Lagen, UD-Kern), Brüche, Lufteinschlüsse und Reinharzbereiche. Aufgrund der Zeitintensität dieser Untersuchung werden nur zwei bis vier Proben je Parameterkonfiguration (Gesamtheit 24 Proben) untersucht. Die Ergebnisse bieten daher keine statistische Sicherheit, ermöglichen jedoch Aussagen über die allgemeine Bauteilqualität hinsichtlich Merkmale im Inneren der Bauteile und approximative Erkenntnisse zu den Zusammenhängen von Merkmalen und Prozessparametern. Die Computertomographie wurde im Rahmen einer Studienarbeit von Tobias Helm durchgeführt.

Zehn der 24 untersuchten Proben wurden mit dem niedrigen FFG (113CF) hergestellt, vier Proben stammen aus dem Mittelwertsversuch und zehn wurden mit dem hohen FFG (125CF) hergestellt. Zu beobachten ist, dass 40 % der Proben mit hohem FFG und 100 % der Proben mit niedrigem FFG starke Ondulationen in den 90° -Lagen aufweisen. Demnach scheint eine Korrelation zwischen dem Parameter FFG und der Ausprägung des Merkmals „Ondulation in einer 90° -Lage“ vorzuliegen. Die Ursachen für die Entstehung der Ondulationen in Zusammenhang mit dem FFG können anhand der bereits diskutierten Erkenntnisse aus der Bemusterung (siehe Kapitel 5.2) abgeleitet werden. Die in der Bemusterung ausgewerteten Häufigkeiten der Merkmale „Riefen entlang des Profils“ und „Lageneinzug in Bauteildicke“ resultieren aus einem zu geringen Gegendruck durch das Faserpaket bei geringem FFG. Es wird also nicht genug Druck auf die äußeren Lagen aufgebaut, um diese flächig an der Werkzeugoberfläche zu halten. Ondulationen in den 90° -Lagen, beispielsweise durch Faltenbildung oder Stauchen der textilen Halbzeuge, sind durch den gleichen Zusammenhang begründet.

Die CT-Untersuchungen zeigen ebenfalls die bereits bei der Veraschung aufgezeigte Korrelation von „Gasse in der Decklage“ und „Ondulationen in verdeckten Lagen“. Zwei der vierundzwanzig Proben weisen Gassen in einer $\pm 45^\circ$ -Lage“ bei gleichzeitiger Ondulation der anliegenden 90° -Lage auf. Dies bestätigt somit die Erkenntnisse der Veraschung.

5.5 Mechanische Prüfungen

Zugprüfung

Die Zugversuche in 0°-Richtung liefern Ergebnisse zu E-Moduli, Zugfestigkeiten und Zugdehnungen bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9. Nachfolgende Abbildung 58 zeigt einen Vergleich der ermittelten E-Moduli für die unterschiedlichen Konfigurationen.

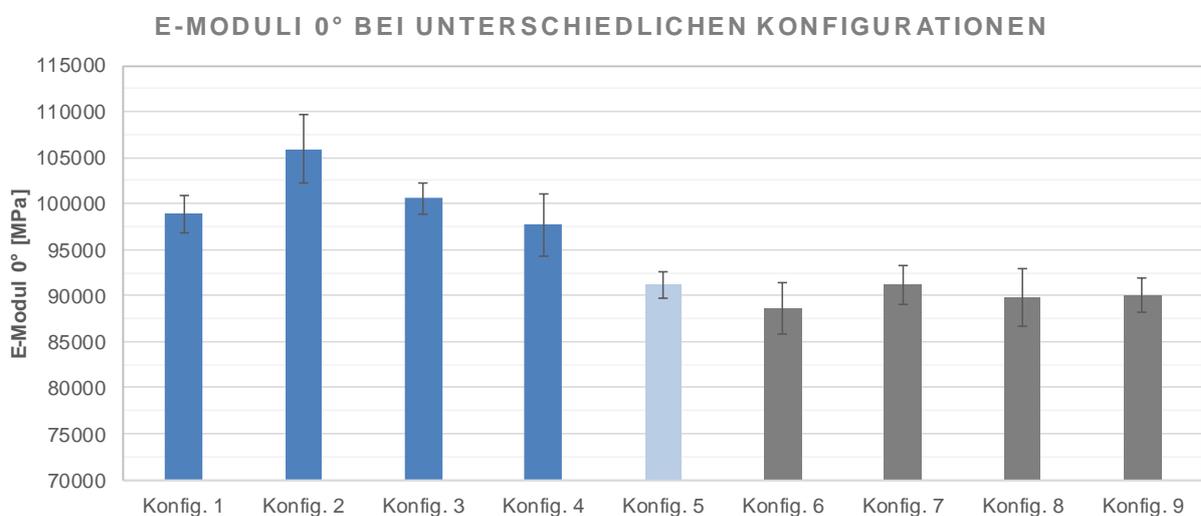


Abbildung 58: Zugprüfung 0° – E-Moduli an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der E-Moduli betragen im Mittel ca. 5 %. Analog zu den Ergebnissen der Faservolumengehaltsbestimmung wird der E-Modul ausschließlich durch den Formfüllgrad beeinflusst. Bei geringen Formfüllgraden (Konfiguration 6-9 – 113CF) sind geringere E-Moduli festzustellen als bei hohen Formfüllgraden (Konfiguration 1-4 – 125CF). Diese Abhängigkeit des E-Moduls vom Formfüllgrad lässt sich mathematisch, mit Hilfe der „einfachen Mischungsregel (rule of mixture)“, belegen. Unter der vereinfachenden Annahme, dass nur die UD-Schicht betrachtet wird und der Einfluss von anderen Lagen (nicht in Belastungsrichtung) vernachlässigt wird, ergibt sich der E-Modul des Verbundes in 0°-Richtung gemäß nachfolgender Gleichung (11) [Sch07, Wed13].

$$E_{\parallel \text{Verbund}} = E_{\parallel \text{Faser}} \cdot \varphi + E_{\text{Matrix}} \cdot (1 - \varphi) \quad (11)$$

$E_{\parallel \text{Verbund}}$ = E – Modul des Verbundes in 0° – Richtung

$E_{\parallel \text{Faser}}$ = E – Modul der Faser in 0° – Richtung

φ = Faservolumengehalt

E_{Matrix} = E – Modul der Matrix

Der E-Modul der Kohlenstofffaser in Faserrichtung beträgt 240-250 GPa, der E-Modul der Matrix beträgt 2700-3100 MPa, d.h. der E-Modul der Faser beträgt in etwa das 75-100 fache des E-Moduls der Matrix und wird zudem mit dem Faservolumengehalt (> 0,54) multipliziert. Somit dominiert der E-Modul der Faser den E-Modul des Verbundes in 0°-Richtung.

Nachfolgende Abbildung 59 zeigt einen Vergleich der ermittelten Zugfestigkeiten für die unterschiedlichen Konfigurationen.

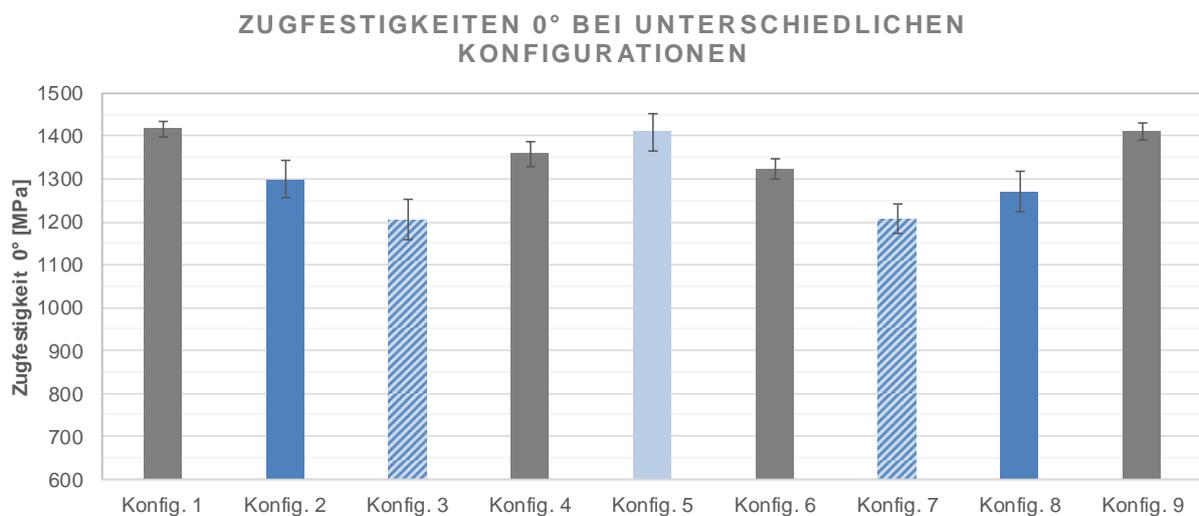


Abbildung 59: Zugprüfung 0° – Zugfestigkeiten an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der Zugfestigkeiten betragen im Mittel ca. 5 %. Im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus der Analyse der E-Moduli lässt sich hier kein wesentlicher Einfluss der Formfüllgrade auf die Zugfestigkeiten ermitteln. Die Konfigurationen 2, 3, 7, 8 sind mit der höheren Abzugsgeschwindigkeit (0,45 m/min) produziert worden. Bei diesen Konfigurationen sind die Zugfestigkeiten geringer als bei den Konfigurationen mit 0,3 m/min Abzugsgeschwindigkeit. [Bla99] hat diesen Zusammenhang bereits für Festigkeitswerte aus dem Biegeversuch an Glasfaserpultrudaten ohne Querverstärkung mit UP-Matrix erkannt und mit einem geringeren Aushärtegrad begründet. Mit den Ergebnissen aus diesen Versuchsreihen lässt

sich der Zusammenhang auf einen Verbund aus CF und EP-Matrix übertragen. Insbesondere die Konfigurationen 3 und 7 (zusätzlich geringe Kammertemperatur 25 °C) zeigen die geringsten Zugfestigkeiten und bestätigen somit die Begründung durch geringere Aushärtegrade. Auswirkungen des Temperaturprofils auf die Zugfestigkeiten können hingegen nicht festgestellt werden.

Nachfolgende Abbildung 60 zeigt einen Vergleich der ermittelten Zugdehnungen für die unterschiedlichen Konfigurationen.

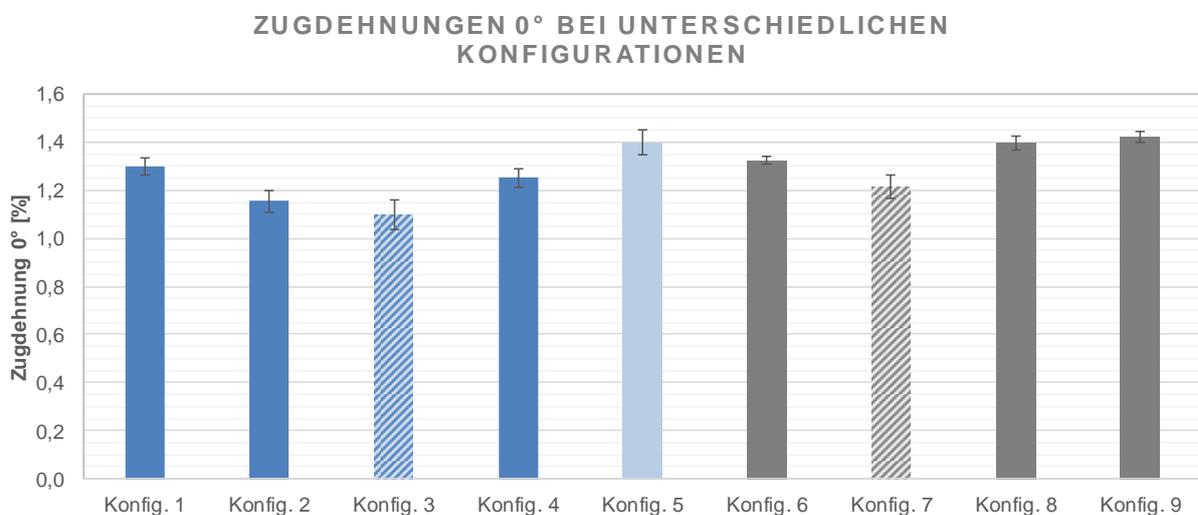


Abbildung 60: Zugprüfung 0° – Zugdehnungen an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der Zugdehnungen betragen im Mittel ca. 6 %. Verglichen mit dem Einfluss des Formfüllgrades auf die E-Moduli zeigt sich hier ein umgekehrter Zusammenhang. Die Konfigurationen 1 bis 4 mit hohem Formfüllgrad (125CF) zeigen geringere Zugdehnungen als die Konfigurationen 6 bis 9 (113CF). Zurückzuführen ist dies auf die bereits erläuterten unterschiedlichen E-Moduli von Verstärkungsfaser und Matrix. Übereinstimmend mit den Zugfestigkeits-Untersuchungen weisen auch hier die Konfigurationen 3 und 7 (zusätzlich geringe Kammertemperatur 25 °C und hohe Abzugsgeschwindigkeit 0,45 m/min), im Vergleich zu den Konfigurationen mit jeweils gleichem Formfüllgrad, die geringsten Zugdehnungen auf. Analog zu den Zugfestigkeitswerten können auch hier keine wesentlichen Auswirkungen des Temperaturprofils auf die Zugdehnungen festgestellt werden.

Zugversuche in 90°-Richtung wurden nicht durchgeführt, da die Profilbreite nicht für normgerechte Probekörper ausreicht.

Biegeprüfung

Die Biegeversuche (4PB) in 0° und 90°-Richtung liefern Erkenntnisse zu E-Moduli, Festigkeiten und Dehnungen bei der eigentlichen Parameterstudie an Aufbau 6 mit den Konfigurationen 1-9. Nachfolgende Abbildung 61 zeigt einen Vergleich der ermittelten E-Moduli in 0°-Richtung für die unterschiedlichen Konfigurationen.

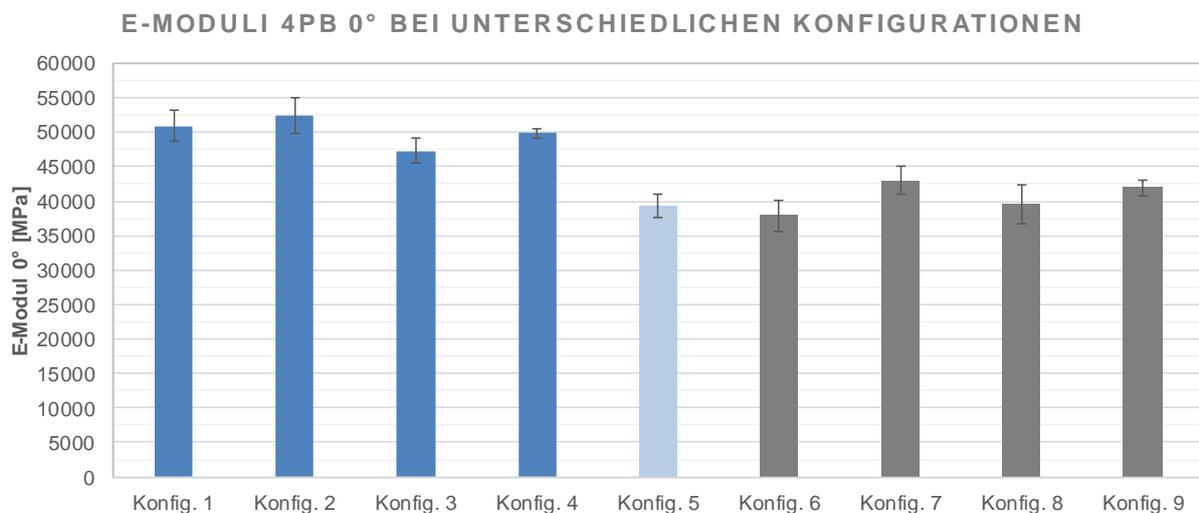


Abbildung 61: Biegeprüfung 0° – E-Moduli an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der E-Moduli betragen im Mittel ca. 9 %. Analog zur Zugprüfung sind die E-Moduli der Biegeprüfung stark faserdominiert. Die Konfigurationen mit geringen Formfüllgraden (Konfiguration 6-9 – 113CF) zeigen geringere E-Moduli als die Konfigurationen mit hohen Formfüllgraden (Konfiguration 1-4 – 125CF). Auswirkungen von Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperatur und Temperaturprofil auf die E-Moduli in 0°-Richtung können nicht festgestellt werden.

Nachfolgende Abbildung 62 zeigt einen Vergleich der ermittelten Festigkeiten in 0°-Richtung für die unterschiedlichen Konfigurationen.

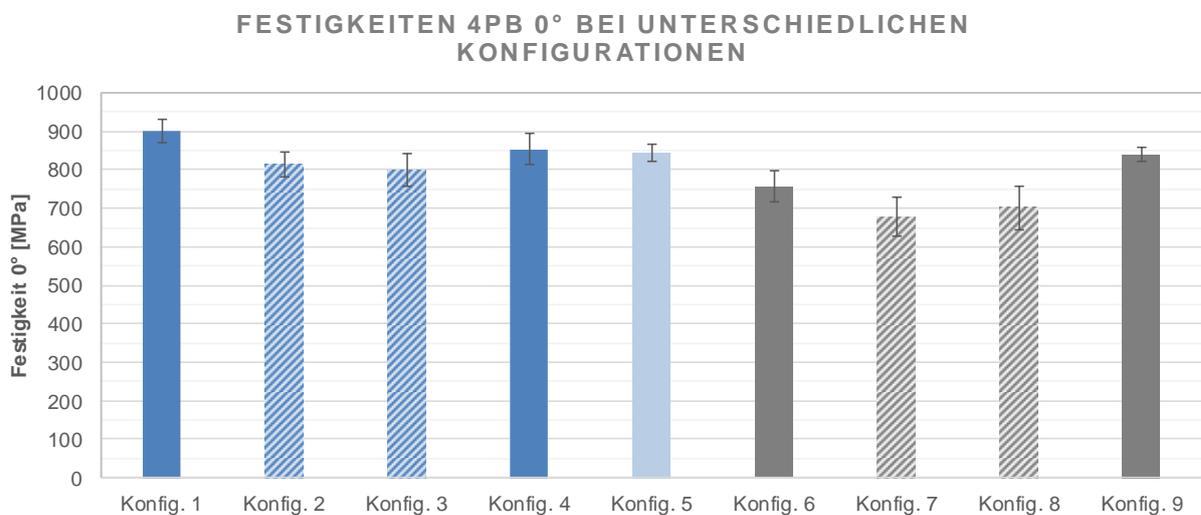


Abbildung 62: Biegeprüfung 0° – Festigkeiten an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der Festigkeiten betragen im Mittel ca. 9,5 %. Auch hier ist die Abhängigkeit vom Formfüllgrad (hoher Formfüllgrad – hohe Festigkeit) tendenziell erkennbar. Weiterhin zeigen die Konfigurationen 2, 3, 7, 8 (höhere Abzugsgeschwindigkeit 0,45 m/min) geringere Festigkeiten im Vergleich zu den Konfigurationen mit jeweils gleichem Formfüllgrad, aber geringerer Abzugsgeschwindigkeit (0,3 m/min). Wie bereits bei den Zugfestigkeiten beschrieben, gilt der Zusammenhang von [Bla99] (geringere Biegefestigkeiten bei höheren Abzugsgeschwindigkeiten an Glasfaserpultrudaten ohne Querverstärkung mit UP-Matrix) auch für die Kombination CF und EP-Matrix. Auswirkungen von Kammertemperierung und Temperaturprofil auf die Festigkeiten in 0°-Richtung können nicht festgestellt werden. Nachfolgende Abbildung 63 zeigt einen Vergleich der ermittelten Dehnungen in 0°-Richtung für die unterschiedlichen Konfigurationen.

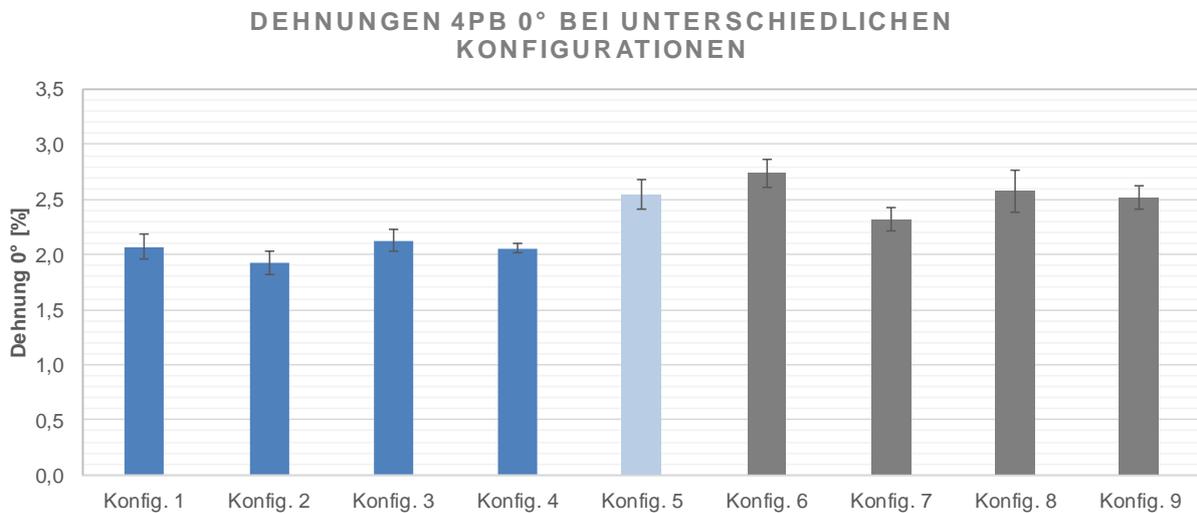


Abbildung 63: Biegeprüfung 0° – Dehnungen an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der Dehnungen betragen im Mittel ca. 10 %. Verglichen mit dem Einfluss des Formfüllgrades auf die E-Moduli zeigt sich, analog zu den Dehnungen der Zugprüfung, hier ein umgekehrter Zusammenhang. Die Konfigurationen 1 bis 4 mit hohem Formfüllgrad (125CF) zeigen geringere Dehnungen als die Konfigurationen 6 bis 9 (113CF). Zurückzuführen ist dies ebenfalls auf die bereits erläuterten unterschiedlichen E-Moduli von Verstärkungsfaser und Matrix. Auswirkungen von Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil auf die Dehnungen in 0°-Richtung können nicht festgestellt werden. Nachfolgende Abbildung 64 zeigt einen Vergleich der ermittelten E-Moduli in 90°-Richtung für die unterschiedlichen Konfigurationen.

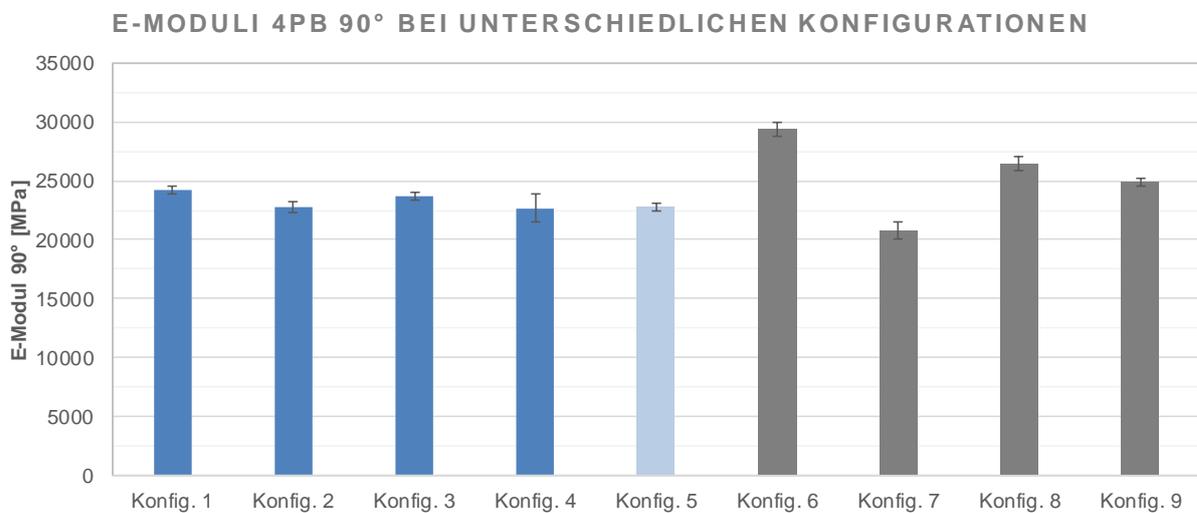


Abbildung 64: Biegeprüfung 90° – E-Moduli an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der E-Moduli betragen im Mittel ca. 4,5 %. Aus der Verteilung der Mittelwerte kann kein signifikanter Zusammenhang gefolgert werden. Zu erwarten gewesen wäre ein geringer E-Modul bei Konfigurationen mit geringerem Formfüllgrad (Konfiguration 6 bis 9), da sich der Anteil des UD-Kerns am Bauteilquerschnitt verringert und zu einer größeren Schichtdicke der R-CF- und Gelege-Lagen, mit Faserorientierungen ungleich der 0°-Richtung, führt. Das bedeutet wiederum einen geringeren Steiner-Anteil, da die textilen Lagen (in Belastungsrichtung) näher Richtung neutrale Faser rücken.

Nachfolgende Abbildung 65 zeigt einen Vergleich der ermittelten Festigkeiten in 90°-Richtung für die unterschiedlichen Konfigurationen.

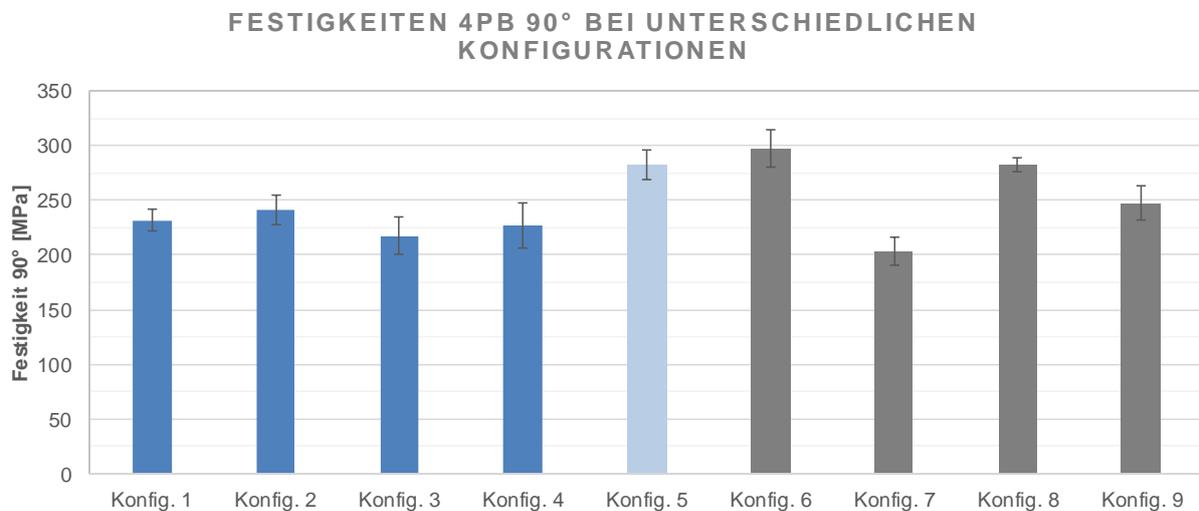


Abbildung 65: Biegeprüfung 90° – Festigkeiten an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Die Standardabweichungen der Festigkeiten betragen im Mittel ca. 12 %. Analog zu den E-Moduli der Biegeprüfung in 90°-Richtung kann aus der Verteilung der Festigkeitswerte kein signifikanter Zusammenhang gefolgert werden. Bei den Dehnungen in 90°-Richtung können ebenfalls keine signifikanten Unterschiede durch die Parametervariationen festgestellt werden.

5.6 Erkenntnisse aus den Prozessverläufen

Neben den bereits diskutierten Erkenntnissen aus den Prozessdaten, der Bemusterung, den physikalisch-chemischen und thermischen Untersuchungen, den mikrostrukturellen Untersuchungen und den mechanischen Prüfungen, werden im Folgenden zusätzliche Erkenntnisse aus den Prozessverläufen diskutiert. Hierbei liegt der Fokus auf kritischen Prozesszuständen wie beispielsweise dem Anfahrprozess (Prozessstart) und dem Wechsel von textilen Halbzeugen im laufenden Prozess.

Beim Anfahrprozess werden zunächst nur die trockenen Rovings im offenen Werkzeug platziert und dieses anschließend geschlossen. Die textilen Halbzeuge werden im laufenden Prozess zugeführt. Der Zeitpunkt der Zuführung textiler Halbzeuge in Relation zum Injektionsstart beim Anfahrprozess ist hierbei von Bedeutung.

Nachfolgende Abbildung 66 zeigt schematisch die unterschiedlichen Varianten für die Wechselwirkung von Textilzuführung, Injektionsstart und Fließfront der Matrix (Abbildung nicht maßstabsgetreu). Zur Veranschaulichung wird die Angussgeometrie vereinfacht als Punktanguss in der Mitte eines Flachprofils dargestellt. Weiterhin werden evtl. an den Profilrändern

auftretenden Effekte vernachlässigt (Voreilen an Radien und Kanten). Textile Halbzeuge werden symmetrisch (oben und unten gleichzeitig) zugeführt.

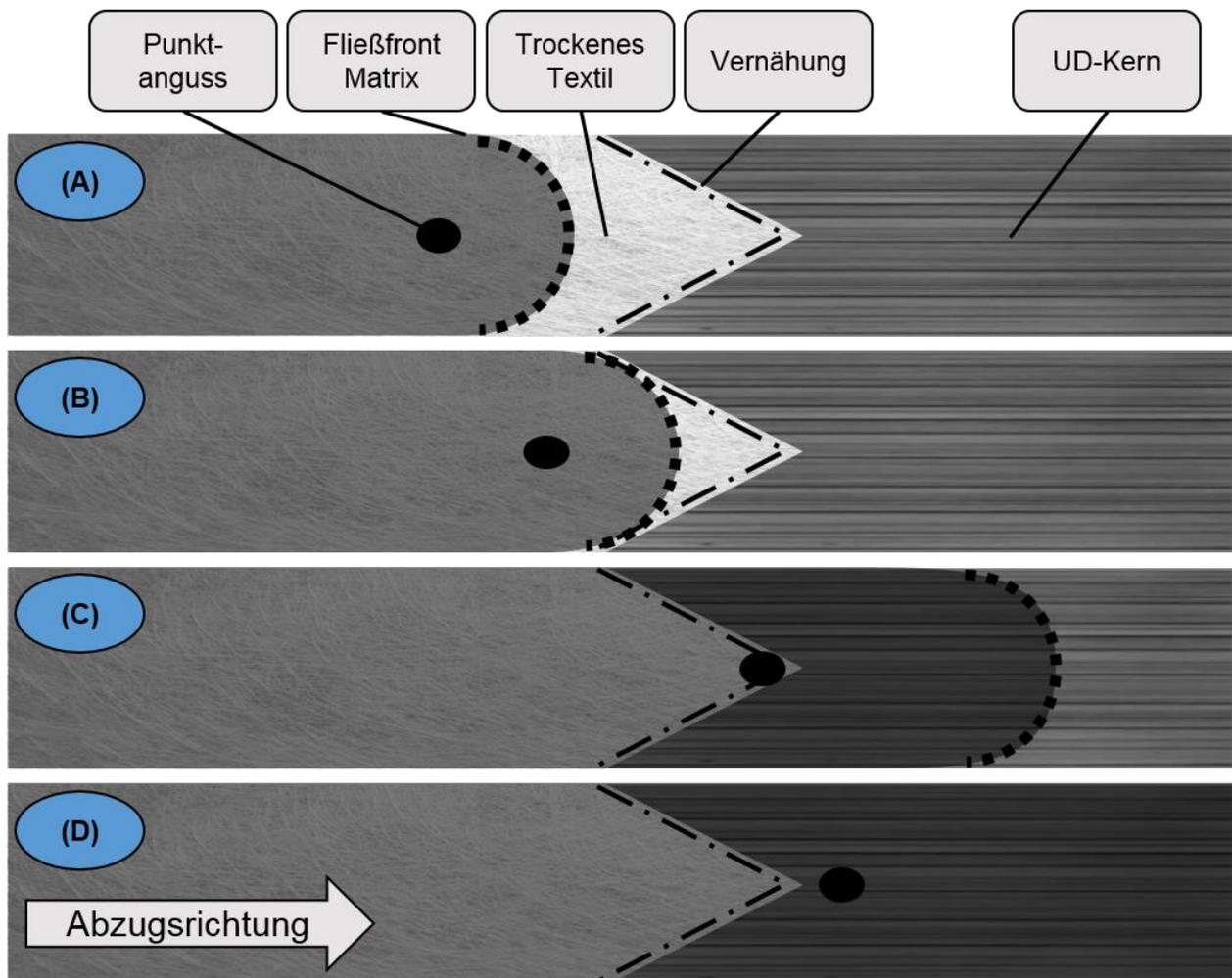


Abbildung 66: Anfahrprozess: Wechselwirkung Textilzuführung, Injektionsstart und Fließfront

Variante A zeigt den Injektionsstart weit hinter der Spitze der textilen Halbzeuge. In diesem Fall bleibt die Fließfront der Matrix bei Injektionsstart hinter der Spitze der textilen Halbzeuge und erreicht die trockenen Rovings davor nicht. Beachtet werden muss, dass die Länge der verbleibenden trockenen textilen Halbzeuge möglichst kurz ist. Trockene textile Halbzeuge erfahren beim Einzug in das heiße Werkzeug hohe Reibkräfte und können dadurch beschädigt oder aufgestaut werden. Ein Prozessabbruch aufgrund zu hoher Abzugskräfte ist eine mögliche Folge.

Variante B zeigt den Injektionsstart kurz hinter der Spitze der textilen Halbzeuge. Diese Variante beschreibt die minimal mögliche Länge der verbleibenden trockenen textilen Halbzeuge und stellt somit das Optimum dar. Gelangt die Fließfront der Matrix jedoch über die Spitze der textilen

Halbzeuge hinaus auf den UD-Kern, ist starkes Voreilen auf dem UD-Kern die Folge. Bedingt durch die hier fehlenden textilen Halbzeuge ist der FFG zu gering und somit die Permeabilität in Abzugsrichtung hoch. Dadurch resultieren Werkzeugverschmutzungen in Form von, an der Werkzeugoberfläche anhaftenden, Matrixrückständen. Werden diese im laufenden Prozess nicht abgetragen (bspw. durch kurzzeitig erhöhten FFG), führt dies zu Merkmalen wie „Riefen entlang des Profils“, „Querfalte in sichtbarer Faserlage“, „Längsfalte in sichtbarer Faserlage“, „Lageneinzug in Bauteildicke“ oder „Fehlstellen in oberster Matrixschicht“ (siehe Kapitel 5.2).

Variante C zeigt den Injektionsstart auf der Spitze der textilen Halbzeuge. In diesem Fall ist das Optimum bereits überschritten und die bei Variante B beschriebenen Folgen bzgl. Merkmalsausprägung treten ein.

Variante D zeigt den Injektionsstart vor der Spitze der textilen Halbzeuge und somit die Injektion auf dem UD-Kern. Auch hier sind starkes Voreilen der Matrix aufgrund zu geringem FFG und die entsprechenden Merkmalsausprägungen die Folgen. Zusätzlich kann die Matrix bis zum Werkzeugausgang gelangen und dort unausgehärtet austreten.

Generell gilt jedoch, dass die beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Textilzuführung, Injektionsstart und Ausbildung der Fließfront stark durch die Viskosität der Matrix, die Permeabilität des Lagenaufbaus, die Winkel der textilen Halbzeuge und evtl. in den Halbzeugen vorhandene Unregelmäßigkeiten (z.B. Gassen) beeinflusst werden.

Die Festlegung des richtigen Zeitpunktes für den Injektionsstart und die Textilzuführung erfordert unter Umständen eine Vielzahl empirischer Versuche.

Zusätzlich zum Zeitpunkt der Zuführung textiler Halbzeuge in Relation zum Injektionsstart ist die Art der Vernähung von Bedeutung. Insbesondere bei manueller Vernähung kann Einfluss auf die Ausrichtung der Nähfäden relativ zur Abzugsrichtung genommen werden. In nachfolgender Abbildung 67 sind zwei unterschiedliche Varianten schematisch dargestellt (Abbildung nicht maßstabsgetreu). Vorausgesetzt wird die symmetrische Vernähung textiler Halbzeuge oben und unten.

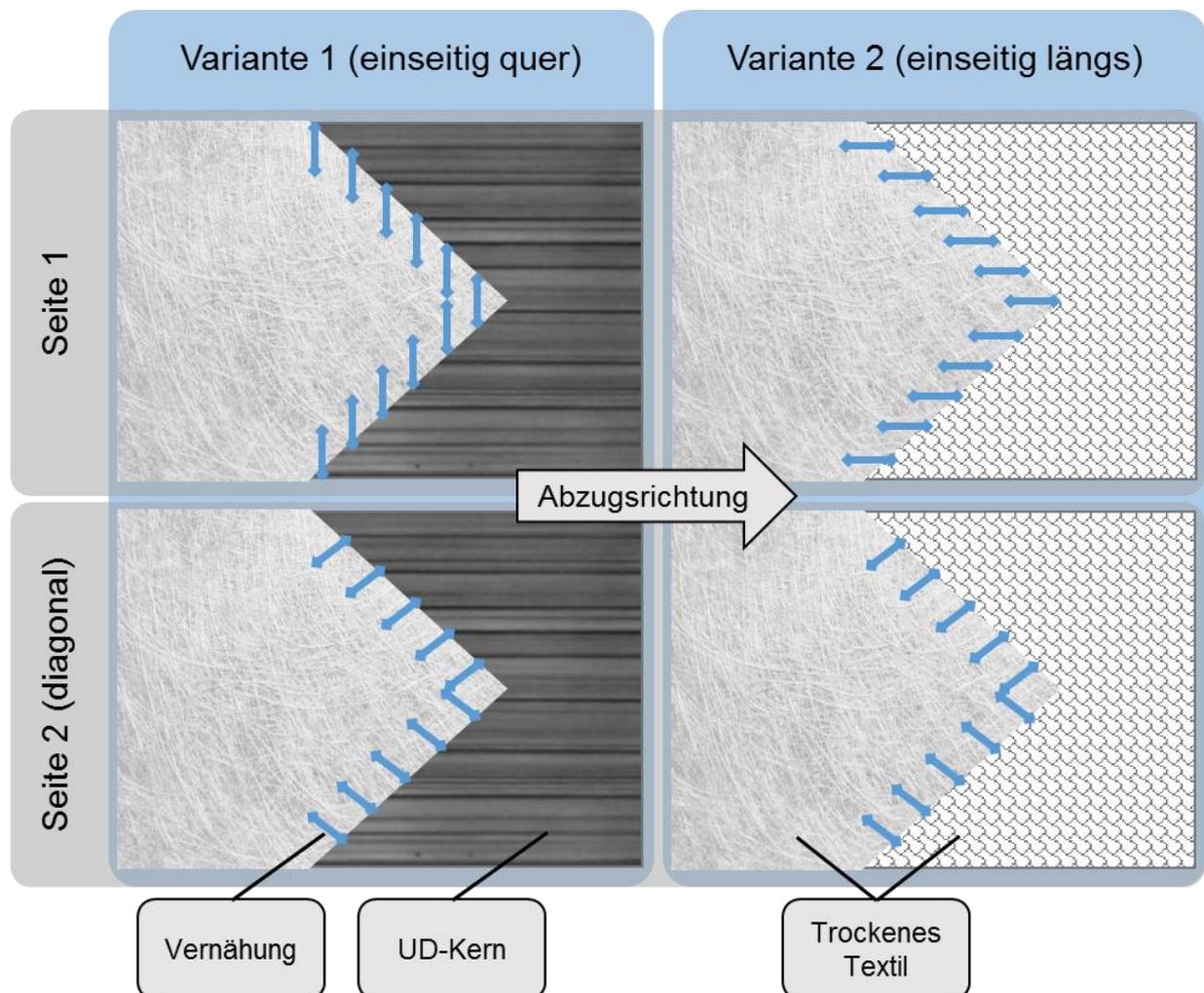


Abbildung 67: Schematische Darstellung unterschiedlicher manueller Vernähungen

Variante 1 zeigt einseitig quer zur Abzugsrichtung verlaufende Nähfäden. Auf der gegenüberliegenden Seite sind die Nähfäden, bedingt durch eine durchgängige Vernähung mit einem Faden, diagonal angeordnet. Diese Variante eignet sich bevorzugt für die Vernähung von textilen Halbzeugen auf einer UD-Schicht (bspw. beim Anfahrprozess), da die Nähfadenausrichtung in diesem Fall orthogonal zur Faserorientierung der UD-Schicht verläuft und so maximalen Widerstand gegen Abgleiten erzeugt.

Bei **Variante 2** verlaufen die Nähfäden einseitig in Abzugsrichtung. Diese Variante hat den Vorteil, dass die Nähfäden weniger Reibung an der Werkzeugoberfläche ausgesetzt sind. Dadurch wird das Risiko verhakter Nähfäden verringert. Diese Variante eignet sich bevorzugt für die Vernähung von textilen Halbzeugen auf anderen textilen Halbzeugen (bspw. beim Rollenwechsel), da in der Regel unterschiedliche Faserwinkel in den textilen Halbzeugen gegeben sind. Im Idealfall wird das anzunähernde textile Halbzeug unter das Bestehende geführt. Auf diese Weise ist der Anfang des anzunähernden textilen Halbzeugs gegen Beschädigungen

durch die Werkzeugoberfläche geschützt. Nachfolgende Abbildung 68 zeigt eine Vernähung zweier textiler Halbzeuge von Seite 1 aus aufgenommen. Durch das Unterschieben ist die Spitze des anzunähernden textilen Halbzeugs geschützt.

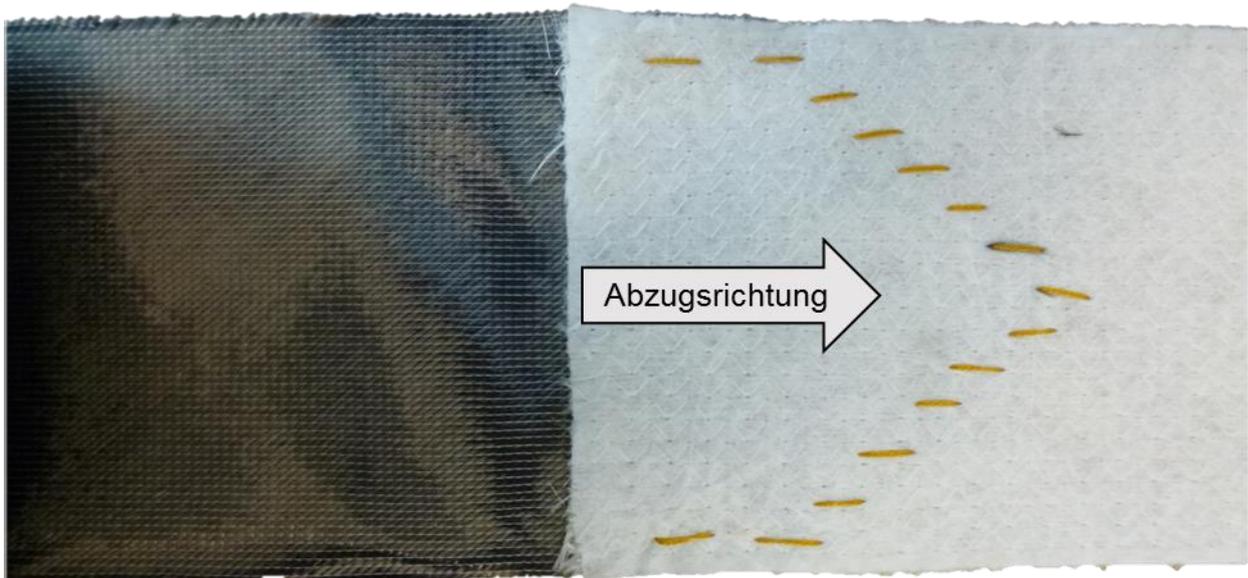


Abbildung 68: Vernähung zweier textiler Halbzeuge von Seite 1

5.7 Verknüpfung der Erkenntnisse

Im Folgenden werden die Erkenntnisse der durchgeführten Prüfmethode zusammengeführt. Die in der Parameterstudie durchgeführten Parametervariationen werden gesamthaft ihren Auswirkungen gegenübergestellt, um das Prozessverständnis zu erweitern und entsprechende Leitlinien abzuleiten. Auf diese Weise erfolgt in Tabelle 15 die Verknüpfung von Parametervariationen mit den Auswirkungen auf die Prozessdaten, die Merkmalsentstehung, die Faservolumengehalte, die Glasübergangstemperaturen, die Schichtdicken, die mechanischen Eigenschaften und sonstige Prozessveränderungen. Somit entsteht ein Gesamtbild bzgl. der Wechselwirkungen im Pultrusionsprozess für das Zielsystem (Injektion, CF, EP, Gelegeverstärkung). Aufgrund des speziell gewählten Zielsystems sind die dargestellten Wechselwirkungen nur bedingt auf andere Materialkombinationen übertragbar.

Tabelle 15: Parametervariationen und deren Auswirkungen

	Prozessdaten	Merkmale	FVG, Tg, Schichtdicken	Mechanische Eigenschaften	Sonstige Prozessveränderungen
Erhöhung FFG	Druckerhöhung am Ende der Injektionskammer, Anstieg der Abzugskraft	„Flächig milchige Hilfsfasern“, „Flächig milchige Glasfasern“, „Freigelegte Glas- und Hilfsfasern“, „Trockenstelle“	Erhöhung des Faservolumen-gehalts, Verringerung der Schichtdicken textiler Halbzeuge	Erhöhung Zug-E-Modul 0°, Erhöhung Biege-E-Modul 0°, Verringerung Zugdehnung 0° (begünstigt durch geringe Kammertemperierung und hohe Abzugsgeschwindigkeit), Verringerung Biege-Dehnung 0°	Aufwendigere Faserführung, bessere Abdichtung des Werkzeuges gegen Matrixaustritt, evtl. am Werkzeugeingang vorhandener Matrixaustritt kann gestoppt werden
Verringerung FFG	Druckverringering am Ende der Injektionskammer, Verringerung der Abzugskraft	„Riefen entlang des Profils“, „Lageneinzug in Bauteildicke“, „Fehlstellen in oberster Matrixschicht“, „Ondulation in einer 90°-Lage“	Verringerung des Faservolumen-gehalts, Erhöhung der Schichtdicke textiler Halbzeuge	Verringerung Zug-E-Modul 0°, Verringerung Biege-E-Modul 0°, Erhöhung Zugdehnung 0°, Erhöhung Biege-Dehnung 0°	Vereinfachte Faserführung, Matrixaustritt am Werkzeugeingang möglich, Matrixaustritt am Werkzeugeingang möglich (Anfahrprozess)
Erhöhung Kammertemp.	Druckverringering am Ende der Injektionskammer	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Matrixaustritt am Werkzeugeingang möglich
Verringerung Kammertemp.	Druckanstieg am Ende der Injektionskammer	„Verzug in der Decklage“	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Evtl. am Werkzeugeingang vorhandener Matrixaustritt kann gestoppt werden

	Prozessdaten	Merkmale	FVG, Tg, Schichtdicken	Mechanische Eigenschaften	Sonstige Prozessveränderungen
Erhöhung Abzugsgeschw.	Erhöhung der Abzugskraft, Erhöhung der Heizleistung in Zone 1	„Weißer Abrieb“	Verringerung der Glasübergangstemperatur	Verringerung Zugfestigkeit 0° (begünstigt durch geringe Kammertemperierung), Verringerung Biegefestigkeit	Aufwendigere Faserführung, evtl. am Werkzeugeingang vorhandener Matrixaustritt kann gestoppt werden
Verringerung Abzugsgeschw.	Verringerung der Abzugskraft, Verringerung der Heizleistung in Zone 1	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Erhöhung der Glasübergangstemperatur	Erhöhung Zugfestigkeit 0°	Vereinfachte Faserführung, Matrixaustritt am Werkzeugeingang möglich
Erhöhung Temperaturprofil	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Erhöhung der Glasübergangstemperatur	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen
Verringerung Temperaturprofil	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Verringerung der Glasübergangstemperatur	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen	Am Zielsystem keine Auswirkung festzustellen

Gesamthaft betrachtet stellt sich der FFG⁷ als maßgebliche Stellgröße heraus. Änderungen des FFG haben starke Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise E-Moduli in 0° und 90°-Richtung, zur Folge. Die Entstehung und Vermeidung unterschiedlicher Merkmale wird ebenso entscheidend durch den FFG beeinflusst.

Änderungen der Abzugsgeschwindigkeit spiegeln sich direkt in der Abzugskraft und der Heizleistung von Zone 1 wider. Bezüglich der Merkmalsausprägung, in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit, zeigt sich lediglich vermehrter „Weißer Abrieb“ bei Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit. Weitere Folgen einer Änderung der Abzugsgeschwindigkeit sind Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit in 0°-Richtung), die Faserführung und eventuellen Matrixaustritt am Werkzeugeingang.

Die Kammertemperierung ermöglicht eine Einflussnahme auf den Druck am Ende der Injektionskammer und ist damit eine wichtige Stellgröße für den Imprägniervorgang. Analog zur Abzugsgeschwindigkeit wechselwirkt auch die Kammertemperierung mit eventuellem Matrixaustritt am Werkzeugeingang.

Änderungen des Temperaturprofils zeigen am Zielsystem lediglich Auswirkungen auf die Glasübergangstemperatur der produzierten Profile.

Neben den genannten direkten und indirekten Wechselwirkungen von Parametervariationen und ihren Auswirkungen sind kritische Prozesszustände zu beachten. Hierzu zählen der Anfahrprozess mit dem Annähen textiler Halbzeuge und dem Zeitpunkt des Injektionsstarts, das Nachfüllen oder der Wechsel des Matrixsystems und das Annähen oder der Wechsel textiler Halbzeuge im laufenden Prozess.

Mit dieser Arbeit konnte auch gezeigt werden, dass der Pultrusionsprozess in Abhängigkeit der eingesetzten Werkstoffe nur in einem engen Prozessfenster, dass es für die jeweilige Anwendung zu ermitteln gilt, funktioniert. Dabei sind die hier gewonnenen Erkenntnisse und Abhängigkeiten hilfreich.

⁷ Formfüllgrad - festgelegt durch die Anzahl der Rovings in der Mittelebene des Profils

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Qualifizierung des Pultrusionsverfahrens für den Einsatz in der automobilen Großserie wurden in dieser Arbeit die notwendigen Kenntnisse über Wechselwirkungen im Prozess und das Wissen um die Auswirkung einzelner Parameter auf grundlegende Bauteileigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit sowie die Merkmalsausprägung erarbeitet.

Basierend auf einer Literaturrecherche wurde ein Defizit, bzgl. des Prozessverständnisses und bekannter Wechselwirkungen, im Bereich der Anwendung der Injektionstechnologie für Kohlenstofffasern in einer Epoxid-Matrix mit Gelegeverstärkung festgestellt. Auch eine umfassende Systemanalyse zur Identifikation relevanter Prozessparameter, unabhängig von verwendeten Matrixsystemen, wurde bisher nicht durchgeführt.

Ausgehend von einer gesamthaften Systemanalyse, unter Verwendung der Ishikawa-Methode und fortlaufenden Plausibilisierungen, konnte eine repräsentative Parametersammlung erarbeitet werden. Mittels einer Intensitäts-Beziehungsmatrix wurden diese Parameter quantitativ bewertet und theoretische Wechselwirkungen erarbeitet. Die im Zuge der Systemanalyse ermittelten und gewichteten Parameter bildeten die Grundlage zur experimentellen Überprüfung der Wirkzusammenhänge mit Hilfe der Methode der statistischen Versuchsplanung. Umfassende Vorversuche definierten die Parameterstufen des Versuchsplans mit den Parametern Formfüllgrad, Abzugsgeschwindigkeit, Kammertemperierung und Temperaturprofil.

In den analysierten Quellen wurden entweder Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften oder die Bauteilqualität untersucht. Um die Bauteilqualität überhaupt messbar zu machen, wurde eine mehrstufige Prüfmethodik entwickelt und angewandt. Neben Zielgrößen wie mechanische Eigenschaften, Geometrie und Imprägnierqualität wurde die Merkmalsausprägung detailliert untersucht und in Form eines Merkmalskataloges messbar gemacht. Mit Hilfe des Merkmalskataloges ist es nun möglich, die Bauteilqualität bezüglich lokaler Inhomogenitäten zu beschreiben und Abweichungen vom Sollzustand einheitlich zu charakterisieren.

Eine umfangreiche Parameterstudie bestätigte die theoretischen Ergebnisse der Systemanalyse. Ausgewertet wurden die Prozessdaten, die Bemusterung der produzierten Profile nach dem erarbeiteten Merkmalskatalog, die physikalisch-chemischen und thermischen Untersuchungsmethoden, die mikrostrukturellen Untersuchungsmethoden und die mechanischen Prüfungen.

Für das verwendete R-CF-Vlies wurden zwei Effekte nachgewiesen. Bauschige Halbzeuge dichten den Werkzeugeingang gegen Matrixaustritt und Druckverlust ab und gewährleisten den vorgesehenen Injektionsdruck am Kammeranfang (Bauscheffekt). Schwammartige Halbzeuge tragen mehr Matrix vom Injektionspunkt zum Ende der Kammer und erhöhen dort den Druck zum Imprägnieren des Aufbaus (Schwammeffekt). Ferner konnte gezeigt werden, dass der FFG und

die Kammertemperierung maßgebliche Stellhebel für die Drücke in der Injektionskammer und damit die Imprägnierqualität sind. Ein direkter Zusammenhang von FFG und Abzugskraft, sowie Abzugsgeschwindigkeit und Abzugskraft konnte ebenso nachgewiesen werden. Aus der Analyse der Heizleistungen der unterschiedlichen Zonen ergab sich ein Zusammenhang von Abzugsgeschwindigkeit und der Heizleistung in Zone 1. Die Auswertung der Bemusterung der Profile nach Merkmalskatalog zeigte eine direkte Korrelation von FFG und der Entstehung der Merkmale „Riefen entlang des Profils“, „Lageneinzug in Bauteildicke“, „Flächig milchige Hilfsfasern“, „Freigelegte Glas- und Hilfsfasern“ und „Fehlstellen in oberster Matrixschicht“. Die Entstehung des Merkmals „Verzug in der Decklage“ war auf den Parameter Kammertemperierung zurückzuführen. Diese Korrelation konnte mittels Ultraschalluntersuchungen bestätigt werden. Die physikalisch-chemischen und thermischen Untersuchungsmethoden zeigten den Einfluss des Parameters Temperaturprofil auf die Glasübergangstemperaturen sowie den Zusammenhang von FFG und FVG. Mittels Bauteilveraschungen wurden zwei Korrelationen von Merkmalen untereinander nachgewiesen. Ein Lageneinzug korreliert mit einer Verdrängung des UD-Kerns und eine Gasse in der Decklage kann eine Ondulation in verdeckten Lagen zur Folge haben. Umfangreiche Schnitt-/Schliffbildanalysen zeigten die Wechselwirkungen der Merkmale „Lageneinzug“ und „Doppelter Lageneinzug“ mit der Entstehung von Brüchen im Inneren der Bauteile. Anhand einer Analyse der Schichtdicken konnte der Einfluss des FFG auf die Schichtdicken textiler Halbzeuge gezeigt werden. Eine umfassende Analyse der mechanischen Eigenschaften bestätigte den FFG als maßgeblichen Stellhebel. Mit den Ergebnissen konnten Auswirkungen auf Zug-E-Modul 0°, Biege-E-Modul 0°, Zugdehnung 0°, Biege-Dehnung 0° nachgewiesen werden.

Zusätzlich zu den genannten direkten und indirekten Wechselwirkungen von Parametervariationen und ihren Auswirkungen wurden kritische Prozesszustände identifiziert. Hierzu zählen der Anfahrprozess mit dem Annähen textiler Halbzeuge und dem Zeitpunkt des Injektionsstarts, das Nachfüllen oder der Wechsel des Matrixsystems und das Annähen oder der Wechsel textiler Halbzeuge im laufenden Prozess.

Mit Hilfe der umfassenden Systemanalyse, deren experimentellen Überprüfung und Verifizierung sowie der erarbeiteten Prüfmethode inklusive Merkmalskatalog konnten die Defizite des Standes von Forschung und Technik ausgeglichen werden. Diese Untersuchungen ermöglichten die Identifikation relevanter Prozessparameter mit deren Wirkzusammenhängen und erweitern somit das Prozessverständnis für das Zielsystem (Injektion, CF, EP, Gelegeverstärkung).

Zur Erweiterung der Erkenntnisse dieser Arbeit sind nachfolgend einige Ansatzpunkte als Grundlage weiterführender Untersuchungen dargestellt.

Im Rahmen der Systemanalyse wurden Überlappbereiche, Prozesshilfsmittel und Radien/Wandstärke als ebenso relevante Parameter identifiziert, aufgrund gegebener Randbedingungen jedoch nicht in die Versuchsplanung aufgenommen. Eine weiterführende Untersuchung dieser Parameter gemäß der in dieser Arbeit angewandten Methodik ist eine mögliche Ergänzung der vorhandenen Erkenntnisse.

Ebenso wurde in dieser Arbeit ein Matrixsystem nach dem Stand der Technik gewählt. Weiterführende Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass mit diesem Parameter weitreichende Wechselwirkungen einhergehen. Vorversuche mit angepassten Matrixrezepturen zeigten eine deutlich differenziertere Betrachtung des Parameters Matrixsystem. Wird die Harzkomponente beispielsweise aufgespalten in zwei unterschiedliche Harzkomponenten, lässt sich die Matrixviskosität stark beeinflussen. Weiterhin kann das Beimischen von Füllstoffen oder Additiven zur Benetzung und Entlüftung ein möglicher Stellhebel für die Bauteilqualität sein. Im Rahmen der Vorversuche wurde das Matrixsystem gemäß nachfolgender Tabelle 16 angepasst und der Einfluss auf die Viskosität ermittelt.

Tabelle 16: Angepasste Rezepturen des EP-Matrixsystems

Komponente	Bezeichnung	M0 Anteil [pbw]	M1 Anteil [pbw]	M2 Anteil [pbw]	M3 Anteil [pbw]
Harz 1	Huntsman LY 3585	100,0	100,0	75,0	75,0
Harz 2	Huntsman CY 179	0,0	0,0	25,0	25,0
Härter	Huntsman Aradur 917-1	80,0	80,0	89,0	89,0
IMR	Chem-Trend Chemlease IC 25	4,0	4,0	4,0	4,0
Beschleuniger	Huntsman Beschleunigermischung	x	x	x	x
Füllstoff	Calciumcarbonat	0,0	18,0	0,0	18,0
Additiv 1	Byk P 9912 [Byk14]	0,0	1,8	0,0	1,8
Additiv 2	Byk P 9920 [Byk17]	0,0	0,9	0,0	0,9

Das Matrixsystem M0 ist das in der Parameterstudie verwendete Matrixsystem. Für die Matrixsystem M1-M3 wurden mögliche Kombinationen von veränderten Harzkomponenten, Additiven und Füllstoffen gegenübergestellt. Der Einfluss dieser Kombinationen auf die Matrixviskosität ist in nachfolgender Abbildung 69 dargestellt.

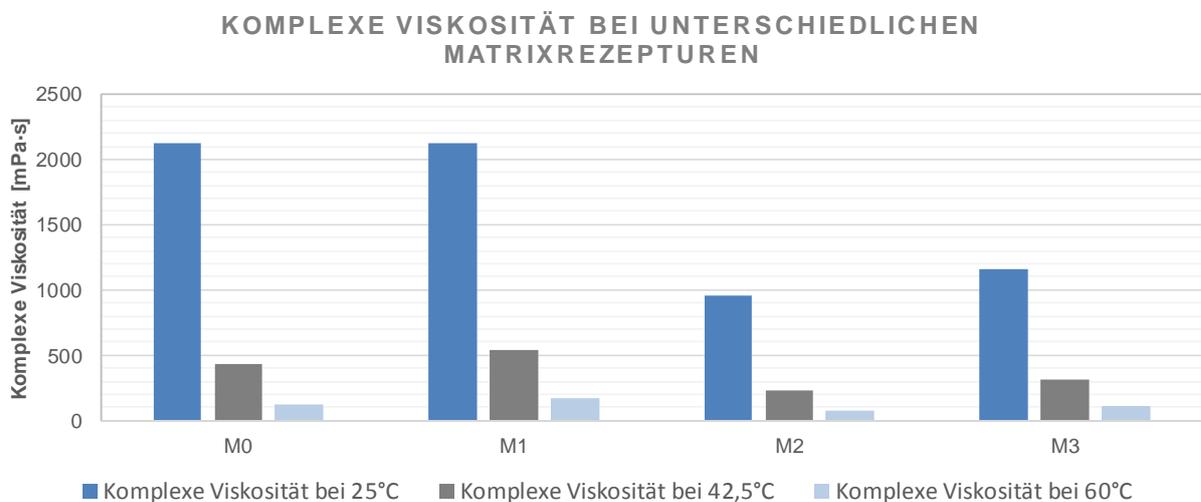


Abbildung 69: Komplexe Viskositäten bei unterschiedlichen Matrixrezepturen

Die Vorversuche haben gezeigt, dass eine Kombination zweier Harzkomponenten nahezu eine Halbierung der Viskosität bei den relevanten Temperaturen der Parameterstudie (25°C, 42,5°C, 60°C) verursacht, wohingegen das Beimischen der beiden Additive und des Füllstoffes in einer geringfügigen Erhöhung der Viskosität resultieren. Weiterhin konnte durch die Mischung der Harzkomponente die Entstehung von schwarzen Flecken (nicht näher untersucht) im Profilquerschnitt deutlich verringert werden. Ein Vergleich zweier Schliiffbilder mit Matrix M0 und Matrix M2 in nachfolgender Abbildung 70 zeigt die unterschiedliche Ausprägung von schwarzen Flecken.

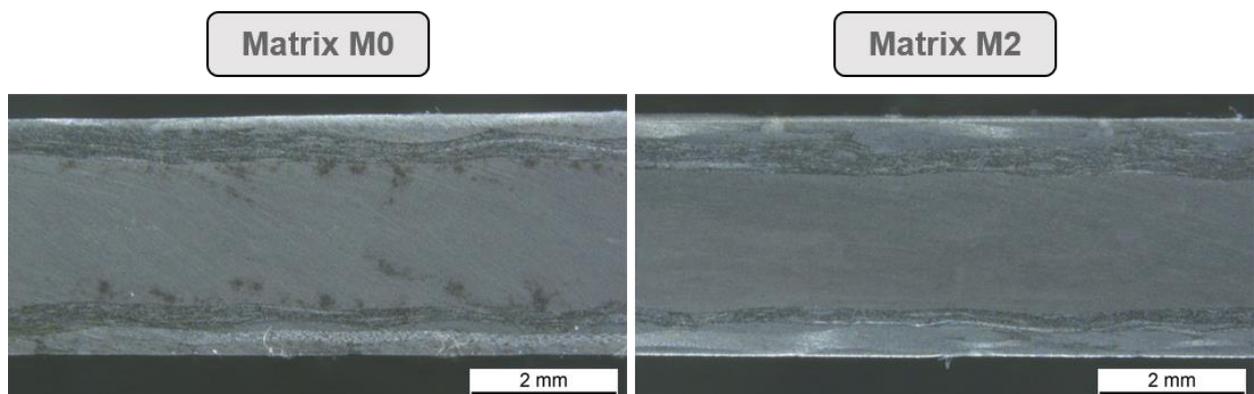


Abbildung 70: Vergleich zweier Schliiffbilder mit Matrix M0 (links) und Matrix M2 (rechts) an Aufbau 6

Auch das Einbringen von Additiven sowie die Entstehung oder Vermeidung von Merkmalen durch diese, wurde bisher unzureichend untersucht. Allerdings kann durch derartige Anpassungen des

Matrixsystems die Bauteilqualität und möglicherweise auch die Vermeidung von Merkmalen gezielt gesteuert werden.

Das Beimischen des Füllstoffes Calciumcarbonat wurde in dieser Arbeit lediglich in Kombination mit einem VE-Matrixsystem im Rahmen der Vorversuche betrachtet. Auffällig war eine augenscheinlich unterschiedliche Konzentration des Füllstoffes in den unterschiedlichen Lagen des Aufbaus. Dies deutet auf eine Filterwirkung der textilen Halbzeuge hin, bedarf jedoch weiterer Analysen.

Die gesamte Versuchsreihe wurde mit konstantem Trennmittelgehalt durchgeführt. Orientierende Versuche haben jedoch eine direkte Korrelation des Trennmittelgehaltes mit der Abzugskraft aufgezeigt. Nachfolgende Abbildung 71 zeigt die Abzugskräfte an Aufbau 3 mit den Trennmittelgehalten 4 pbw, 6 pbw und 12 pbw. Alle anderen Parameter wurden konstant gehalten.

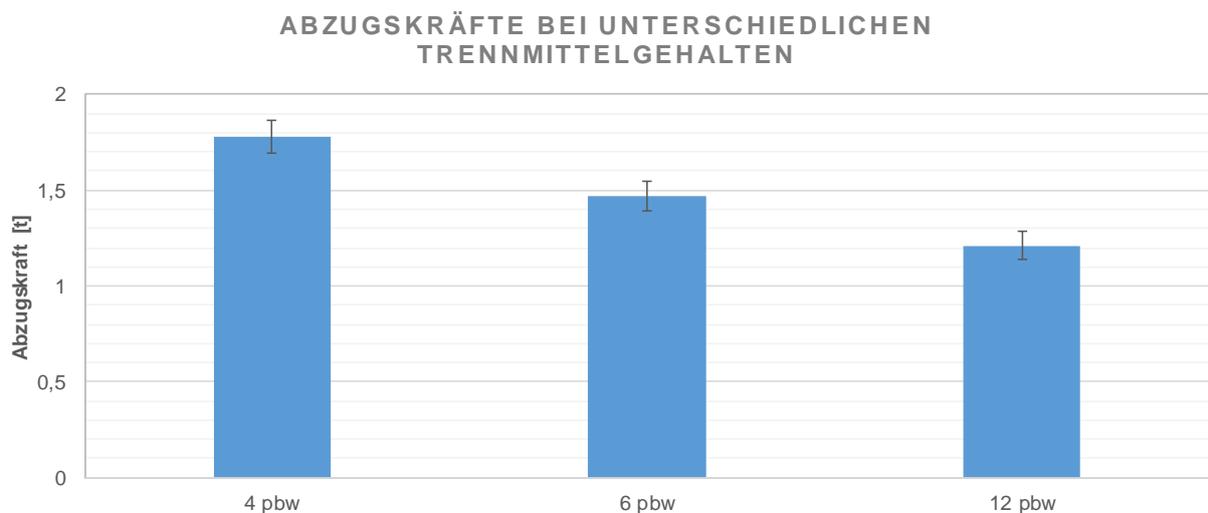


Abbildung 71: Abzugskräfte an Aufbau 3 bei unterschiedlichen Trennmittelgehalten

Die Abzugskraft sinkt mit steigendem IMR-Gehalt. Der Sprung von 6 pbw auf 12 pbw ist jedoch nicht so groß wie der von 4 pbw auf 6 pbw. Dies deutet auf eine Annäherung an eine Sättigung hin.

Um mögliche Potentiale durch eine angepasste Matrixrezeptur zu nutzen und weitere Wechselwirkungen mit der Bauteilqualität zu ermitteln, sind somit weiterführende Studien gemäß der in dieser Arbeit aufgezeigten Methodik erforderlich.

Auch die Anpassung des Geleges bietet weitere Potentiale hinsichtlich der Verarbeitbarkeit. Zu untersuchende Aspekte sind beispielsweise:

- Geänderte Faserwinkel

- Randvernähung
- Gelegebreite in Abhängigkeit von der Querschnittsgeometrie
- Oberflächenvlies auf dem Gelege vernäht

Literaturverzeichnis

- [Asm13] Asmir, S.: Faserverstärkte Versteifungsstrebe, Herstellverfahren und Kraftfahrzeugkarosserie. DE 10 2013 002 365 B3. Deutschland, 2013.
- [BAH14] Baran, I.; Akkerman, R.; Hattel, J. H.: Material characterization of a polyester resin system for the pultrusion process. In *Composites Part B: Engineering*, 2014; S. 194–201.
- [Ban16] Bansal, A.: All-composite lighthouse. In *JEC Composites Magazine*, 2016. 108; S. 44–45.
- [BAS12] BASF Coordination Center Comm. V.: Willkommen in der Zukunft. Bau und Konstruktion. Verbundwerkstoffe. In *PUR Kundenmagazin Ausgabe 2, Nr.23*, 2012. 23; S. 16–19.
- [Bau13] Baur, E.: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. Hanser Verlag, München, 2013.
- [BCS08] Brennan, M.; Connolly, M.; Shidaker, T.: *CFD Modeling of the Closed Injection Wet-Out Process For Pultrusion*, Auburn Hills, Michigan, 2008.
- [BeB16] Becker, P.; Büter, A.: Weniger Gewicht für Elektrofahrzeuge: Fraunhofer LBF entwickelt hybride Leichtbauhinterachse, 2016.
- [BeP13] Becker, E.; Piltz, E.: *Technische Strömungslehre: Eine Einführung in die Grundlagen und technischen Anwendungen der Strömungsmechanik*. Springer-Verlag, Stuttgart, 2013.
- [Ber08] Bertleff, W.: Polyurea-Fachartikel. Verbesserte Polyurea-Coatings mit Baxxodur PC 136. In (KP Verlag Hrsg.): *FAPU. Fachmagazin der Polyurethanindustrie*. KP Verlag, Hamburg, 2008; S. 30–32.
- [Bez16] Bezerra, R. Hrsg.: *Energieeffiziente Herstellung komplexer Hochleistungsfaserverbundbauteile mittels Pultrusion, In-Line Flechten, Blasumformung und Endbearbeitung (PulForm)*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2016.
- [Bez17] Bezerra, R.: *Modelling and Simulation of the Closed Injection Pultrusion Process*. Dissertation, Karlsruhe, 2017.
- [BGH12] Bäumer, R.; Gengnagel, C.; Hernandez, E.: Design für naturfaserverstärkte Tragelemente. In (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Hrsg.): *Biobasierte Polymere - Kunststoffe der Zukunft*, 2012; S. 1–23.
- [BHA15] Baran, I.; Hattel, J. H.; Akkerman, R.: Investigation of process induced warpage for pultrusion of a rectangular hollow profile. In *Composites Part B: Engineering*, 2015. 68; S. 365–374.
- [BHS08] Biermann, D.; Hufenbach, W.; Seliger, G.: *Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe*. Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf, 2008.
- [BKB+14] Bühler, S.; Krishnamoorthy, S.; Berlin, M.; Semlitsch, K.-H.: Herstellung mehrere unterschiedlicher Faserverbundbauteile für Großserien in einem kontinuierlichen Prozess. EP 3 015 256 A1, 2014.
- [BKC+05] Brown, R. J.; Kharchenk, S.; Coffee, H. D.; Huang, I.: *System for producing pultruded Components*. 8597016. USA, 2005.
- [Bla99] Blaurock, J.: *Zur Optimierung des Strangziehverfahrens für endlosfaserverstärkte, hochfeste Kunststoffprofile*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Dissertation, 1999.
- [BMW14] BMW Group: *Merkmalsklassifizierung von Faserverbundbauteilen*, 2014.
- [BMW15] BMW PressClub Deutschland: *BMW 7er Rohkarosse / Carbon*, 2015.
- [Bor15] Borg, U. Krebs, D.: *Detaillierte Bewertung der ausgewählten Parameter der ersten Ebene anhand vorgegebenem Schema*. Experteninterview, Landshut, 2015.

- [BTH12] Baran, I.; Tutum, C. C.; Hattel, J. H.: Investigation of the Thermal Contact Resistance in Thermosetting Pultrusion Process: 20th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-20), 2012.
- [BTS+03] Britnell, D. J. et al.: Bent pultrusion - a method for the manufacture of pultrudate with controlled variation in curvature. In Journal of Materials Processing Technology, 2003. 138; 311–315.
- [Bur16] Burkert, A.: Durchbruch bei gekrümmt faserverstärkten Kunststoffprofilen. <https://www.springerprofessional.de/leichtbau/automobilproduktion/durchbruch-bei-gekruemmt-faserverstaerkten-kunststoffprofilen/10912462>, 02.11.2016.
- [Buy14] Buyar, U.: Konzeptausarbeitung von Torsionsstreben aus CFK am Unterboden. Diplomarbeit, München, 2014.
- [BWS+15] Bezerra, R. et al.: Manufacturing of Complex Shape Composite Parts through the Combination of Pull-Braiding and Blow Moulding: 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 19-24th July 2015, 2015.
- [Che11] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [CKS+05] Connolly, M. et al.: Pultruding Polyurethane Composite Profiles: Practical Guidelines for Injection Box Design, Component Metering Equipment and Processing: Composites Convention and Trade, 2005; S. 1–9.
- [CPP06] Carlone, P.; Palazzo, G. S.; Pasquino, R.: Pultrusion manufacturing process development by computational modelling and methods. In Mathematical and Computer Modelling, 2006, 44. 7-8; S. 701–709.
- [CPP07] Carlone, P.; Palazzo, G. S.; Pasquino, R.: Pultrusion manufacturing process development. Cure optimization by hybrid computational methods. In Computers & Mathematics with Applications, 2007, 53. 9; S. 1464–1471.
- [CTJ+15] Cort C. Corwin; Toby K. Jacobson; Joseph R. Matecki; Ed C. Pendergrass: Pultruded Beam, and Apparatus and Methods for Manufacturing. US 2016/0167609 A1. USA, 2015.
- [DIN00] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Korngrößenanalyse. DIN ISO. 6344-1. Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [DIN01] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Sichtprüfung. Zerstörungsfreie Prüfung. Allgemeine Grundlagen. DIN EN ISO. 13018. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [DIN05] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Thermische Analyse (TA). Grundlagen. DIN. 51006. Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [DIN10] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. DIN EN ISO. 11357-1. Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [DIN11a] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie – Teil 1: Terminologie. DIN EN. 16016-1. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [DIN11b] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften. DIN EN ISO. 14125. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [DIN12a] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie – Teil 3: Durchführung und Auswertung;. DIN EN. 16016-3. Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [DIN12b] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie – Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben. DIN EN. 16016-2. Beuth Verlag, Berlin, 2012.

- [DIN12c] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlungsverfahren – Computertomografie – Teil 4: Qualifizierung. DIN EN. 16016-4. Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [DIN14a] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung – Allgemeine Grundsätze. DIN EN ISO. 16810. Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [DIN14b] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und der Glasübergangshöhe. DIN EN ISO. 11357-2. Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [DIN97] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrope und anisotrope faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. DIN EN ISO. 527-4. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [Dre15] Drechsler, K.: „Leichtbau und Carbon“. Politik, Wirtschaft und Wissenschaft zu Gast am Institutsteil FIL des Fraunhofer ICT in Augsburg. In Carbon Composites Magazin Ausgabe 2, 2015. 2; S. 20.
- [Eng15a] Engel-Watzek, S. Krebs, D.: Detaillierte Bewertung der ausgewählten Parameter der ersten Ebene anhand vorgegebenem Schema. Experteninterview, Landshut, 2015.
- [Eng15b] Engelen, H. Krebs, D.: Detaillierte Bewertung der ausgewählten Parameter der ersten Ebene anhand vorgegebenem Schema. Experteninterview, Pfinztal, 2015.
- [Eng16a] Engelen, H. Krebs, D.: Auswahl der zu untersuchenden Profilgeometrie in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT. Experteninterview, Pfinztal, 2016.
- [Eng16b] Engelen, H. Krebs, D.: Mehrstufiges Vorgehen: Schrittweise Annäherung zum eigentlichen Zielsystem (Injektion, CF, EP, Gelegeverstärkung) über Vorversuche. Experteninterview, Pfinztal, 2016.
- [Eng17] Engelen, H. Krebs, D.: Schwammeeffekt ausgewählter textiler Halbzeuge im Pultrusionsprozess. Experteninterview, Pfinztal, 2017.
- [Eng18] Engelen, H.: Pultrusion mit duromeren Harzsystemen. Aktuelle Entwicklungen im Bereich Injektions-Pultrusion und ausgewählte Anwendungs-Beispiele. In (Sika Hrsg.): Composites Customer Day, 2018.
- [Exe09] Exel Composites: Pullwinding Technology. <http://www.exelcomposites.com/fi-fi/english/composites/manufacturingtechnologies/pullwinding.aspx>, 19.04.2018.
- [Fib18] Fiberline Composites A/S: Konstruktionsprofile und Beschläge. <https://fiberline.de/structural-profiles/structural-profiles-and-brackets>, 20.04.2018.
- [Fra10] Frank, A.: 2k teilfaktorielle Versuchspläne (fractional factorial). HS Vorlesung Quality Engineering. http://www.tqu-group.com/we-dokumente/Downloads/Vorlesung/HS_3-05-2k-teilfaktorielle-Versuche.pdf, 21.08.2017.
- [Fra14] Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT. Forschen, wo es Spaß macht. Anlagenportfolio – Pultrusion: Pultrex Px500-10T. http://www.regio-augsburg-wirtschaft.de/fileadmin/user_upload/raw/Veranstaltungen/Fach-PR/Fraunhofer ICT FIL__deutsch-07-2014_.pdf, 23.05.2017.
- [FZR95] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices. Springer, Berlin, 1995.
- [FZR96] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen. Springer, Berlin, 1996.
- [GaL95] Gauchel, J. V.; Lehman, R. N.: Apparatus for Resin impregnated Pultrusion. 5747075. USA, 1995.
- [Gig16] Giger, B.: Design of Experiments. Einführung in die statistische Versuchsplanung (DoE). http://www.tqu-group.com/we-dokumente/Downloads/design_of_experiments.pdf, 21.08.2017.

- [GLM+15] Gude, M. et al.: Forel-Studie. Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. FOREL, Dresden, 2015.
- [Gol11] Goller, R.: Carbon fibres – Production, Products, Applications. In (4a engineering GmbH Hrsg.): 4a Technologietag 2011; S. 1–38.
- [Gut97] Gutowski, T.G.P. Hrsg.: Advanced composites manufacturing. John Wiley & Sons, New York, NY, 1997.
- [Ham09] Hambrecht, T.: Leichtbau - Herausforderungen und Ziele bei AUDI. In (4a engineering GmbH Hrsg.): 4a Technologietag 2009; S. 1–27.
- [HeM11] Henning, F.; Moeller, E. Hrsg.: Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hanser, München, 2011.
- [Hen13] Henning, F.: Faserverbunde für den Leichtbau. Manuskript zur Vorlesung. Manuskript, Karlsruhe, 2013.
- [Her16] Herzog, D.: Best Practices: Resin Selection. <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2016/01/best-practices-resin-selection-2/2/>, 14.09.2016.
- [Hoa09] Hoa, S. V.: Principles of the manufacturing of composite materials. DEStech Publications, Lancaster, PA, 2009.
- [HoM46] Howald, A. M.; Meyers, L. S.: Shaft for Fishing Rods. 2.571.717. USA, 1946.
- [HRS+13] Heitz, T.; Regner, S.; Schacht, A.; Kreutz, D.: Lenksäule in Faserverbundtechnologie, basierend auf Pultrusion- und Flecht- und/oder Wickeltechnologie. DE 10 2013 001 442 B3. Deutschland, 2013.
- [HSB15] Hopmann, C.; Schneider, P.; Böttcher, A.: Von der Injektionsbox zum komplexen Werkzeug zur Fertigung von Hybridprofilen. In Konstruktion, 2015. Juli/August; S. 6–9.
- [ISP+16] Irfan, M. S. et al.: A modified pultrusion process. In Journal of Composite Materials, 2016; S. 1–17.
- [Jac06] Jacob, A.: Globalisation of the pultrusion industry. In Reinforced Plastics, 2006, 50. 5; S. 38–41.
- [Jan17] Jansen, K.: Radius-Pultrusion. Pushing Pultrusion into New Markets: North American Pultrusion Conference, 2017.
- [JBP91] Jaklitsch, D. J.; Bostic, M. T.; Pattie, E. R.: An Examination of Processing Variables in the Pultrusion of Glass Reinforcements with an Epoxy-Anhydride Resin System, Watertown, Massachusetts, 1991.
- [JLW03] Joshi, S. C.; Lam, Y. C.; Win Tun, U.: Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature. In Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34. 12; S. 1151–1159.
- [JLZ07] Joshi, S. C.; Lam, Y. C.; Zaw, K.: Optimization for Quality Thermosetting Composites Pultrusion through Die Heater Layout and Power Control: 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, 2007; S. 1–7.
- [Jun15] Jung, J.: Thermoplastische Composite-Hybride für die Serienanwendung, 2015.
- [KBF+15] Krebs, D.; Bichlmeier, J.; Finckh, C.; Maidl, F.; Sitter, S.; Arnold, F.: Verfahren zur Herstellung eines platten- oder strangförmigen, faserverstärkten Bauteils für ein Kraftfahrzeug. DE 10 2015 205 977 A1. Deutschland, 2015.
- [Kle10] Kleinholz, R.: Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [KNF90] Koppnaes, C.; Nolet, S. G.; Fanucci, J. P.: Method and Apparatur for wetting Fiber Reinforcements with Matrix Materials in the Pultrusion Process using continuous In-Line Degassing. 5073413. USA, 1990.

- [Kre14] Krebs, D.: RTM - Versuche an Tailored Blanks und strukturierte Prüfung der hergestellten, lokal verstärkten CFK-Bauteile. Masterarbeit, Karlsruhe, 2014.
- [Len15] Lenz, F.: Flechtpultrusion für die Grossserie. Komplex geformte und hoch belastbare Composite-Hohlstrukturen in kontinuierlichen Prozessen werkstoff- und kosteneffizient gefertigt. In Carbon Composites Magazin Ausgabe 2, 2015. 2; S. 68.
- [Lin09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [LiP01] Liu, X.-L.; Paton, R.: Evaluation of temperature and cure profiles during pultrusion of composites, Victoria, Australis, 2001.
- [LJL01] Li, J.; Joshi, S. C.; Lam, Y. C.: Optimization of die heating for pultrusion processes: 13th International Conference on Composite Materials, 2001.
- [Mar15] Pultrusion Market - Global Trends and Forecasts to 2020. by Type (Glass Fiber, Carbon Fiber and Others), by Resin Type (Polyester, Vinyl Ester, Polyurethane and Others) by Application (Industrial, Housing, Civil Engineering, Consumers and others) and by Region. Report Code: CH 3659, 2015.
- [Maz02] Mazumdar, S. K.: Composites manufacturing: materials, product, and process. CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- [MiP10] Michaeli, W.; Preuss, T.: Pultrusion of Composite Profiles – Polyurethane (PU) as Alternative Matrix System: 25th IKV International Plastics Technology Colloquium, 2010; S. 537–542.
- [Mis01] Pultruder Upgrade Provides Increased Processing Capabilities. Effects of Mold Release Additives on Pultrusion Processing and Properties, Mississippi, 2001.
- [Nel96] Nelson, P.: Pultrusion machines improve production capability. 10.1016/S0034-3617(96)91814-7. In Reinforced Plastics, 1996, 40. 3; S. 16.
- [Nöl10] Nöll, S.: Carbon Composite (CFK) - Kohlefaserverbundwerkstoffe. Technologiemonitoring. [http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+\(CFK\)+--+Kohlefaserverbundwerkstoffe](http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+(CFK)+--+Kohlefaserverbundwerkstoffe), 07.10.2016.
- [OBR15] Oertel, H.; Böhle, M.; Reviol, T.: Strömungsmechanik: für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015.
- [Owe03] Owens Corning: Pultrusion of Glass Fiber Composites. A Technical Manual, Toledo, Ohio 43659, 2003.
- [Pul10] Pultrex Ltd: The Pultrusion Process explained. <http://pultrex.com/wp-content/uploads/2013/08/Pultrusion-process.pdf>, 11.10.2016.
- [ReH17] Renkl, J.; Hinz, W.: Faster Pultrusion. Manufacturing - Pultrusion. In JEC Composites Magazine, 2017. 111; S. 38–39.
- [RHR15] Richeton, J.; Hansen, H.; Ringenbach, S.: Hybrid-Seitenschweller für ein Kraftfahrzeug und Herstellungsverfahren desselben. DE 10 2015 204 494 A1. Deutschland, 2015.
- [Ron14] Ronniger, C.-U.: Taschenbuch der statistischen Methoden. Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis, 2014.
- [Ron15] Ronniger, C.-U.: Systemanalyse - Grundlagen. http://www.crgraph.de/Systemanalyse_13.pdf, 25.01.2017.
- [Ron17] Ronniger, C.-U.: Qualität in der Tasche. Problemlösung, 5. Auflage, 2017.
- [SAZ06] Ströher, G. R.; Andrade, C. R. de; Zapparoli, E. L.: Numerical Study of the Pultrusion Process with Variable Thermal Properties: 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006, Curitiba, Brazil, 2006.
- [Sch07] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.

- [Sch16] Schunk, T. Krebs, D.: Erarbeitung eines Temperaturprofils für die kontrollierte Veraschung von CF-EP-Pultrusionsprofilen. Experteninterview, Landshut, 2016.
- [Sit15] Sitter, S. Krebs, D.: Detaillierte Bewertung der ausgewählten Parameter der ersten Ebene anhand vorgegebenem Schema. Experteninterview, Landshut, 2015.
- [Soe16] Soell, J.: Potentiale erkennen. Ausgereifte Lösungen für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern. In Carbon Composites Magazin Ausgabe 3, 2016. 3; S. 27.
- [Sta00] Starr, T.F. Hrsg.: Pultrusion for Engineers. CRC Press; Woodhead Publishing Limited, Boca Raton, FL, Cambridge, 2000.
- [StL16] Stepanski, H.; Leimenstoll, M.: Bausteine der Polyurethan-Chemie. Aliphatische Isocyanate. In (Stepanski, H.; Leimenstoll, M. Hrsg.): Polyurethan-Klebstoffe. Unterschiede und Gemeinsamkeiten. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016; S. 13–26.
- [Sum08] Sumerak, J. E.: Pultruders need some self-control. <http://www.compositesworld.com/columns/pultruders-need-some-self-control>, 16.02.2016.
- [SZC14] Selvaraj, H.; Zydek, D.; Chmaj, G.: Progress in Systems Engineering. Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Systems Engineering. Springer International Publishing, 2014.
- [TBD14] Tutum, C. C.; Baran, I.; Deb, K.: Optimum design of pultrusion process via evolutionary multi-objective optimization. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72. 9; S. 1205–1217.
- [TDM16] Truong, T.-A.; David, D.; Martin, P.: JEC Group Celebrates Composites Innovations at JEC World 2016 and Rewards 29 Champions with a JEC Innovation Award, Paris, 2016.
- [Tho02] Thorning, H.: Fiberline Design Manual, Middelfart, DK, 2002.
- [Via17] Viale, J.: Lighter, stronger and cheaper carbon profiles. In JEC Composites Magazine, 2017. 111; S. 119–120.
- [VRV+96] Valliappan, M. et al.: Die and post-die temperature and cure in graphite/epoxy composites. In Composites Part B: Engineering, 1996. 27B; S. 1–9.
- [Wed13] Wedekind, M.: Charakterisierung von Steifigkeit und Festigkeit heterogen verstärkter Verbundstrangpressprofile. Dissertation, München, 2013.
- [Wis11] Wissert, M.: Anhydrid-gehärtete Epoxidharz-Nanokomposite auf der Basis von organophilen Schichtsilikaten und Blends von isotropen mit anisotropen Füllstoffen. Dissertation, Freiburg, 2011.
- [ZiB13] Zierep, J.; Bühler, K.: Strömungsmechanik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.

Datenblätter

- [3B 12] 3B Fibreglass: 399 Direct Rovings. Advantex Glass. http://www.3b-fibreglass.com/wp-content/uploads/2012/04/399_Direct-Roving.pdf, 25.05.2017.
- [Ali15] Aliancys AG: Atlac® 430. <https://aliancys.com/products/atlacr-430/010389.pdf>, 25.05.2017.
- [Axe09] Axel Plastics Research Laboratories Inc.: Mold wiz. Int-Pul-24. <https://axelplastics.com/sites/default/files/TD%20INT-PUL-24.pdf>, 25.05.2017.
- [Bue14] Buehler: EcoMet™ /AutoMet™ 250 & 300. Probenpräparationssysteme. https://www.buehler-met.de/Brochures/German/FN01325_1013_EcoMet_AutoMet_DE.pdf, 30.05.2017.
- [Byk14] Byk-Chemie GmbH: BYK-P 9912. Prozessadditiv mit internen Trenneigenschaften für ungefüllte, gefüllte und faserverstärkte Polyurethansysteme. <https://www.byk.com/de/additive/additive-nach-namen/byk-p-9912.php>, 26.09.2017.

- [Byk15] Byk-Chemie GmbH: BYK-W 9010. Netz- und Dispergieradditiv für gefüllte, ungesättigte Polyestersysteme und Epoxidsysteme. <https://www.byk.com/de/additive/additive-nach-namen/byk-w-9010.php>, 25.05.2017.
- [Byk16] Byk-Chemie GmbH: BYK-A 515. Silikonfreier Entlüfter auf Basis von Polymeren für lösemittelhaltige und lösemittelfreie Epoxid- und PUR-Systeme sowie Klebstoffe. <https://www.byk.com/de/additive/additive-nach-namen/byk-a-515.php>, 25.05.2017.
- [Byk17] Byk-Chemie GmbH: BYK-P 9920. Additiv zur Verbesserung der Faserbenetzung in Faser-verbundwerkstoffen und zur Entschäumung von Fußbodenbeschichtungen. <https://www.byk.com/de/additive/additive-nach-namen/byk-p-9920.php>, 26.09.2017.
- [Car07] Carl Zeiss Microscopy GmbH: SteREO Discovery.V20. Das neue Spektrum. [https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/B71E82203BD19DA5C12579E600299FA3/\\$FILE/46-0128_d.pdf](https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/B71E82203BD19DA5C12579E600299FA3/$FILE/46-0128_d.pdf), 30.05.2017.
- [Car15] Carl Zeiss Microscopy GmbH: ZEISS Axio Imager 2. Your Upright Research Microscope for Advanced Imaging. [https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/C9581CEA70AEE40DC1257EB3004472DD/\\$FILE/EN_41_012_113_product-flyer_Axio-Imager-2_v2.pdf](https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/C9581CEA70AEE40DC1257EB3004472DD/$FILE/EN_41_012_113_product-flyer_Axio-Imager-2_v2.pdf), 30.05.2017.
- [Eps17] Epson: Perfection V800 Photo. Datenblatt. <https://neon.epson-europe.com/content/open/datasheet.php?id=13567&cc=DE&lc=de&name=Perfection-V800-Photo>, 30.05.2017.
- [GE 13] GE Sensing & Inspection Technologies GmbH: GE. Measurement & Control. phoenix v|tome|x L – versatile and flexible CT system. https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/geit_31205_flyer_vtomex_l_en_1213.pdf, 31.05.2017.
- [Har17] Hart, D.: Unicomplex C526. for Pultrusion. Pub number: 10009415, 2017.
- [Hun12] Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH: Advanced Materials. Light on weight - heavy on strength. Selector guide for composite resin systems. http://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/global/files/EUR_Composites%20-%20Composite%20Resin_Araldite_Epoxy_RTM.pdf, 25.05.2017.
- [Jos15] Jost Chemical Co.: Calcium Carbonate. [https://www.jostchemical.com/documentation/SDS/Calcium%20Carbonate%20\(471-34-1\).pdf](https://www.jostchemical.com/documentation/SDS/Calcium%20Carbonate%20(471-34-1).pdf), 25.05.2017.
- [MLS17] MLS GmbH: PYROfast. Höhere Präzision und zuverlässige Resultate durch exakte Temperatur-Kontrolle an jeder Probe. http://www.mls-mikrowellen.de/web/produkt_detail.php?id=1141&reload=060155, 08.06.2017.
- [Oly15] Olympus Europa SE & CO. KG: OmniScan MX2. Neu definierter Standard für die Phased-Array-Prüfung. Ultraschallprüfgerät. [http://www.olympus-ims.com/de/omniscan-mx2/#!cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Fresources](http://www.olympus-ims.com/de/omniscan-mx2/#!cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Fresources), 08.06.2017.
- [Owe08] Owens Corning: Unicomplex C526. Product Information. Pub number: 10009415, 25.05.2017.
- [Per17] Pergan GmbH: Polymerisation. mit organischen Peroxiden. https://www.pergan.com/files/downloads/Polymerisation_HP_DE.pdf, 25.05.2017.
- [Ray17] Raymant, I.: Pultrusion Machinery. Capacity Chart. <http://pultrex.com/wp-content/uploads/2017/05/Machine-Capacity-Chart-May-2017.pdf>, 23.05.2017.
- [Sae17a] Saertex GmbH & Co. KG: Multiaxiale Gelege. <https://www.saertex.com/de/produkte/multiaxiale-gelege>, 26.05.2017.
- [Sae17b] Saertex GmbH & Co. KG: Technical Datasheet. 20004290. K-C-400g/m²-260mm, 26.05.2017.
- [SGL17] SGL Technologies GmbH: Sigrafil Carbon-Endlosfasern. Composites - Fibers and Materials. http://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/products/product-groups/cf/carbon-fiber-continuous-tow/SIGRAFIL_Carbon_Endlosfasern_d.pdf, 25.05.2017.
- [Sup15] Superior Composites Company LLC: Conformat N720. <http://www.hetfleisch.de/pdf/03-Superior/01-Conformat/N-720.pdf>, 25.05.2017.

Anhang

Anhang A: Im Ishikawa-Diagramm hinzugefügte Parameter

Tabelle 17: Im Ishikawa-Diagramm hinzugefügte Parameter

Parameter	Beschreibung
Abzug	Anlagenkomponente Abzugseinheit
Abzugsgeschwindigkeit	-
Greifertyp	Raupenabzug / alternierenden Klemmgreifern
Klemmkraft	-
Abzugskraft	-
Misch- und Dosieranlage	Anlagenteil zur Matrixversorgung
Injektionsdruck	-
Anzahl Komponenten	Komponenten des Matrixsystems
Mischungsverhältnis	-
Imprägniervariante	Injektion oder Harzbad
Injektion	-
Harzbad	-
Geometrie Injektionskammer	-
Anzahl Angüsse	-
Schlauchlänge	-
Matrixtemperierung	-
Beschichtung Injektionskammer	-
Preforming	Vorformen und Positionieren der Rovings und textilen Halbzeuge
Faserverteilung	-
Fadenspannung	-
Länge Umformstrecke	-
Anzahl Einzellagen	-
Spreizung	Spreizung der Faser
Werkzeug	Formgebendes Aushärtewerkzeug
Werkstoff	-
Anzahl Heizzonen	-
Werkzeuglänge	-
Lage Trennebene	Trennebene der Werkzeughälften
Art Temperierung	-
Dorntechnologie	-
Dornlagerung	-
Dorntemperierung	-

Parameter	Beschreibung
Dorngeometrie	-
Anzahl Dorne	-
Werkzeuginnendruck	-
Werkzeugbeschichtung	-
Temperaturprofil	-
Einlaufgeometrie	Geometrie des Werkzeugeinlaufes
Querschnittgestaltung	Querschnitt des Pultrudates
Stege/Flansche	-
Überlappbereiche	Überlappbereiche des textilen Halbzeuge
Radien/Wandstärke	-
Kavitäten	Relevant für Hohlprofile
Formfüllgrad	Bspw. Anzahl Rovings
Lagenaufbau	-
Kompaktierbarkeit	-
Imprägnierbarkeit	-
Permeabilität	-
Matrix	-
Harz	A-Komponente
Härter	B-Komponente
Additive	-
Trennmittel	-
Beschleuniger	-
UD-Faser	-
Kohlenstofffaser	-
C-Fasertyp	Unterscheidung nach Festigkeit und Steifigkeit
CF-Texturierung	Bspw. Kräuselstruktur
CF-Avivage	Faserpräparationen mit Einfluss auf Garnqualität
CF-Filamentzahl	-
CF-Mpul	Mass per unit length (längenbezogene Masse)
Glasfaser	-
G-Fasertyp	Bspw. E-Glas/S-Glas
GF-Texturierung	Bspw. Kräuselstruktur
GF-Präparation	Faserpräparationen mit Einfluss auf Garnqualität
G-Titer	Längenbezogene Masse
Multiaxialgelege	-
Kohlenstoffasergelege	-
C-Winkel Einzellagen	-
C-Grammatur	Flächenbezogene Masse
C-Grammatur EL	Flächenbezogene Masse der Einzellage

Parameter	Beschreibung
C-Grammatur Ges	Gesamte Flächenbezogene Masse
C-Bindungsart	Art und Weise der Maschenbildung
Glasfasergelege	-
G-Winkel Einzellagen	-
G-Grammatur	Flächenbezogene Masse
G-Grammatur EL	Flächenbezogene Masse der Einzellage
G-Grammatur Ges	Gesamte Flächenbezogene Masse
G-Bindungsart	Art und Weise der Maschenbildung
Hybridgelege	Mischung aus GF und CF
H-Winkel Einzellagen	-
H-Grammatur	Flächenbezogene Masse
H-Grammatur EL	Flächenbezogene Masse der Einzellage
H-Grammatur Ges	Gesamte Flächenbezogene Masse
H-Bindungsart	Art und Weise der Maschenbildung
Anteil GF / CF	-

Anhang B: Differenzierung verbleibende/gekürzte Parameter

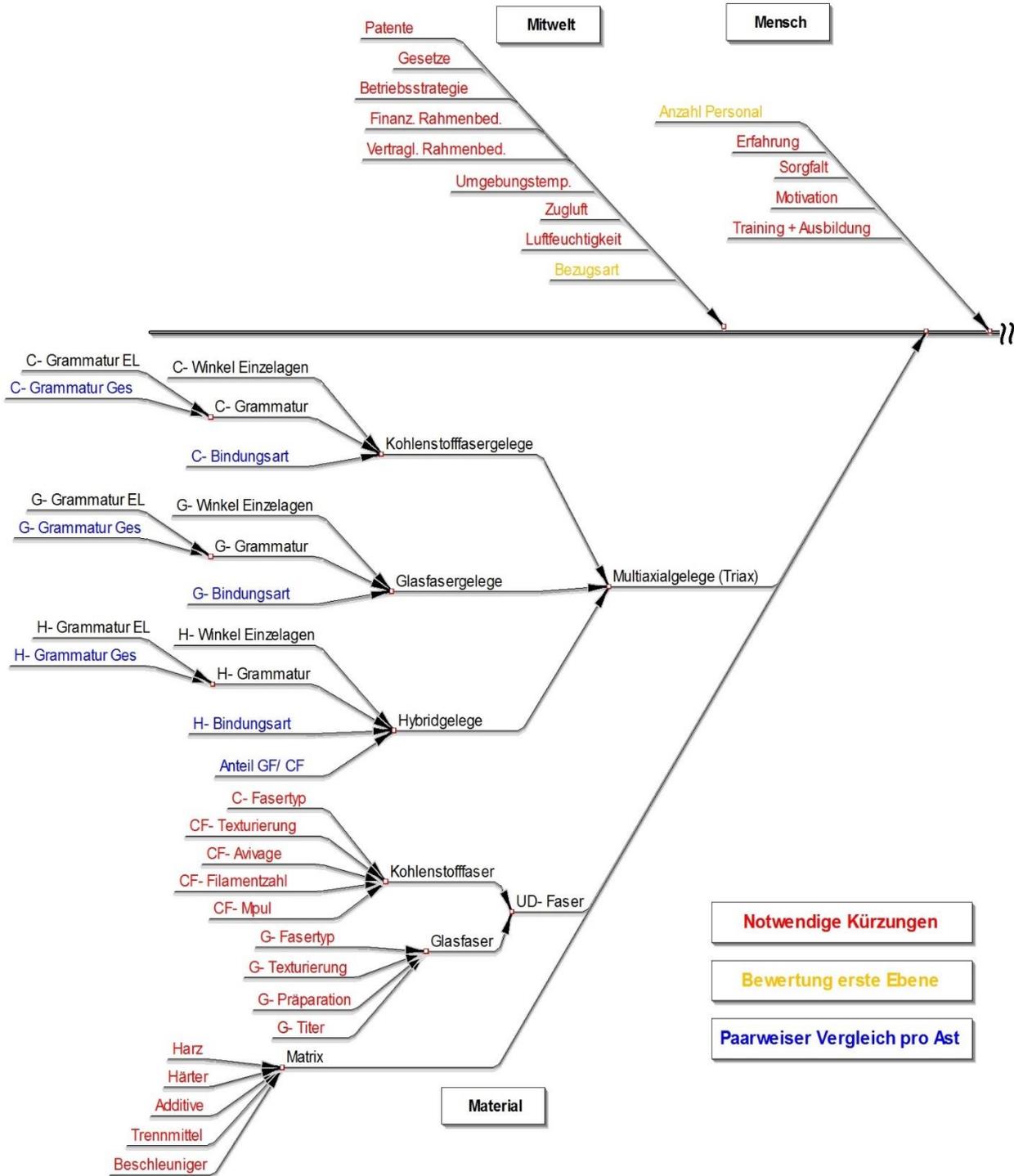


Abbildung 72: Differenzierung zwischen verbleibenden und gekürzten Parametern Teil 1

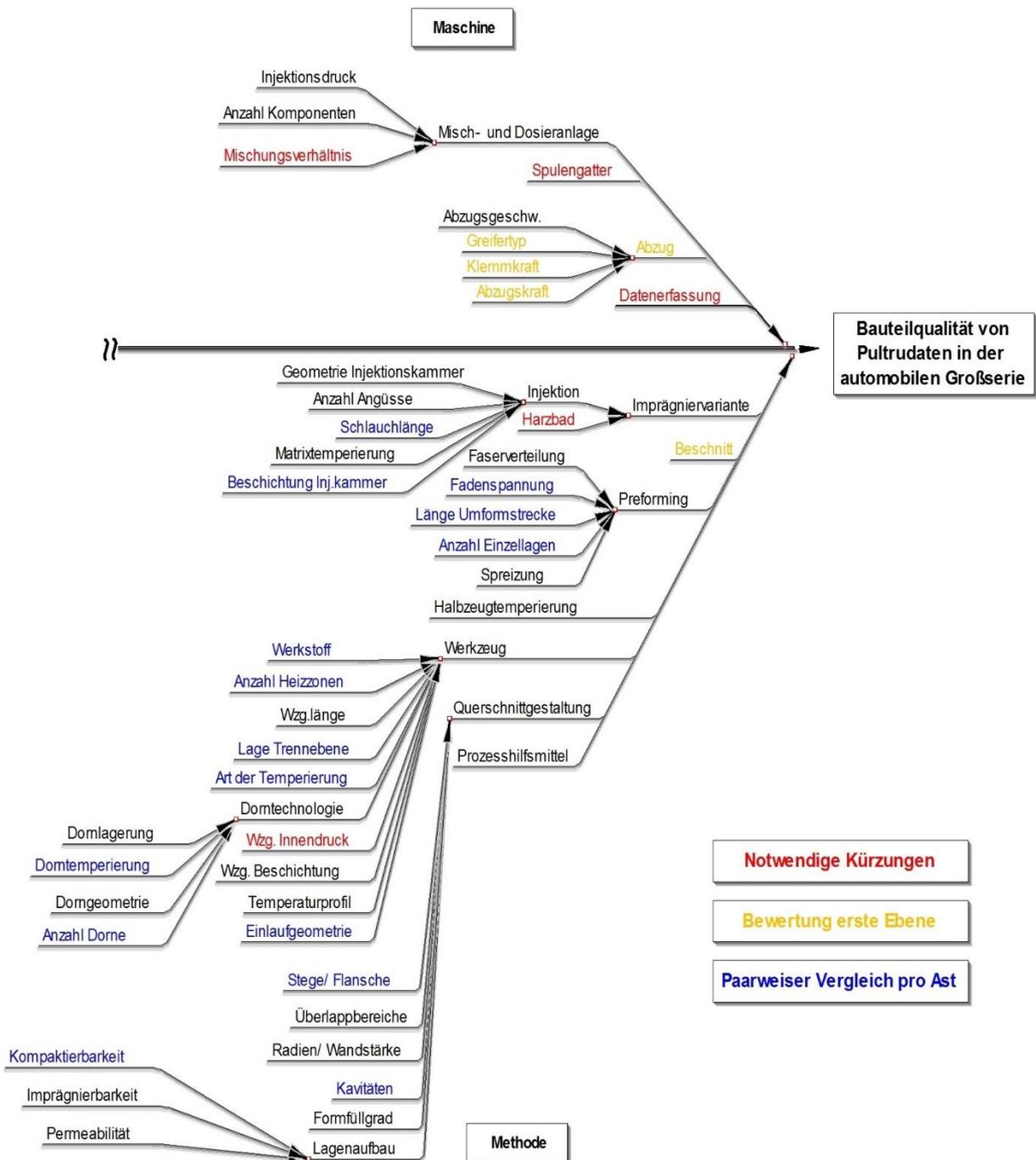


Abbildung 73: Differenzierung zwischen verbleibenden und gekürzten Parametern Teil 2

Anhang C: Ergebnis der Plausibilitätsüberprüfung

Tabelle 18: Ergebnis der Plausibilitätsüberprüfung

5M	Parameter									Summe	Anteil
		Abzug	Abzugsgeschw.	Greifertyp	Klemmkraft	Abzugskraft	Anzahl Personal	Bezugsart	Beschnitt		
Maschine	Misch- und Dosieranlage	1	-1	1	0	0	1	1	1	4	50%
	Injektionsdruck	1	0	1	0	1	1	1	1	6	75%
	Anzahl Komponenten	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	-1	-13%
Methode	Imprägniervariante	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Injektion	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Geometrie Injektionskammer	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Anzahl Angüsse	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Schlauchlänge	-1	-1	0	-1	0	0	1	0	-2	-25%
	Matrixtemperierung	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Beschichtung Inj.Kammer	0	-1	1	0	0	0	1	-1	0	0%
	Preforming	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
	Faserverteilung	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
	Fadenspannung	0	-1	1	0	1	1	1	1	4	50%
	Länge Umformstrecke	1	-1	1	0	1	1	1	1	5	63%
	Anzahl Einzellagen	0	-1	0	-1	1	1	1	1	2	25%
	Spreizung	0	0	1	0	1	1	1	1	5	63%
	Halbzeugtemperierung	1	0	1	0	1	1	1	1	6	75%
	Werkzeug	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Wzg. Werkstoff	1	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0%
	Anzahl Heizzonen	1	-1	1	0	0	1	1	1	4	50%
	Wzg.Länge	1	0	1	0	1	1	1	1	6	75%
	Lage Trennebene	-1	-1	0	-1	0	1	1	1	0	0%
	Art der Temperierung	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Dorntechnologie	0	0	1	1	1	1	1	1	6	75%
	Dorntemperierung	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Anzahl Dorne	-1	-1	0	-1	0	1	0	0	-2	-25%
Dorngeometrie	1	0	1	0	1	1	1	1	6	75%	
Dornlagerung	1	-1	1	0	1	1	1	1	5	63%	
Wzg. Beschichtung	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%	
Temperaturprofil	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%	
Einlaufgeometrie	0	-1	1	0	1	1	1	1	4	50%	

5M	Parameter										
		Abzug	Abzugsgeschw.	Greifertyp	Klemmkraft	Abzugskraft	Anzahl Personal	Bezugsart	Beschnitt	Summe	Anteil
	Querschnittgestaltung	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Stege/Flansche	1	0	1	1	0	1	1	1	6	75%
	Überlappbereiche	1	0	1	1	0	1	1	1	6	75%
	Radien/Wandstärke	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Kavitäten	1	0	1	1	0	1	1	1	6	75%
	Formfüllgrad	1	0	1	1	0	1	1	1	6	75%
	Lagenaufbau	1	0	1	0	0	1	1	1	5	63%
	Kompaktierbarkeit	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Imprägnierbarkeit	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
	Permeabilität	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
	Prozesshilfsmittel	1	-1	1	-1	0	1	1	0	2	25%
	UD-Faser	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	Kohlenstofffaser	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	Glasfaser	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	Multiaxialgelege	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	Kohlenstofffaser	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	C-Winkel Einzellagen	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	C-Grammatur	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	C-Grammatur EL	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	C-Grammatur Ges	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	C-Bindungsart	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2	25%
	Glasfaser	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
Material	G-Winkel Einzellagen	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	G-Grammatur	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	G-Grammatur EL	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	G-Grammatur Ges	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	G-Bindungsart	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2	25%
	Hybrid	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	H-Winkel Einzellagen	1	0	1	1	1	1	1	1	7	88%
	H-Grammatur	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	H-Grammatur EL	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	H-Grammatur Ges	1	-1	1	1	1	1	1	1	6	75%
	H-Bindungsart	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2	25%
	Anteil GF/CF	1	-1	1	0	0	1	1	1	4	50%

5M	Parameter	Abzug	Abzugsgeschw.	Greifertyp	Klemmkraft	Abzugskraft	Anzahl Personal	Bezugsart	Beschnitt	Summe	Anteil
	Matrix	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100%
Summe	66	53	-24	62	34	44	63	63	57		
Anteil		80%	-36%	94%	52%	67%	95%	95%	86%		

Anhang D: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche

Tabelle 19: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Werkzeug

Werkzeug	Wzg. Werkstoff	Anzahl Heizzonen	Wzg.Länge	Lage Trennebene	Art der Temperierung	Dorn temperierung	Anzahl Dorne	Dorngeometrie	Dornlagerung	Wzg. Beschichtung	Temperaturprofil	Einlaufgeometrie	Summe	Anteil
Wzg. Werkstoff	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-10	-91%
Anzahl Heizzonen	1	0	0	1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-3	-27%
Wzg.Länge	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	8	73%
Lage Trennebene	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-6	-55%
Art der Temperierung	1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-6	-55%
Dorn temperierung	1	0	-1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-9%
Anzahl Dorne	1	1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	1	-2	-18%
Dorngeometrie	1	0	-1	1	1	1	1	0	-1	-1	-1	1	3	27%
Dornlagerung	1	1	-1	1	1	1	1	0	-1	-1	-1	1	4	36%
Wzg. Beschichtung	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	9	82%
Temperaturprofil	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	9	82%
Einlaufgeometrie	1	1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-5	-45%
Summe	10	3	-8	6	6	1	2	-3	-4	-9	-9	5		
Anteil	91%	27%	-73%	55%	55%	9%	18%	-27%	-36%	-82%	-82%	45%		

Tabelle 20: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Querschnittgestaltung

Querschnittgestal- tung	Stege/Flansche	Überlappbereiche	Radien/Wandstärke	Kavitäten	Formfüllgrad	Kompaktierbarkeit	Imprägnierbarkeit	Permeabilität	Summe	Anteil
	Stege/Flansche		0	0	1	-1	-1	-1	-1	-3
Überlappbereiche	0		0	1	0	1	0	0	2	29%
Radien/Wandstärke	0	0		1	0	1	0	0	2	29%
Kavitäten	-1	-1	-1		-1	0	-1	-1	-6	-86%
Formfüllgrad	1	0	0	1		1	0	0	3	43%
Kompaktierbarkeit	1	-1	-1	0	-1		-1	0	-3	-43%
Imprägnierbarkeit	1	0	0	1	0	1		1	4	57%
Permeabilität	1	0	0	1	0	0	-1		1	14%
Summe	3	-2	-2	6	-3	3	-4	-1		
Anteil	43%	-29%	-29%	86%	-43%	43%	-57%	-14%		

Tabelle 21: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Preforming

Preforming	Faserverteilung	Fadenspannung	Länge Umformstrecke	Anzahl Einzellagen	Spreizung	Summe	Anteil
	Faserverteilung		1	1	1	0	3
Fadenspannung	-1		0	-1	0	-2	-50%
Länge Umformstrecke	-1	0		0	-1	-2	-50%
Anzahl Einzellagen	-1	1	0		-1	-1	-25%
Spreizung	0	0	1	1		2	50%
Summe	-3	2	2	1	-2		
Anteil	-75%	50%	50%	25%	-50%		

Tabelle 22: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Kohlenstofffasergelege

Kohlenstofffasergelege	C-Winkel Einzellagen	C-Grammatur EL	C-Grammatur Ges	C-Bindungsart	Summe	Anteil
C-Winkel Einzellagen		1	1	1	3	100%
C-Grammatur EL	-1		1	1	1	33%
C-Grammatur Ges	-1	-1		-1	-3	-100%
C-Bindungsart	-1	-1	1		-1	-33%
Summe	-3	-1	3	1		
Anteil	-100%	-33%	100%	33%		

Tabelle 23: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Glasfasergelege

Glasfasergelege	G-Winkel Einzellagen	G-Grammatur EL	G-Grammatur Ges	G-Bindungsart	Summe	Anteil
G-Winkel Einzellagen		1	1	1	3	100%
G-Grammatur EL	-1		1	1	1	33%
G-Grammatur Ges	-1	-1		-1	-3	-100%
G-Bindungsart	-1	-1	1		-1	-33%
Summe	-3	-1	3	1		
Anteil	-100%	-33%	100%	33%		

Tabelle 24: Ergebnis des paarweisen Vergleichs - Hybridgelege

Hybridgelege	H-Winkel Einzellagen	H-Grammatur EL	H-Grammatur Ges	H-Bindungsart	Anteil GF/CF	Summe	Anteil
H-Winkel Einzellagen		1	1	1	1	4	100%
H-Grammatur EL	-1		1	1	0	1	25%
H-Grammatur Ges	-1	-1		-1	0	-3	-75%
H-Bindungsart	-1	-1	1		0	-1	-25%
Anteil GF/CF	-1	0	0	0		-1	-25%
Summe	-4	-1	3	1	1		
Anteil	-100%	-25%	75%	25%	25%		

Anhang E: Anlagentechnik

MACHINE Reference	Px250-3T	Px500-6T/10T	Px750-8T	Px1000-8T	Px1000-12T/20T	Px1400-24T
PULLING FORCE <i>kgf</i>	3,000	6,000 10,000	8,000	8,000	12,000 20,000	24,000
PROFILE CLAMP FORCE Per puller (kgf) @ 6.5 bar air pressure Per puller (kgf) @ 10 bar air pressure Standard clamping length (mm)	9,000 14,400 660	10,500 16,750 660	21,000 33,000 660	21,000 33,000 660	31,500 50,250 660	42,000 67,000 660
PULLING AND CUTTING DIMENSIONS Width mm Standard height mm Optional height mm	250 125	500 160 230	750 160 230/300	1,000 160 230/300	1,000 230 300/350	1,400 350
PULLING SPEED – <i>Infinitely variable</i> Minimum – metres/min Maximum – metres/min	0.04 5.00	0.04 3.25	0.04 3.00	0.04 2.50	0.04 2.25	0.06 2.00
DIE HEATING ZONES <i>Self-tune temperature controllers</i> Standard <i>Option: up to 12 zones on all machines</i>	2	2	4	4	4	8
UTILITIES – <i>For standard machines</i> Electrical - kva Compressed air @ 6.5 – 10 bar m ³ /min	15 0.02	20 0.025	30 0.025	30 0.025	35 0.025	40 0.035

Abbildung 74: Basisdatenblatt Pultrusionsanlage [Ray17]

Schlüsseldaten der verwendeten Pultrusionsanlage nach [Fra14]

- Profilquerschnitte bis 500 mm x 230 mm
- Max. Abzugsgeschwindigkeit bis zu 4 m/min
- Max. Abzugskraft 10 t
- 6 Heizzonen mit jeweils 3 kW
- Flexible Zuführung von Faserhalbzeugen
- Umfangreiche Messdatenerfassung
- Spulengatter für Glasfasern (max. 288 Rovings) und Kohlenstofffasern (max. 324 Rovings)

Anhang F: Zeichnungen Werkzeug

Alle Angaben in [mm]

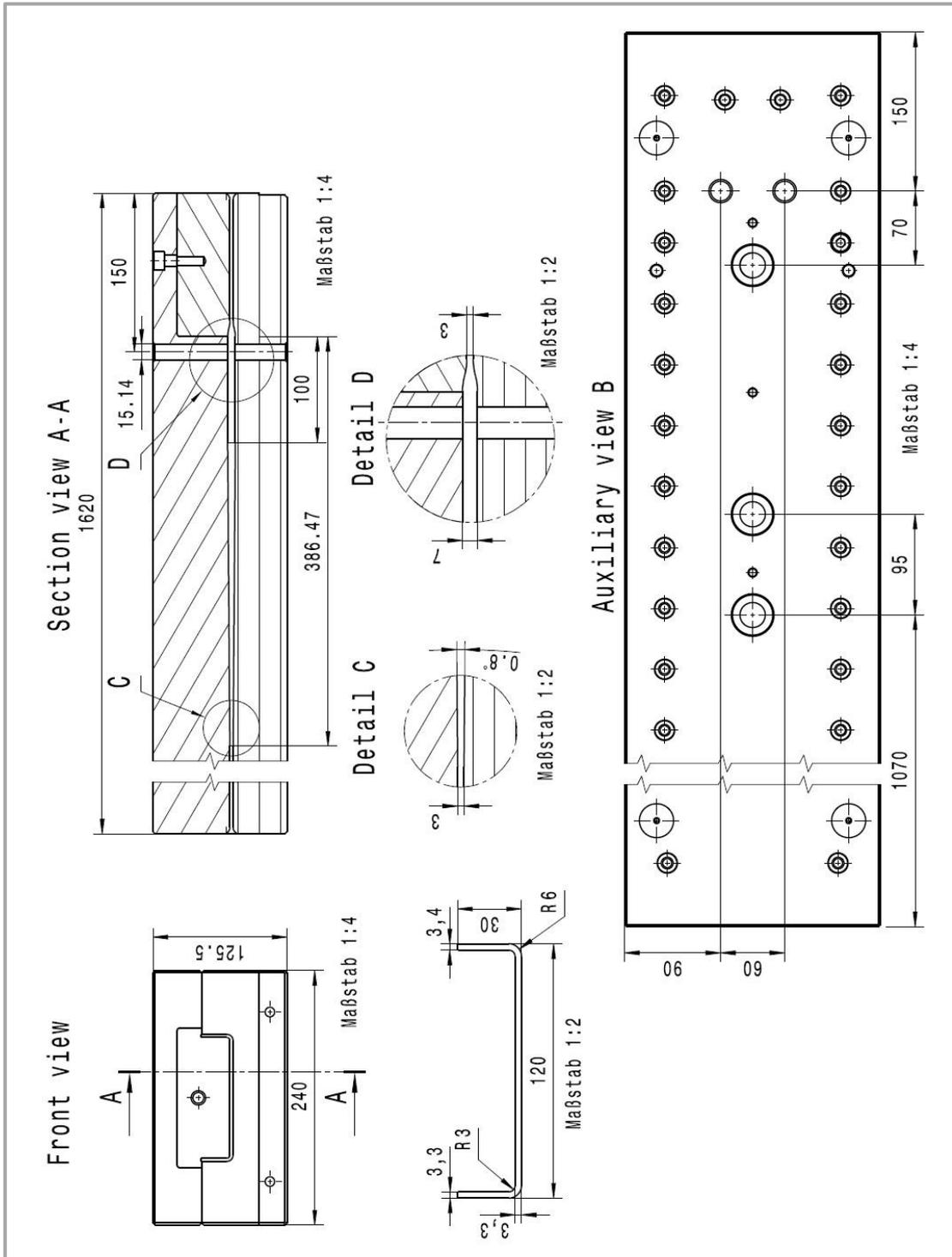


Abbildung 75: Zeichnung Werkzeug

Anhang G: Zeichnungen Faserführungsblenden

Alle Angaben in [mm]

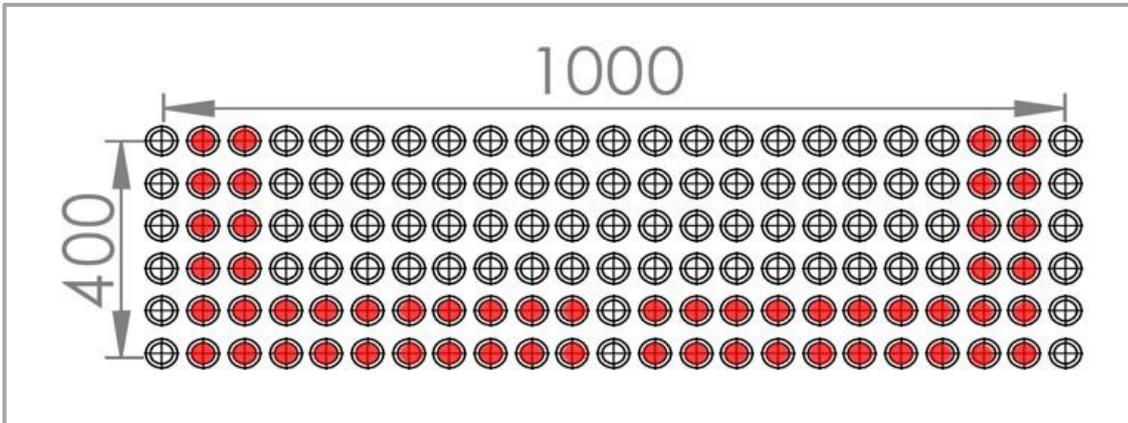


Abbildung 76: Faserführungsblende #1

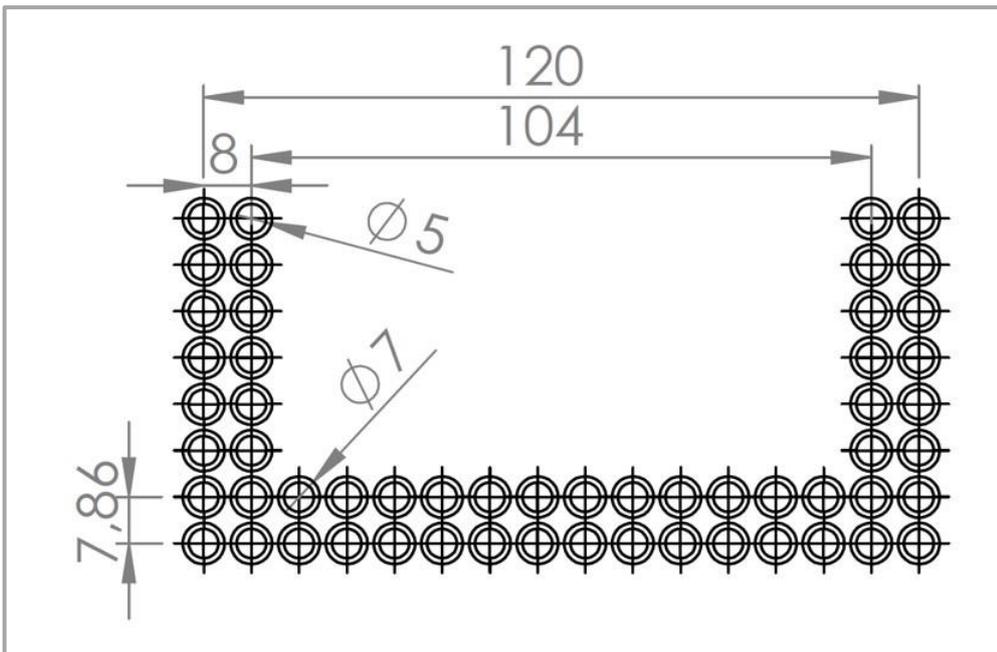


Abbildung 77: Faserführungsblende #2

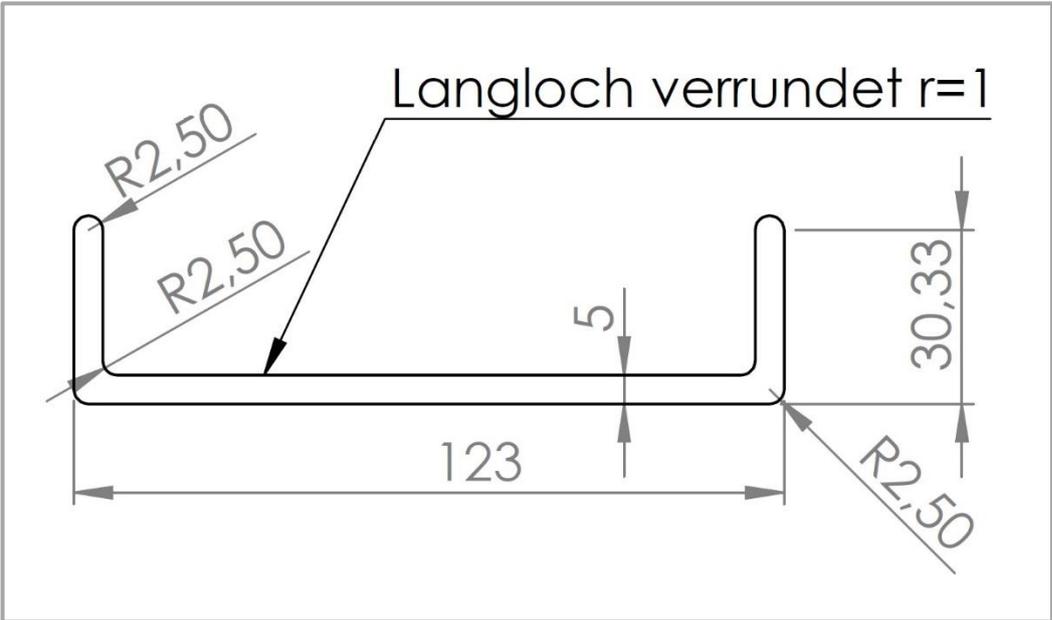


Abbildung 78: Faserführungsblende #3 und #4

Anhang H: Analyse der Heizleistungen

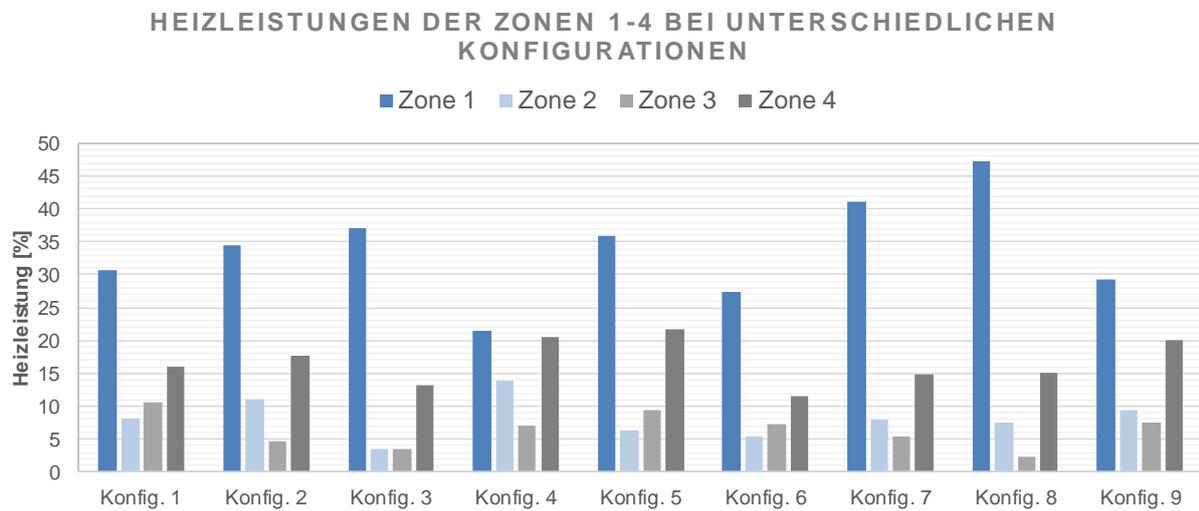


Abbildung 79: Heizleistungen der Zonen 1-4 an Aufbau 6 bei unterschiedlichen Konfigurationen

Anhang I: Anzahl Prüfungen, Messungen, Bemusterungen

Tabelle 25: Anzahl der bemusterten Bauteile je Konfiguration

Konfig.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Anzahl	5	11	9	5	10	8	6	5	8

Tabelle 26: Anzahl der Schichtdickenmessungen aus Versuchsreihe

	Gurt			Flanken		
FFG ⁸	113	119	125	113	119	125
Anzahl	44	12	60	66	24	90

Tabelle 27: Anzahl der Schichtdickenmessungen aus Vorversuchen

	Gurt						Flanken					
FFG	230	244	252	265	279	285	230	244	252	265	279	285
Anzahl	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

⁸ Formfüllgrad - festgelegt durch die Anzahl der Rovings in der Mittelebene des Profils

Patentanmeldungen

Im Rahmen dieser Arbeit entstandene Patentanmeldungen:

- DE 10 2015 205 977 Verfahren zur Herstellung eines platten- oder strangförmigen, faserverstärkten Bauteils für ein Kraftfahrzeug
(Krebs D., Arnold F., Finckh C., Bichlmeier J., Maidl F., Sitter S.)
Offenlegung am 06.10.2016
- DE 10 2016 217 928 Abzieheinheit für eine Pultrusionsvorrichtung, Pultrusionsvorrichtung sowie Verfahren zum Betreiben einer Pultrusionsvorrichtung
(Krebs D.)
Offenlegung am 22.03.2018
- DE 10 2016 221 917 Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils in einer Pultrusionsvorrichtung, Pultrusionsvorrichtung sowie Faserverbundbauteil
(Krebs D.)
Patentanmeldung eingereicht am 09.11.2016
- / Anfahrhilfe für eine Pultrusionsvorrichtung, Pultrusionsvorrichtung sowie Verfahren zur Herstellung eines faserverstärkten Profilbauteils
(Krebs D., Helm T.)
Patentanmeldung eingereicht am 09.03.2017
- / Pultrusionswerkzeug und Verfahren zur Herstellung eines faserverstärkten Profilbauteils
(Krebs D., Helm T.)
Patentanmeldung eingereicht am 06.09.2017

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Krebs
Vorname:	Dominic
Geburtsdaten:	05.07.1987
Geburtsort:	Wertheim
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Werdegang

09/2008 – 04/2014	<p>KIT Karlsruhe (ehemals Universität Karlsruhe TH)</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Bachelor Maschinenbau (B.Sc.) (Schwerpunkt: Fahrzeugtechnik)▪ Master Maschinenbau (M.Sc.) (Schwerpunkte: Produktionstechnik, Leichtbau)
10/2011 – 12/2011	<p>Bachelorarbeit bei BMW Motorsport, München</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Optimierungspotentiale hinsichtlich Leichtbau und Gewichtsverteilung im (GT-) Rennfahrzeug
11/2013 – 04/2014	<p>Masterarbeit bei BMW, Landshut</p> <ul style="list-style-type: none">▪ RTM - Versuche an Tailored Blanks und strukturierte Prüfung der hergestellten, lokal verstärkten CFK-Bauteile
07/2014 – 06/2017	<p>Promotion bei BMW, Landshut</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Grundlagen der Pultrusion zur Fertigung von FV-Bauteilen für die Anforderungen der automobilen Großserie
Seit 06/2016	<p>Selbstständig als Trainer</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Schulungen CFK-Basiswissen
Seit 07/2017	<p>Spezialist Leichtbau bei BMW, München</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Eigenschaftsverantwortlicher

München im Juli 2018

Dominic Krebs