

Herausforderungen und Lösungsansätze für die Entwicklung einer RTM-Prozessroutine

Masterarbeit

verfasst von

Filipp PÜHRINGER, BSc

erstellt am

Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Department Kunststofftechnik

Montanuniversität Leoben



**VERARBEITUNG VON
VERBUNDWERKSTOFFEN**

Betreuung: Dipl.-Ing. Harald GRÖSSING

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf SCHLEDJEWSKI

Leoben, im November 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Wissenschaftliche Arbeiten wie diese sind äußerst selten nur durch Einzelpersonen ermöglicht, sondern nahezu immer ein Produkt des Verfassers bzw. der Verfasserin und seinen/ihren Unterstützer_innen. Ich möchte hiermit den Dank, der meinen Unterstützer_innen gilt, zum Ausdruck bringen.

Ich bin meinem Betreuer Harald Grössing äußerst dankbar, der mich nicht nur bei der praktischen Versuchsdurchführung unterstützte, sondern mir neben den optimalen Arbeitsbedingungen auch immer einen interessierten Gesprächspartner für den Fachdiskurs bot.

Außerdem will ich dem Leiter des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffe (LVV) Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit und den fachlichen Input meinen Dank aussprechen.

Weiter verdienen die Mitarbeiter des LVV Dank. Im Besonderen möchte ich meinen Kollegen Ewald Fauster, Max Tonejc, Alexander Maier, Christian Schillfahrt und Spiridon Konstantopoulos für die gemeinsamen Gedankenexperimente und die Diskussion dieser danken. Weiter danke ich Stephanie Schindlegger, Georg Hirzberger, Markus Weninger, Andreas Neunhäuserer, Armin Salimi und Stuart Deane für die Unterstützung vor, während und nach praktischen Versuchen.

Hans-Jürgen Luger, Michael Kessler und Manuel Berger bin ich für die offene Bürotür und die offenen Ohren während der letzten Jahre dankbar. Weiter danke ich Andreas Kaufmann, Alexander Mayerhofer, Patrick Pazour, Peter J. Peyrer und Andrea Schmid sowie den VLK-Students, ohne die mein Studium nicht so unterhaltsam gewesen wäre.

Mein Dank richtet sich ebenfalls an meine Mitbewohner Juraj Todt, Vartan Awetisjan und Christian Santner, dabei v.a. an erstere beide, die sich nun schon einige Jahre als treue Wegbegleiter erweisen.

Ich möchte mich auch bei meinen Eltern Karin und Franz, sowie meinem Bruder Didi für die sonntäglichen, interdisziplinären Fachgespräche bedanken. Für die Geduld, v.a. in der Endphase meines Studiums, danke ich meiner Freundin Vanessa.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zum Themengebiet des Resin Transfer Moulding (RTM). Entlang der Prozesskette führt sie in den Fachbereich ein und erläutert systematisch und detailliert die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Prozessführung.

Beginnend bei der Werkzeugtechnik, wo wesentliche Anforderungen an die Werkzeuge thematisiert werden, reichen die Erläuterungen über die technisch relevantesten Fasermaterialien, der Preformingtechnik bis zu den gebräuchlichsten Matrixmaterialien. Weiter entlang der Prozesskette werden die eigentliche Harzinjektion und die damit verbundenen Fließphänomene erläutert. Schließlich werden theoretisch die Härtung und die Entformung der Bauteile behandelt.

Die durchgeführten, praktischen Versuche dieser Arbeit beschäftigen sich mit der erfolgreichen Inbetriebnahme einer 2-Komponenten Kunstharzmisch- und Dosieranlage sowie der Entwicklung einer RTM-Prozessroutine eines komplexgeformten Bauteils. Neben den gewonnen Erkenntnissen aus einer Drapierstudie und Beobachtungen zu den verwendeten Trennmitteln, werden die Einflüsse der Verstärkungsstruktur, des Massestroms, des Regeldruckniveaus, des Evakuierungsunterdrucks sowie der Harzinjektionstemperatur übersichtlich dargelegt, interpretiert und Schlüsse für die Prozessparameteroptimierung gezogen.

Weiter werden ein Beurteilungsschema zur Quantifizierung des optischen Qualitätseindrucks der hergestellten Bauteile vorgestellt, sowie die Trends der Bauteilqualitäten diskutiert. Abschließend wird eine systematische Vorgehensweise zur Findung von optimierten Prozessparametern für den RTM-Prozess vorgeschlagen.

Abstract

The present master's thesis provides a contribution to the field of Resin Transfer Moulding (RTM). It introduces to the subject following the process chain of RTM and gives insights on the requirements for successful processing.

Initially, the demands on the mould technology are considered. Further, technical relevant fibre reinforcements, the preforming step and commonly used resin materials are discussed. Besides illuminating the flow phenomena during resin injection, the curing and ultimately the demoulding of the final part are dealt with.

The performed, practical experiments focus on the commissioning of a 2-component resin mixing and dosing machine as well as on the development of a RTM process routine for a complex shaped part.

The findings of a draping study and observations on the used release agents are presented. Moreover, the influences of the fibre reinforcement, the resin throughput, the set pressure limit, the applied vacuum and the resin temperature at injection are illustrated and discussed in detail. The drawn conclusions are successfully used for process parameter optimisation.

Additionally an evaluation procedure to quantify the part quality is introduced and the observed trends of part quality throughout the experimental series are discussed. Concluding a code of best practice for determination of optimised process parameters is proposed.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Harzinjektion im Überblick	3
1.2	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	5
2	RTM – Prozesskette	7
2.1	Das RTM-Werkzeug	7
2.1.1	Anforderungen an das Werkzeug	7
2.1.2	Einteilung der RTM-Werkzeuge	9
2.1.3	Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien	12
2.1.4	Vorbereitung des Werkzeuges	13
2.2	Faserhalbzeug	13
2.2.1	Technische Fasertypen	14
2.2.2	Herstellung von Carbonfasern	15
2.2.3	Halbzeugtypen	19
2.3	Preforming	21
2.4	Polymere Matrixwerkstoffe	24
2.4.1	Matrixaufgaben und –anforderungen	24
2.4.2	Werkstoffkunde Kunststoffe	25
2.4.3	Matrixsysteme für die Injektionstechnik	26
2.4.4	Epoxidharze	27
2.5	Einlegen der Preform	30
2.6	Anbindung der Injektionsanlage	30
2.6.1	Schlauchleitung	31
2.6.2	Direkte Anbindung	31
2.7	Injektion	33
2.7.1	Strömung im porösen Medium	33
2.7.2	Injektionsstrategien	34
2.7.3	Phasen der Formfüllung	35
2.7.4	Sensorik und Prozessregelung	36
2.7.5	Füllprobleme	36

2.8	Härtung	39
2.8.1	Exothermie	39
2.8.2	Viskositätsänderung	40
2.8.3	Volumensänderung.....	41
2.9	Entformung und Nachbearbeitung	42
2.10	Arbeitssicherheit.....	43
3	Verwendete Materialien	44
3.1	Bauteil	44
3.2	Werkzeug	45
3.3	Kernmaterial.....	47
3.4	Faserhalbzeug	47
3.4.1	Flächige Textilhalbzeuge	47
3.4.2	Flechtschläuche.....	48
3.4.3	Direktes Beflechten.....	49
3.5	Matrixmaterial.....	50
3.6	Verbrauchsmaterialien und Werkzeuge	51
3.7	Maschinen und Anlagen.....	52
4	Versuchsdurchführung.....	54
4.1	Aufspannen und Vorbereitung des Werkzeugs	54
4.2	Preforming.....	56
4.3	Vorbereitung und Anbindung der Injektionsanlage.....	60
4.4	Wahl der Prozessparameter für Entlüften & Injektion.....	66
4.5	Härtung	71
4.6	Bewertungsschema.....	71

5	Ergebnisse und Diskussion	83
5.1	Drapierstudie	83
5.1.1	Flächige Textilien.....	83
5.1.2	Geflechte	86
5.1.3	Vergleich Flechten und Wickeln.....	87
5.2	Trennmittel	87
5.3	Einfluss der Verstärkungsstruktur	89
5.4	Einfluss des Massestroms.....	90
5.5	Einfluss des Regeldruckes	92
5.6	Einfluss der Evakuierung.....	99
5.7	Einfluss der Harzinjektionstemperatur.....	102
5.8	Bauteilbewertung	103
5.8.1	Lernkurve „Bauteilqualität“	106
5.8.2	Trainingseffekt	107
5.9	Prozessroutine	110
5.9.1	Ermittlung Prozessparameter	110
6	Zusammenfassung.....	115
6.1	Zusammenfassung.....	115
6.2	Schlussfolgerung.....	115
7	Literaturverzeichnis	117
8	Verwendete Symbole und Abkürzungen.....	122
9	Abbildungsverzeichnis	124
10	Tabellenverzeichnis	127
11	Anhang.....	128
11.1	Checkliste – „RTM – Prozessroutine ‚Pokal‘ “	128

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Faserverbundwerkstoffe sind der Menschheit als Materialklasse schon einige Jahrtausende bekannt. Mit Stroh verstärkte Lehmziegel wurden bereits von ägyptischen Hochkulturen vor 3000 Jahren zum Bau von Hütten verwendet [1]. Auch der am längsten vom Menschen eingesetzte Konstruktionswerkstoff stellt ein Beispiel für diese Materialklasse dar. Holz besteht in seiner Mikrostruktur aus hochfesten Zellulosefasern, welche in Lignin eingebettet sind [1]. Jedoch blieb das Potential der Faserverbunde aufgrund der fehlenden Ausgangsmaterialien ungenützt. Mit der Entdeckung der Metalle und der immer verbesserten Verhüttung der Erze löste die Klasse der metallischen Werkstoffe traditionelle Konstruktionswerkstoffe ab. Im 20. Jahrhundert wurde mit den Anfängen der Luftfahrt und in weiterer Folge mit der Raumfahrt das Verlangen der Konstrukteure nach leichteren, aber zugleich hochsteifen und hochfesten Materialien immer größer. Dies führte zu einer Art Renaissance der Faserverbundwerkstoffe in Form der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV). Obwohl FKV zu Beginn nur in diesen sehr speziellen Branchen zur Anwendung kamen, so finden Sie sich heute bereits in Sportartikeln wie Tennisschläger, Fahrradrahmen und auch in einigen automobilen Anwendungen wieder [2].

Moderne Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe bestehen aus gerichteten, keramischen oder polymeren Fasern, welche in Einbettungsmaterialien (oder Matrix) eingebettet sind. Die Matrices übernehmen dabei die Aufgabe der Krafteinleitung in die Faser, die Stützung und den Schutz der Fasern vor Umwelteinflüssen. Im überwiegenden Maße werden polymere Matrixwerkstoffe eingesetzt. Kunststoffe eignen sich ausgezeichnet für diesen Einsatz, denn sie besitzen eine niedrige Dichte (Leichtbaupotenzial) und haften gleichzeitig ausgezeichnet auf den verschiedensten Fasermaterialien [1]. Kunststoffe sind außerdem elektrische Isolatoren und korrosionsbeständig, was sich gegenüber Metallen als vorteilhaft erweisen kann. Die Fasern sind die krafttragenden Elemente. Sie bestimmen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften und Kenngrößen des Verbundes wie Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung.

Im Laufe der Jahre haben sich einige Herstellungsverfahren mit verschiedenen Vor- und Nachteilen mehr oder weniger etabliert. Hier sollen nun die wichtigsten Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Verbundwerkstoffen vorgestellt werden. Eines der ältesten Verfahren ist das Handlaminieren. Dabei werden trockene Verstärkungsstrukturen in Form von Geweben, Gelegen oder gar einzelnen Rovings per Hand in eine Form eingebracht und mit Harz getränkt. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Investitionskosten und die verhältnismäßig große Gestaltungsfreiheit. Nachteilig erweist sich der große manuelle Arbeitsaufwand und die damit einhergehende, geringe Reproduzierbarkeit, was dieses Verfahren ungeeignet macht um Großserien zu bedienen [3].

Die Prepreg-Legetechnik umfasst die Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mit vorimprägnierten („**preimpregnated**“) Fasermaterialien. Ähnlich dem Handlaminieren werden dabei die Bauteile schichtweise aufgebaut. Allerdings ist die Konsolidierung in einem dafür geeigneten Autoklaven unerlässlich, sollen Bauteile hoher Qualität hergestellt werden. Die Vorteile liegen in den hohen erzielbaren Faservolumengehalten und den damit verbundenen guten mechanischen Eigenschaften der Produkte sowie der besseren Verarbeitbarkeit der Halbzeuge durch eine gewisse Grundstabilität. Jedoch führen die langen Verweilzeiten im Autoklaven zu langen Zykluszeiten, welche eine geringe Produktivität bedingen. Daher dient dieses Verfahren hauptsächlich zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen in Kleinserien, wie bspw. im Motorsport oder der Luftfahrtindustrie üblich [1, 3].

Eine weitere Verfahrensvariante stellt die Harzinfusionstechnik dar. Die trockenen Faserhalbzeuge werden schichtweise in einer Form aufgebaut und anschließend mit einer Folie dicht verschlossen. Das Harzgemisch wird mittels einer Schlauchleitung unter die Folie an den gewünschten Punkt zugeführt. Entlüftungsstellen werden am Ende des Fließweges vorgesehen. Bei der Harzinfusion ist die Vakuumdichtigkeit des gesamten Aufbaus von größter Wichtigkeit. Es können Großbauteile (z.B.: Rotorblätter von Windkraftanlagen) mit höheren Faservolumengehalten als beim Handlaminieren möglich hergestellt werden. Nachteilig ist auch hier der große manuelle Aufwand. Sofern keine weiteren Maßnahmen getroffen werden, sind der Fließweg und die Bauteilgröße beschränkt, da die maximal erreichbare Druckdifferenz kleiner als 1 bar ist [4].

Den bisher vorgestellten Verfahren ist allen gemein, dass der große manuelle Arbeitsaufwand der geforderten Produktivität im Wege steht. Diese Tatsache stellt den Nährboden für die Entwicklung von automatisierbaren bzw. automatisierten Verfahren dar. Mit der Automation von Produktionsprozessen wird die Gestaltungsfreiheit der Bauteile meist ein Stück weit eingeschränkt. So können beim Faserwickeln vorrangig nur konvexe Bauteiloberflächen mit Fasern belegt werden. Die Fasern können nur entlang von Umschlingungskurven auf einen Wickeldorn oder einen vorgefertigten Kern abgelegt werden. Daher bilden starke Durchmesseränderungen wie bspw. Wellenabsätze eine Herausforderung, welche nur bedingt gelöst werden können. Vorteilhaft ist das kraftflussgerechte, ondulationsfreie Ablegen der Faserbündel, das zur Herstellung von Druckbehältern oft genutzt wird [5].

Betrachtet man das Ablegen einzelner Faserbündel, so ist das Tape-Legeverfahren jenes, das mit dem Wickeln artverwandt ist. Dabei wird ein faserverstärktes, bandförmiges Halbzeug automatisiert auf einer Werkzeugoberfläche abgelegt. Jedoch können hier doppelt-gekrümmte Flächen nur bedingt vollflächig belegt werden [4, 6, 7].

Neben den verschiedensten Pressverfahren, die sich auf die Umformung von Faserhalbzeugen wie Organobleche, Hybridgewebe, Prepregs oder dergleichen fokussieren, wurde ab 1950 die Harzinjektionstechnik entwickelt. Dieses Verfahren soll im nächsten Abschnitt detailliert behandelt werden [4].

1.1 Harzinjektion im Überblick

Unter Harzinjektion werden eine Reihe, sehr ähnlicher Verfahren zusammengefasst. Zu diesen Prozessen zählen im Wesentlichen das Resin Transfer Moulding (RTM) und das Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) bzw. Varianten dieser Verfahren. Unabhängig von der Verfahrenstypen ist der prinzipielle Ablauf, schematisch dargestellt in Abbildung 1, sehr ähnlich [4].

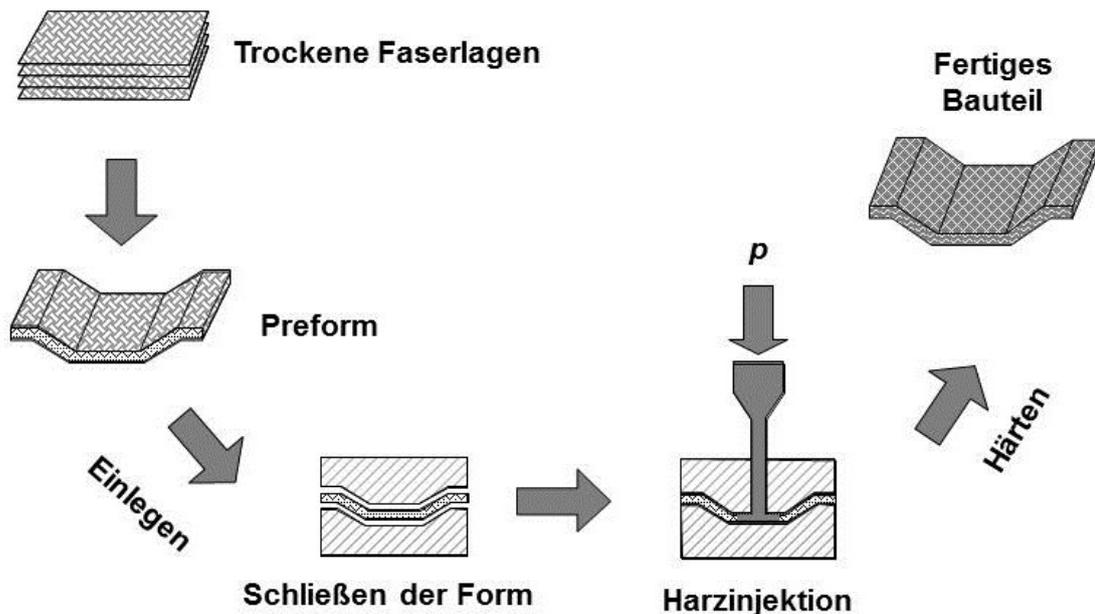


Abbildung 1: Schematischer Ablauf der Harzinjektion nach [4].

Zunächst wird die trockene Verstärkungsstruktur des Bauteils vorbereitet. Dieser Prozessschritt wird als Preforming bezeichnet und hat als Endprodukt die sogenannte Preform [5]. Bereits dieser Schritt bietet eine enorme Variationsbreite, die eine große Gestaltungsfreiheit der Preform bedingt. Textile Techniken wie Weben [8], Flechten [5, 9], Sticken [10], Nähen [5, 9], Fasersprühen [5, 9], Stricken [8] etc. lassen nahezu jede beliebige äußere endkonturnahe Form der Preform zu. Der Grad der Automatisierbarkeit dieser Techniken ist sehr hoch und erlaubt effizientes und produktives Herstellen der Faserhalbzeuge.

Nach dem Preformingschritt wird die Preform in eine entsprechende Formhöhle eines verschließbaren Werkzeugs eingelegt. Der Einlegevorgang kann als repetitive Tätigkeit durchaus von Robotern ausgeführt werden.

Die Werkzeugtechnik komplexer RTM-Werkzeuge kann weitestgehend mit typischen Spritzgusswerkzeugen verglichen werden. Vorteilhaft sind jedoch die geringeren mechanischen Anforderungen an die RTM-Werkzeuge aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Injektionsdrücke. Es können daher bereits mit wesentlich geringeren Investitionskosten Werkzeuge aus einfachen Schalen mit Verstärkungselementen hergestellt werden [5]. Die Werkzeuge erlauben durch das

Schließen eine Kompaktierung der Faserverstärkung um hohe Faservolumen-gehalte im Bauteil zu realisieren. Der nächste Schritt ist die eigentliche Harzinjektion über die Angussöffnung im Werkzeug. Das Harz-Härter-Gemisch wird dabei von einer Dosieranlage unter Druck ins Werkzeug gefördert. Entlüftungsöffnungen an den Fließwegenden erlauben das Austreten des eingeschlossenen Luftvolumens aus der Form [4].

Über einen definierten zeitlichen Temperaturverlauf, der durch Heizelemente im Werkzeug realisiert wird, reagiert das Harz-Härter-Gemisch und verfestigt. Anschließend wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil entformt. Die Entformung kann in weiten Bereichen durch den Einsatz von Entnahmerobotern automatisiert ablaufen. Für verbesserte Entformbarkeit können Auswerferstifte im Werkzeug die Entnahme unterstützen. Die Bauteile können je nach Werkzeug- und Prozessdesign nachbearbeitungsfrei entformt werden [4, 11].

Diese Prozessfamilie stellt somit geeignete Verfahren für die Bedienung von Großserien zur Verfügung. Die Harzsysteme, die Werkzeugtechnik und der Automatisierungsgrad sind Schlüsselgrößen für Reduzierung der Zykluszeit und somit für die kosteneffiziente Herstellung von qualitativ hochwertigen Komponenten in großen Stückzahlen [4]. So besitzt die Harzinjektionstechnik großes Innovationspotenzial und erhält wissenschaftliche Aufmerksamkeit, die die Weiterentwicklung dieser Prozessfamilie zum Ziel hat. Diese Arbeit liefert einen Beitrag zu dieser Forschungstätigkeit.

1.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht die RTM-Prozesskette. Entlang dieser Kette sollen die einzelnen Teilschritte beleuchtet werden. So wird zunächst die Werkzeugtechnik typischer RTM-Werkzeuge thematisiert. Im Rahmen der theoretischen Erläuterungen soll ein Fokus auf die Herstellung von Carbonfasern und deren Weiterverarbeitung zu textilen Halbzeugen gerichtet werden.

Hauptaugenmerk der praktischen Versuche liegt auf der Inbetriebnahme der am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen (LVV) neu erworbenen Harzdosier- und -mischanlage vom Typ Nodopur VS-2K der Firma Ing. Büro Tartler

GmbH. Im Zuge dieser Versuche soll ein Prozessfenster für ein komplexes Bauteil mit Schaumkern gefunden bzw. abgesteckt werden, welches in einem Harzinjektionsverfahren hergestellt werden soll. Abbildung 2 stellt ein Bauteil in seinem Endzustand dar. Zu erkennen sind an den axialen Enden ein rotationssymmetrischer Bereich sowie ein Bereich mit quadratischem Querschnitt. Außerdem befindet sich in Bauteilmitte ein Doppelkegel mit entsprechenden Verschneidungsbereichen.



Abbildung 2: Darstellung eines der hergestellten Bauteile.

Aufgrund dieser komplexen Geometrie sollen verschiedene Textilarchitekturen bezüglich deren Drapierverhalten untersucht und bewertet werden. In einer Drapierstudie soll die geeignetste Preformvariante ermittelt und mit anschließender Harzinjektion verifiziert werden.

Der Optimierungsvorgang für die Harzinjektion selbst hat ein systematisches Vorgehen als Grundlage. Als Ergebnis der Versuchsserie sollen die wesentlichen Einflussgrößen auf den Prozess dargestellt und eine Prozessroutine für zukünftige Projekte entwickelt werden.

2 RTM – PROZESSKETTE

In diesem Abschnitt soll anhand der RTM-Prozesskette eine detaillierte Darstellung des Verfahrensablaufes gegeben werden. Schritt für Schritt werden die theoretischen Grundlagen zu den Punkten vorgebracht.

2.1 Das RTM-Werkzeug

Unter dem Begriff Werkzeug versteht man im Allgemeinen einen für bestimmte Zwecke geformten Gegenstand, mit dessen Hilfe etwas bearbeitet oder hergestellt werden kann. In der Kunststoffverarbeitung versteht man im Speziellen die formgebende Vorrichtung zur Herstellung von Bauteilen aus Kunststoffen jeglicher Art. In diese Kategorie fallen auch RTM-Werkzeuge.

2.1.1 Anforderungen an das Werkzeug

Die Anforderungen an ein RTM-Werkzeug sind vielseitig. Wie in Tabelle 1 dargestellt, lassen sie sich jedoch zu Anforderungen, die direkt aus dem Prozessablauf entstehen bzw. zu allgemeinen Anforderungen an das Werkzeug und das Werkzeugdesign, zusammenfassen.

Tabelle 1: Aufgaben eines RTM – Werkzeuges.

<u>Direkte Anforderungen</u>	<u>Allgemeine Anforderungen</u>
<ul style="list-style-type: none">• Aufnahme der Preform	<ul style="list-style-type: none">• Maßhaltigkeit / Steifigkeit
<ul style="list-style-type: none">• Formgebung	<ul style="list-style-type: none">• Gewicht
<ul style="list-style-type: none">• Angussleitung	<ul style="list-style-type: none">• Reproduzierbarkeit
<ul style="list-style-type: none">• Dichtheit	<ul style="list-style-type: none">• Oberflächengüte
<ul style="list-style-type: none">• Entlüftung	<ul style="list-style-type: none">• Medienbeständigkeit
<ul style="list-style-type: none">• Freigeben von Hinterschnitten	<ul style="list-style-type: none">• Korrosionsbeständigkeit
<ul style="list-style-type: none">• Entnahmevorrichtung	<ul style="list-style-type: none">• Verschleißfestigkeit
<ul style="list-style-type: none">• Temperaturführung	<ul style="list-style-type: none">• Wirtschaftlichkeit

Die Aufnahme der Preform und die Formgebung werden durch die Gestaltung der Werkzeughöhlung (oder Kavität) bewerkstelligt. Sie muss derartig gestaltet sein, dass das Einlegen der Preform bei geöffnetem Werkzeug ermöglicht wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die äußere Form der Preform und das Werkzeugdesign aufeinander abgestimmt werden. Faserenden im Bereich der Werkzeuggrenzflächen können zum Hineinragen der Fasern in den Werkzeugspalt führen, was in weiterer Folge Werkzeugschäden durch die hohe örtliche Flächenpressung bedeuten kann [9]. Deshalb sollte in diesen kritischen Bereichen wenn möglich auf das Trennen von Fasern verzichtet werden. Abhilfe können außerdem Tauchkantenwerkzeuge bringen, jedoch sind diese mit höheren Investitionen verbunden als Werkzeuge ohne Tauchkante [4].

Für die Injektion ist die Aufnahme der Angussystems essentiell. Es dient zur Zuführung des fließfähigen Matrixmaterials. Die verschiedensten Konstruktionsvarianten des Angussystems werden in Kapitel 2.6 detailliert behandelt. Die Lage der Injektions- und Entlüftungspunkte hat auf das Füllverhalten und die Formfüllzeit großen Einfluss. Daher stellt die Optimierung dieser Positionen einen wesentlichen Teil des Werkzeugdesigns dar, welcher direkten Einfluss auf die Teilequalität hat [5, 12].

Die Dichtheit und Entlüftung der Werkzeugkavität wird v. a. durch die Fertigungstoleranzen bestimmt. An den Fließwegenden muss eine ausreichende Entlüftungsmöglichkeit vorgesehen werden, da sonst das Luftvolumen, welches sich zu Beginn der Injektion in der Kavität befindet, nicht verdrängt werden kann und sich somit Trockenstellen in der Kavität bilden können. Es soll hier angemerkt werden, dass die Toleranzgrenzen für Dichtigkeit aufgrund der niedrigeren Viskosität der eingebrachten Masse wesentlich enger liegen als bei Spritzgusswerkzeugen. In der Trennebene werden Elastomerdichtungen bspw. aus Silikonschläuchen oder Gummidichtungen eingesetzt, um die Harzleckage einzuschränken und bei vakuumunterstützten Prozessen entsprechende Dichtigkeit gewährleisten zu können [5, 9].

Das Freigeben von Hinterschnitten kann durch Schieber- und Backenelemente ähnlich der Spritzgusswerkzeugtechnik realisiert werden. Besonderes Augenmerk

sollte auf die Spaltmaße gegeben werden, um ein Eindringen des Matrixmaterials und folglich ein Festkleben der Einsätze zu verhindern. Weiter kann die Entformung durch Auswerferstifte und Abstreiferplatten unterstützt werden.

Ein wesentlicher Verfahrensparameter des RTM ist die Werkzeugoberflächentemperatur, oder genauer der Wärmestrom [5] vom Werkzeug in das Matrixmaterial, da die Vernetzung des Matrixmaterials bei erhöhten Temperaturen beschleunigt abläuft. Einfluss auf den Wärmestrom besitzt v.a. die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien. Für die Zykluszeitoptimierung muss das Werkzeug mit ausreichend effizienten Temperierelementen ausgestattet sein.

Allgemeine Anforderungen an das Werkzeug sind außerdem die Steifigkeit bzw. die Maßhaltigkeit, die Reproduzierbarkeit des Prozesses sowie die Oberflächengüte des hergestellten Produktes. Diese Anforderungen ergeben sich v. a. in Hinblick auf Einhaltung von Qualitätskriterien. Medien-, Korrosions- und Verschleißbeständigkeit bestimmen maßgeblich die Lebensdauer eines Werkzeugs und werden daher auch in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Werkzeugdesigns von großer Bedeutung sein. Die erwartete Werkzeugstandzeit und Seriengröße bedingt die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit von komplexeren und meist teureren Lösungen.

2.1.2 Einteilung der RTM-Werkzeuge

Wie in den vorhergegangenen Abschnitten angedeutet, ist die Realisierung eines Werkzeuges stark abhängig von technischen und wirtschaftlichen Faktoren. Daher ergeben sich verschiedene Werkzeugtypen. RTM-Werkzeuge können nach mehreren Gesichtspunkten klassifiziert werden.

- Art der Herstellung

Hier kann zwischen direkter und indirekter Herstellung, sowie einer Mischform der beiden Varianten unterschieden werden. Bei der direkten Werkzeugherstellung werden die Werkzeugteile mit Hilfe von CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) aus dem Werkzeugmaterial spanabhebend gefertigt [5]. Unter indirekter Herstellung versteht man die Fertigung eines Werkzeuges unter Zuhilfenahme eines „Mastermo-

dells“. Die Werkzeughälften werden dann separat durch Gießen, Laminieren etc. hergestellt [5]. Bei der hybriden Methode werden die indirekt hergestellten Formhälften abschließend mit Hilfe von CAM überarbeitet [5, 9].

- Größe der Bauteile

Diese Klassifizierung wird meist nur sehr vage vorgenommen. Generell wird die herstellbare Bauteilgröße als „klein bis sehr groß“ angegeben [5, 9, 13]. Bei großen Bauteilen orientiert sich die Zykluszeit meist nach der Füllzeit. Lange Fließwege bei geringem maximalem Injektionsdruck bewirken eine deutliche Füllzeitverlängerung. Für große Bauteile sehen Gebart und Strömbeck in [5] die Notwendigkeit Mittel zur Schließkraftreduzierung zu ergreifen. Daraus resultieren niedrige Faservolumenanteile, da sie zum Einen keinen hohen Kompaktierungsdruck erfordern und zum Anderen niedrige Injektionsdrücke bedingen. Niedrige Injektionsdrücke können auch durch geeignete Wahl der Injektionsstrategie [14, 15] bzw. Lage der Angusspunkte [12, 15] erreicht werden, mehr dazu jedoch in Kapitel 2.7.2.

Im Umkehrschluss bedeuten „kleine Bauteile“, dass die zykluszeitbestimmende Größe nicht die Formfüllung ist. Meistens kann hier die Härtung als zykluszeitrelevant betrachtet werden [4]. Daher ist hier bei der Prozessoptimierung besonders auf die Harzkinetik einzugehen.

- Werkzeugmaterial

Aufgrund der niedrigen Injektionsdrücke und daher moderaten wirksamen Kräften während der Injektion eignen sich neben den typischen metallischen Werkzeugmaterialien, wie klassischen Werkzeugstählen [9], Aluminiumwerkstoffen [9], sowie Nickel- und Zinklegierungen [9, 16], auch Kunstharz-Werkzeuge [1, 5, 9]. **Kunstharz-Werkzeuge** werden oft für Kleinserien eingesetzt, da sie mit niedrigen Investitionskosten verbunden sind und nur geringe Standzeiten vorweisen [9]. Sie besitzen nur schlechte bis moderate Wärmeleitfähigkeiten, was die Steuerung der Temperaturentwicklung stark einschränkt. Außerdem sind die ertragbaren Gebrauchstemperaturen dieser Werkzeuge deutlich niedriger als die der metallischen Ver-

treter, wodurch die Produktivität stark eingeschränkt ist [1, 5]. Jedoch sind diese Werkzeuge aufgrund der niedrigen Dichte des Ausgangsmaterials wesentlich leichter und erfordern daher geringere maschinelle Ausrüstung. So werden bei gleicher Bauteilgröße für das Werkzeughandling von metallischen Werkzeugen mechanische und hydraulische Vorrichtungen, wie Kräne oder Pressen notwendig, während bei Kunstharzformen ein manuelles Positionieren und Klemmen/Verschrauben an dem Werkzeugumfang der Formhälften meist genügt [5, 9]. Die Lebensdauer und Produktivität dieser Werkzeugklasse ist stark beschränkt. Die erzielbare Oberflächenqualität hängt stark vom Urmodell ab und kann sehr hohe Qualitäten erreichen. Jedoch ist der Werkzeugverschleiß, der die Oberflächenqualität herabsetzen kann, nicht zu vernachlässigen.

Werkzeuge aus **Nickellegierungen** werden in Form von Schalenwerkzeugen eingesetzt [9, 16]. Die Vorteile gegenüber Kunstharzwerkzeugen sind die stark erhöhte Oberflächenqualität, die verbesserte Standzeit, das schnellere thermische Ansprechverhalten und die höheren ertragbaren Injektionsdrücke. Die Produktion erreicht mit Nickelschalenwerkzeugen ein Volumen 20.000 – 40.000 Teile pro Jahr [9].

Aus **Zinkgusslegierungen** werden ebenfalls RTM-Werkzeuge in einem indirekten oder hybriden Verfahren hergestellt. Sie bieten ähnliche Eigenschaften wie Nickelwerkzeuge, jedoch sind Zinkgusswerkzeuge nicht so anfällig auf Verzug. Weitere eingesetzte Gusswerkstoffe sind Aluminium und Gussstahl. Diese beiden Varianten werden häufig als Schalenwerkzeuge ausgeführt [9].

Für große Produktionsvolumina bzw. bei komplexen, mehrteiligen Werkzeugen kommen grundsätzlich nur spanend, direkt hergestellte **Stahlwerkzeuge** in Frage. Die Lebensdauer solcher Werkzeuge liegt zwischen 500.000 bis 1.000.000 Teilen. Um die hohen Investitionskosten, die mit diesen Werkzeugen verbunden sind, zu rechtfertigen, sollten jährliche Produktionsmengen von 10.000-50.000 Stk. erreicht werden [9].

Für Vorserien- und Prototypenwerkzeuge kommen vermehrt Werkzeuge, welche aus massiven **Aluminium**blöcken spanend hergestellt werden zum Einsatz. Verantwortlich dafür sind v.a. die Weiterentwicklungen in der Zerspanungstechnik. Im Vergleich zu Stählen werden höhere Schnittgeschwindigkeiten erreicht. Vorteilhaft sind außerdem die niedrigere Dichte, die Korrosionsbeständigkeit und die erhöhte Wärmeleitfähigkeit. Als nachteilig erweisen sich das niedrigere Steifigkeitsniveau, die geringere Standzeit und die größere Wärmeausdehnung dieser Materialien [4].

In Tabelle 2 sind die Eigenschaften der verschiedensten Werkzeugmaterialien übersichtsmäßig zusammen gefasst.

Tabelle 2: Übersicht der verschiedenen Werkzeugmaterialien [5, 9].

Werkstoff	Serie [a ⁻¹]	Oberfläche	Investition	Standzeit	Komplexität
Kunstharz	Prototyp	abbauend	- -	- -	- -
Aluminium	wenige 100	matt	-	-	-
Zinkguss	bis 20.000 - 40.000	matt	+	+	+
Nickel	bis 20.000 - 40.000	hochglanz	+	-	+
Stahl	ab 10.000 - 50.000	hochglanz	++	++	++

2.1.3 Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien

Bei der Entwicklung eines Werkzeugs ist besonderes Augenmerk auf die verfahrensgerechte Auslegung der Konstruktion zu legen. Die Lage der Anguss- und Entlüftungspunkte hat neben der Preformbeschaffenheit den größten Einfluss auf die Charakteristik der Formfüllung [12].

Für Ecken und Kanten der Bauteilgeometrie gilt, wie für alle FKV-Bauteile, **Radien möglichst groß** zu wählen. Für den RTM-Prozess primär ist der dadurch verringerte Kanteneinfluss auf die Formfüllung zu nennen. Außerdem sind sanfte Rundungen kraftflussgerechter, was bei Belastung Spannungsspitzen im Bauteil ver-

ringert bzw. vermeidet. Als Faustformel gilt, dass Radien etwa der dreifachen Bauteildicke entsprechen sollten [5]. Daher ist es ratsam Werkzeug- und Bauteildesign unterstützt durch Füll- und Struktursimulationen parallel abzuwickeln, um eventuelle kritische Stellen der Bauteilgeometrie rechtzeitig anpassen zu können.

Da FKV-Bauteile verhältnismäßig teuer in der Herstellung sind, ist eine hohe Funktionsintegration anzustreben um einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber konventioneller Konstruktionen zu erzielen. Durch die Einarbeitung von Kraffteinleitungselementen, wie Metallinserts oder gezielter Platzierung von Verstärkungselementen durch diverse Preforming-Techniken können Baugruppen durch ein einziges FKV-Bauteil ersetzt werden [1, 9].

2.1.4 Vorbereitung des Werkzeuges

Vor dem Beschicken des Werkzeuges muss es hinreichend gereinigt sein. Je nach verwendetem Werkzeugmaterial führen Verunreinigungen der Trennebene (wie Faserreste, etc.) zu verschieden starker Werkzeugschädigung [9]. Dieser Schritt kann bei guter Prozessführung eventuell komplett entfallen. Es empfiehlt sich jedoch Reinigungsintervalle des Werkzeuges vorzusehen. Nach dem Reinigungsschritt muss das Werkzeug mit einem Trennmittel versehen werden. Die Verwendung der verschiedenen Trennmitteltypen richtet sich nach der Werkzeugmaterial–Harzsystem Paarung und der Güte des Trennmittels. Einige Trennmittel erreichen nämlich eine Wirksamkeit über mehrere Zyklen, wodurch bei Zykluszeit und Trennmittelverbrauch eingespart werden kann.

2.2 Faserhalbzeug

Unter „Halbzeug“ versteht man im Allgemeinen Halbfertigprodukte wie bspw. Profile, Platten, Rohre etc. In der FKV-Verarbeitung sind jedoch mehrere Verwendungen des Begriffs gebräuchlich. So werden Vorprodukte aus Fasern wie Einzelfilamente, Rovings (Filamentbündel), Gewebe, Gelege o. ä. je nach Anwendung als Halbzeug bezeichnet. Diese können auch mit Matrixmaterial vorimprägniert werden. Für die so entstehenden Prepregs („preimpregnated“) ist ebenfalls der Begriff „Halbzeug“ gebräuchlich. Schließlich können aus diesen Materialien Produkte wie Rohre, Platten und Profile hergestellt werden, die allgemein als Halbzeuge ver-

standen werden [14]. So ist es besonders wichtig eindeutig klarzustellen um welchen Typ Halbzeug es sich handelt. Folgenden soll v. a. die zuerst genannten Typen von Faservorprodukten behandelt werden.

2.2.1 Technische Fasertypen

Grundlage eines jeden Faserhalbzeuges ist das Einzelfilament. Die Eigenschaften der Filamente bestimmen in großem Maß die Charakteristik der Faserhalbzeuge und somit die Verbundeigenschaften [1]. Daher werden hier die wichtigsten, technischen Fasertypen im Überblick vorgestellt und die jeweiligen Eigenschaften hervorgehoben.

- Glasfasern

Die Herstellung von Textilglasfasern erfolgt nach dem Düsenzieh-Verfahren. Dabei wird eine Glasschmelze über Spinn Düsen zu Fäden von anfänglich etwa 2 mm Durchmesser gesponnen. Durch Verstrecken der zähflüssigen Fäden werden sie bis auf die 40.000fache Länge gestreckt und der gewünschte Durchmesser zwischen 3,5 bis 24 µm eingestellt [3]. Glasfasern zeichnen sich mechanisch durch die hohe Zugfestigkeit, aber gleichzeitig moderater Steifigkeit aus. Diese Eigenschaften ermöglichen den Bau von flexiblen, hochfesten Strukturen (z.B.: Blattfedern) [1]. Jedoch die nahezu wichtigste Eigenschaft von Glasfasern ist der im Vergleich zu anderen Faserwerkstoffen niedrige Preis [1, 3].

- Aramidfasern

Hierbei handelt es sich um Fasern aus aromatischen Polyamiden wie bspw. Polyphenylenterephthal-amid (PPTA), besser bekannt unter dem Markennamen „Kelvar“ der Firma DuPont. Die Fasern können nicht in einem Schmelze-Spinnverfahren hergestellt werden, da die Schmelztemperatur über der Zersetzungstemperatur liegt. Daher kommen Lösungsmittel wie konzentrierte Schwefelsäure zum Einsatz. Aramidfasern zeichnen sich durch ihre besonders niedrige Dichte und ihr großes Energieaufnahmevermögen aus. Jedoch sind die Fasern stark anisotrop und weisen eine niedrige Druckfestigkeit auf [1, 3].

- Carbonfasern

Carbonfasern (oder auch Kohlenstofffasern bzw. C-Fasern) werden auf verschiedenste Weisen hergestellt. Die einzelnen, technisch relevanten Verfahren werden im Abschnitt 2.2.2 detailliert behandelt. Generell gilt für alle Carbonfasertypen, dass sie hochsteif und hochfest sind. Weiter zeichnen sie sich durch geringe Dichte, ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit und guter dynamischer Eigenschaften aus [1, 3].

- Thermoplastfasern

Aktuell spielen Thermoplastfasern als krafttragende Fasern in FKV-Bauteilen eine eher untergeordnete Rolle. Dies dürfte auf die Kriechneigung der Werkstoffe zurückzuführen sein. Es werden hochverstreckte Polyethylen-, Polyester- (PET, PBT) und Polyamid-Typen angeboten. Häufig werden Thermoplastfasern mit anderen Verstärkungsfasertypen zu Hybridrovingen verarbeitet, welche die Herstellung von faserverstärkten, thermoplastischen Materialien erlaubt [3].

- Naturfasern

Aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen eignen sich diese Fasern v. a. aufgrund ihrer niedrigen Dichte für Leichtbauanwendungen mit Fokus auf den Umweltaspekt. Typische Vertreter sind Flachs, Hanf- und Sisalfasern [17].

2.2.2 Herstellung von Carbonfasern

Die Verfahren zur Herstellung von Carbonfasern beruhen im Wesentlichen auf drei Prozessstufen, der Bereitstellung der organischen Ausgangsmaterialien, der Carbonisierung dieser und der abschließenden Graphitisierung [3]. Als Ausgangsstoffe haben sich Zellulosefasern, Polyacrylnitrilfasern und Steinkohlenteer- bzw. Erdölpeche etabliert. Lediglich die letzteren drei sind für die Herstellung von Fasern für die FKV-Produktion gebräuchlich. Zellulosebasierte Fasern weisen vermehrt Imperfektionen auf und sind daher bezüglich der mechanischen Eigenschaften

den anderen Carbonfasertypen unterlegen. Bereits in den frühen 60er Jahren des 20. Jahrhunderts war bekannt, dass eine atomare Einzelschicht von Kohlenstoffatomen in graphitischer Anordnung theoretisch einen Zugmodul im Bereich von 1000 GPa erreichen kann [1, 18]. Heute kennt man diese Struktur unter dem Namen Graphen [19], welche eine regelrechte Flut an wissenschaftlichem Interesse seit seiner Isolierung im Jahr 2004 ausgelöst hat. Bei der Herstellung von Carbonfasern drehen sich alle Bestrebungen um die optimale Ausnützung der Eigenschaften dieser Graphitschichten.

Für die Herstellung von Carbonfasern stellt die Pyrolyse von Polyacrylnitril (PAN) das mit Abstand am gebräuchlichsten Verfahren dar [1]. Abbildung 3 zeigt die chemische Struktur von PAN. Es ist deutlich die Nitrilgruppe $-(C\equiv N)$ zu erkennen.

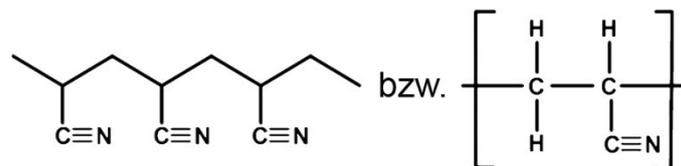


Abbildung 3: Chemische Struktur von Polyacrylnitril [20].

Zunächst wird der PAN-Precursor, wie die Rohfaser auch genannt wird, in mehreren Stufen bei etwa 200 bis 300 °C und mechanischer Spannung stabilisiert. Während der Stabilisierung laufen eine Reihe von chemischen Prozessen ab, was diesen Prozessschritt zeit- und kostenintensiv macht. Dehydrierung und Zyklisierung führen zu einem sogenannten „Leiterpolymer“ (Abbildung 4), das temperaturstabil ist. Typische Prozesse laufen unter oxidativer Atmosphäre (meist Luft) ab. Deshalb spricht man auch von oxidativer Stabilisierung der PAN-Faser [3, 20].

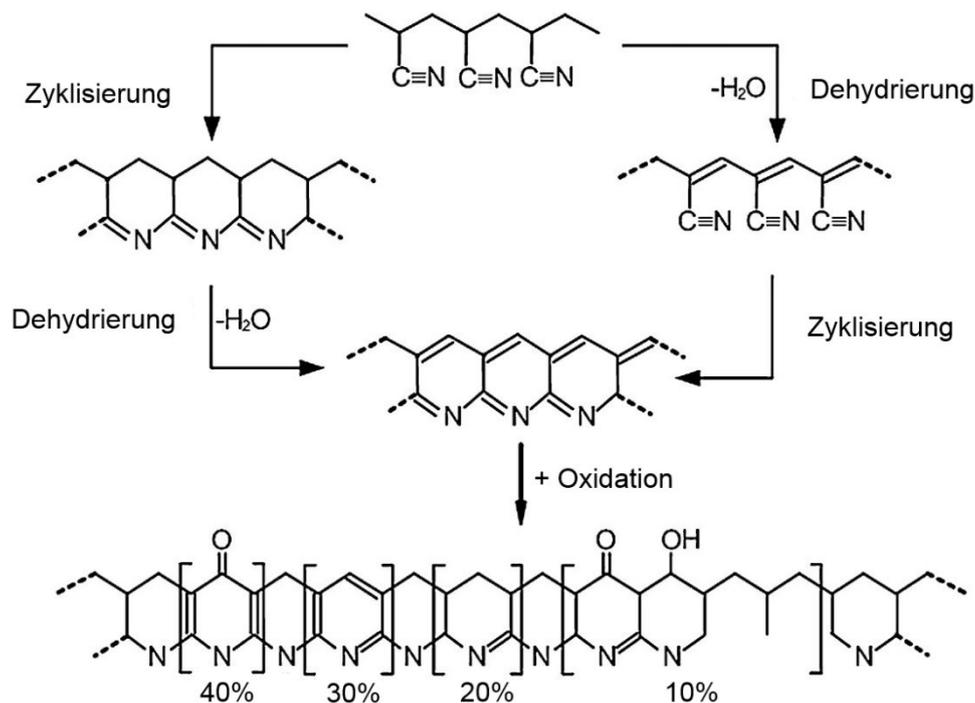


Abbildung 4: Stabilisierung des PAN-Precursors [20].

Die Stabilisierung ist ein wesentlicher Schritt, da es die Grundlage für die anschließende „Carbonisierung“ der Faser ist. In diesem Verfahrensschritt wird die Faser bei etwa $1300\text{ }^\circ\text{C}$ zu nahezu reinem Kohlenstoff umgesetzt. Fließfähige Polymere würden bei solchen Temperaturen nicht die nötige Integrität besitzen und ihre Faserstruktur schlichtweg zerstört werden. Es bilden sich Kohlenstoffschichten in hauptsächlich turbostratischer Struktur aus [20, 21]. Zuletzt wird im Graphitisierungsschritt bei etwa $2000\text{ }^\circ\text{C}$ die Orientierung der Kohlenstoffschichten und somit die Steifigkeit der Faser erhöht.

Ein zweites Verfahren stellt das Spinnen aus einem Mesophasenpech und anschließender Wärmebehandlung dar. Als Ausgangsrohstoffe dienen Steinkohlenteer- und Erdölpeche, die bei Temperaturen über $350\text{ }^\circ\text{C}$ zu einem Mesophasenpech umgewandelt werden [3, 21]. Mesophase bezeichnet eine Übergangsstufe zwischen einer dreidimensional geordneter Phase und einer isotropen Flüssigkeitsphase. Dieses Mesophasenpech (MPP) ist stark anisotrop und hochgradig flüssigkristallin. Durch das Schmelzspinnen entstehen Fasern mit hohem Orientierungsgrad entlang der Faserachse. Anschließend werden die Faserprecursor bei bis zu $2000\text{ }^\circ\text{C}$ stabilisiert und verkocht. In einer dritten Stufe bei Temperaturen bis

3000 °C werden Umwandlungsvorgänge induziert. Unterstützt werden diese Prozesse durch eine gleichzeitige Verstreckung der Fasern. So werden Hochmodul-C-fasern mit Schichtebenen, die weitgehend parallel zur Faserachse orientiert sind, hergestellt. Die Fernordnung der Schichten ist gut ausgebildet [3].

Die Herstellung von Carbonfasern aus Zellulosefasern hat eine untergeordnete Rolle für die FKV-Verarbeitung, wodurch der Carbonfaser-Gesamtmarkt hauptsächlich durch PAN- und MPP-basierte Carbonfasern dominiert wird. 2011 lag der Verbrauch von Carbonfasern bei 37 000 t [22], das eine deutliche Erholung des Marktes seit dem Krisenjahr 2009 bedeutete (siehe Abbildung 5). Jedoch die weltweit installierte, theoretische Gesamtkapazität betrug 90 000 t Carbonfasern. Dabei befanden sich über 2/3 der installierten Gesamtkapazität in den USA (29%), Japan (25%) und Europa (25%). Der Anteil Chinas am Gesamtmarkt machte lediglich 8% aus. Dieser soll jedoch in den nächsten Jahren stark wachsen, so die Erwartung von Analysten [22]. Der Markt für carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verhält sich parallel zum Carbonfasermarkt, da etwa 95% aller Carbonfasern zu CFK-Bauteilen verarbeitet werden. So wurden 2011 ca. 57 000 t CFK-Bauteile hergestellt [22].

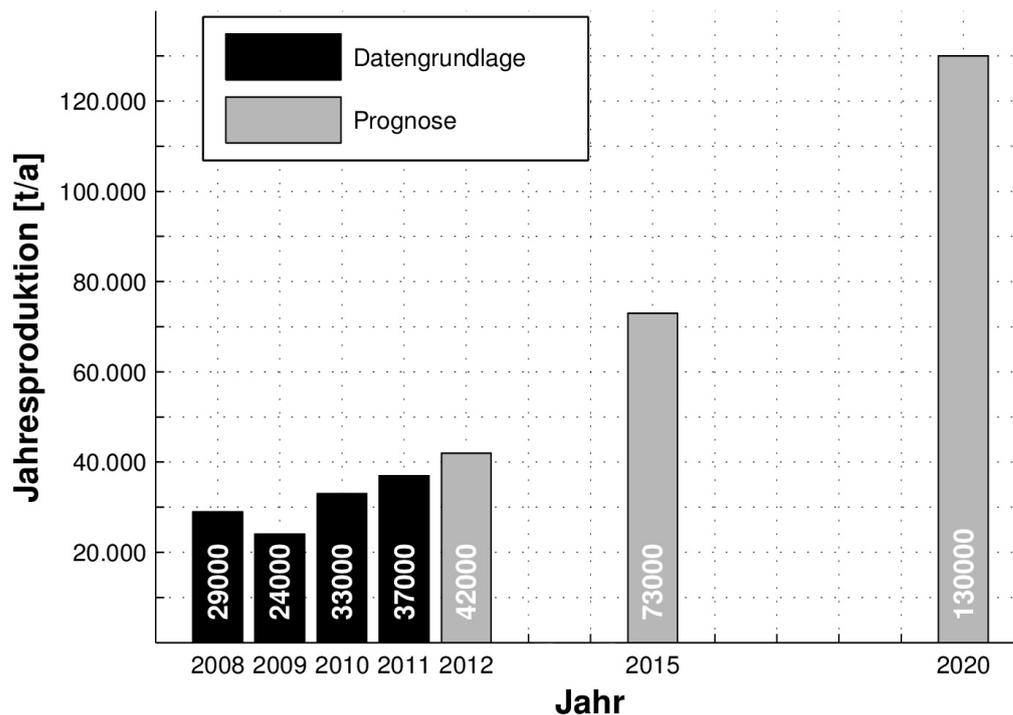


Abbildung 5: Prognose der Entwicklung des Carbonfasermarktes. Erstellt im Oktober 2012 durch Carbon Composites e.V., Darstellung nach [22].

2.2.3 Halbzeugtypen

Die verschiedenen Fasertypen werden nach ihrer Herstellung aufbereitet und zu den unterschiedlichsten Textilien weiterverarbeitet. Ausgangspunkt ist dabei immer das Einzelfilament. Werden mehrere Einzelfilamente zusammengefasst, so entstehen Rovings oder Garne. **Rovings** sind Faserbündel in denen die Einzelfilamente parallel angeordnet sind. Zum Unterschied dazu werden solche Elementarfaserbündel auch mit einer sogenannten Schutzdrehung versehen angeboten. Die Schutzdrehung soll das Ausspleißen einzelner Fasern verhindern. In diesem Fall spricht man von **Garnen**.

Unter **Zwirn** versteht man ein Halbzeug bestehend aus mehreren, miteinander verdrehten Garnen. Durch eine geringe Verdrehung (30 Verdrehungen/m) wird ein gleichmäßiges Tragen der einzelnen Filamente erreicht. Es können dadurch in der Praxis sogar eine Erhöhung der Festigkeit gegenüber ungedrehten Garnen erzielt werden. Eine zu starke Verdrehung wirkt sich negativ aus [1].

Rovings, Garne und Zwirne werden als 1-dimensionale Faserstruktur auf die unterschiedlichsten Arten zu den Faserhalbzeugen „höherer Dimension“ weiterverarbeitet [3]. Außerdem können Garne und Rovings mit speziellen Verfahren wie der Wickeltechnik, der Pultrusion, dem Legeverfahren oder Näh- und Sticktechniken direkt verarbeitet werden [1].

Schnittmatten, Endlosmatten und Vliese sind flächige Faserstrukturen ohne wesentliche Vorzugsrichtung der Faserorientierung. Bei **Schnittmatten** werden meist Rovings oder Spinnfäden auf Längen von etwa 25 bis 50 mm geschnitten, regellos in der Ebene angeordnet und mit einem sprühbaren Bindematerial versehen [3]. Es können auf diese Weise auch 3-dimensional geformte Preforms hergestellt werden [1, 5]. **Endlosmatten** werden auf ähnlichen Maschinen hergestellt. Sie zeichnen sich durch (quasi-)endlose, in schlaufenförmigen Bahnen abgelegte Faserbündel aus. Auch sie werden zur Stabilisierung mit Binder versehen [3]. Unter **Vliese** werden mattenähnliche Faserstrukturen verstanden, die im Gegensatz zu Endlosmatten und Schnittmatten aus Einzelfilamenten hergestellt wird. Dadurch sind Vliese wesentlich feiner strukturiert als die zuvor genannten Vertreter [1].

2-dimensionale Faserhalbzeuge mit definierten Vorzugsrichtungen orientieren sich an Verarbeitungstechniken der Textilindustrie. So sind **Gewebe** als Flächengebilde aus sich rechtwinklig kreuzenden Kett- und Schussfäden bekannt. Die verschiedenen Gewebetypen entstehen durch Variation der Bindung, des Fadengewichts, des Fadengewichtsverhältnis Kettfaden zu Schussfaden und der Fasertypen [3]. Vorteilhaft ist die Verarbeitbarkeit von Geweben, da durch die Faserondulation aufgrund der Verwebung ein gewisser Formschluss gegeben ist. Jedoch führt diese Faserondulation auch dazu, dass die Fasern im Endprodukt gewellt vorliegen und somit von der idealerweise gestreckten, geradlinigen Lage abweichen [1]. Diese Tatsache führte zur Entwicklung von **Gelegen**. Hierbei werden eine oder mehrere parallele UD-Schichten wellenfrei durch Wirkfäden miteinander verbunden. Es können so auch Gelege mit mehreren Lagen verschiedener Orientierung (Multiaxialgelege) hergestellt werden. Für Multiaxialgelege ergibt sich neben dem fasergerechten Schichtaufbau auch eine mögliche Zeitersparnis bei der Drapierung, durch das Einbringen mehrerer Laminatschichten in einem Drapiervorgang [1].

Für 3-dimensionale Faserverstärkung sind Gestricke, Gewirke und 3D-Gewebe bekannt. **Gestricke** und **Gewirke** sind Produkte von maschenbildenden Textil-techniken. Als wesentliche, herausragende Eigenschaft ist die gute Drapierbarkeit zu nennen. Ihre Festigkeiten und Steifigkeiten sind stark begrenzt, da Faservolumengehalt und Faserorientierung sehr gering sind. Jedoch können Gestricke und Gewirke die höchsten Schlagenergien im Vergleich zu Geweben und Gelegen aufnehmen [1].

Geflechte sind verschnittarme, endkonturnahe Verstärkungsstrukturen für rotationssymmetrische bzw. prismatische Hohlkörper oder kernbehaftete Bauteile. Beim Flechten werden meist schlauchförmige Halbzeuge aus sich unter spitzen Winkeln kreuzenden Garnen oder Rovings hergestellt. Geflechte sind schiebenachgibige, textile Gebilde, die sich durch Ziehen bzw. Stauchen entlang ihrer Längsachse im Durchmesser verjüngen bzw. vergrößern lassen. Damit geht eine Änderung der Faserorientierung einher. Die Faserstruktur bleibt jedoch bezüglich der Längsachse symmetrisch. So können die Faserwinkel, unter den sich die einzelnen Flecht-fäden kreuzen, in weiten Bereichen variiert werden. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit des Direktbeflechtens von diversen Kernmaterialien [1].

2.3 Preforming

Ein wesentlicher Schritt in der RTM-Prozesskette ist das Preforming. Man versteht unter Preforming die Weiterverarbeitung von Faserhalbzeugen (und evtl. Kernmaterialien, Metallinserts, etc.) zu endkonturnahen, nicht imprägnierten Gebilden. Der so gebildete Vorformling wird in der FKV-Verarbeitung als Preform bezeichnet [5, 9]. Die Abgrenzung zur Faserhalbzeugherstellung selbst gelingt nur teilweise, denn durch die verschiedenen, vorgestellten Faserhalbzeugtypen ergibt sich eine große Zahl an Ausgangspunkten für den Preformingschritt. Der Kreativität und Gestaltungsfreiheit sind bei der Preformherstellung kaum Grenzen gesetzt. Einschränkungen bringen die Wirtschaftlichkeit und technische Sinnhaftigkeit von verschiedenen Ausführungen.

Prinzipiell können die Preformherstellungsverfahren in direkte und sequentielle Preformherstellung unterschieden werden. Unter direkter Preformherstellung wird die Herstellung von 3D-Preformgeometrien direkt, d.h. unmittelbar aus den Fasern

und etwaigen Hilfsstoffen (Binder), verstanden. Im Gegensatz dazu stehen die sequentiellen Herstellungsverfahren, die auf mehreren, einzelnen Verfahrensschritten bis zur 3D-Gesamtpreform beruhen [4].

Als Standardverfahren der direkten Preformherstellung kann das Faser-Spritzverfahren bezeichnet werden. Dabei werden Schnitffasern zusammen mit meist pulverförmigen Binder auf perforierte Preform-Werkzeuge aufgebracht. Die Fasern werden zunächst durch das Ansaugen von Luft durch das Werkzeug in seiner Form fixiert. Durch Aufheizen wird der Binder aufgeschmolzen, der nach erfolgter Abkühlung die Fixierungsaufgabe übernimmt [4, 5]. Weiter sind 3D-Textiltechniken als direkte textiltechnische Preformverfahren zu erwähnen, die es zum Ziel haben die 3D-Geometrie in einem Schritt zu erzeugen (One-Step-Textiltechnik) [4].

Die sequentiellen Herstellungsverfahren können weiter in die Binder-Umformtechnik und die textile Konfektionstechnik unterschieden werden. Bei Ersterer werden Faserstrukturen durch einen Umformschritt drapiert und mittels eines Binders in der Endkontur fixiert. Typischerweise werden hierfür bereits binderbeschichtete Textilhalbzeuge eingesetzt. Neuere Ansätze verfolgen die Herabsetzung des Bindermittelanteils. Durch Einsatz von unbedingerten Faserstrukturen, die erst nach Herstellung des Verstärkungspakets mit Binder versehen werden [4].

Die textile Konfektionstechnik bedient sich klassischer Verarbeitungstechniken aus der Textilindustrie wie der Nähtechnik. Hier werden ebene Zuschnitte (Gewebe, Gelege, etc.) durch Vernähen zu komplexen 3D-Geometrien gefügt. Vorteilhaft ist die Integrationsmöglichkeit von artfremden Materialien, wie Schaumkerne und metallische Inserts. Wesentlichen Einfluss auf die Bauteilperformance hat die Auswahl des Stichtyps. Die Schwierigkeit dabei ist zwischen konfektionstechnischem bzw. handhabungsorientiertem Nähen oder strukturellem Nähen durch bspw. Einbringen von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung zu entscheiden, denn die Handhabbarkeit der Preform bzw. Sub-Preformen ist entscheidend für die Automatisierung der Preformherstellung [4].

Gerade die Vielfalt der Preformingtechniken macht diesen Schritt zu einer äußerst komplexen Problemstellung. Die nachfolgende Aufzählung soll zusammenfassend diese Vielfalt darstellen und erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3: Textile Preformtechniken und ihre Produkte [1, 4, 23].

Preformtechnik	Struktur
Faser-Spritztechnik	Binderfixierte 3D-Geometrie
Weben / 3D-Weben	Gewebe / 3D-Gewebe
Flechten / 3D-Flechten	Geflecht / 3D-Geflechte
Stricken	Gestrick/Gewirk
Legen	Gelege
Sticken	Stickmuster
Nähtechnik	Naht
Binder-Umformtechnik	Binderfixierte 3D-Geometrie
etc.	

Eine tiefere Beschreibung der Verfahren würde den Rahmen sprengen. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen [1, 4, 23].

2.4 Polymere Matrixwerkstoffe

Für die FKV-Verarbeitung und die resultierenden Bauteileigenschaften ist die Wahl des Matrixsystems ein entscheidender Schritt in der Prozessentwicklung. Aus der Prozessführung und der Bauteilmechanik ergeben sich Matrixanforderungen und -aufgaben, die eine wesentliche Rolle bei der Auswahl des Werkstoffes spielen.

2.4.1 Matrixaufgaben und –anforderungen

Die Matrix besitzt im Verbund ganz wesentliche Aufgaben, die nicht vernachlässigt werden sollten. Diese sind [1, 3]:

- Fixierung der Fasern in der vorgegebenen Geometrie
- Benetzung der Fasern
- Verklebung der Fasern miteinander
- Einleitung und Übertragung von Kräften in die Fasern bzw. zwischen den Fasern
- Aufnahme von Kräften quer zur Faserrichtung und bei Schubbelastung
- Stützung der Fasern bei Druckbeanspruchung
- Schutz der Fasern von Umwelteinflüssen (mechanisch, chemisch, Strahlung, etc.)
- Bestimmt die mechanische Zähigkeit der Verbunde

Aus der Natur der Verarbeitungsprozesse geben sich prozessspezifische Anforderungen. So müssen beim RTM-Prozess zusätzlich folgende Anforderungen erfüllt werden [4, 5, 9]:

- Niedrige Viskosität des Reaktionsgemisches
- Gute Tränkung des Faserhalbzeuges
- Ausreichend lange Topfzeit, aber möglichst kurze Härtungsdauer
- Geeignete Verarbeitungstemperaturen
- Kinetik und Exothermie des Härtungsreaktion

Da per Definition für FKV-Bauteile nur polymere Matrixwerkstoffe in Frage kommen, soll hier ein Überblick über die verschiedenen, polymeren Werkstoffklassen und deren Relevanz für die FVK-Verarbeitung gegeben werden. Anschließend

wird der Fokus auf jene Matrixsysteme gelegt, die in Injektionsverfahren wie dem RTM-Prozess zur Anwendung kommen bzw. großes Innovationspotential für diesen besitzen.

2.4.2 Werkstoffkunde Kunststoffe

Unter „Kunststoffe“ oder „Polymere Werkstoffe“ werden synthetisch hergestellte, oder auch durch Umwandlung von natürlichen Ausgangsprodukten hergestellte, makromolekulare Stoffe verstanden [24]. Die Makromoleküle werden aus immer wiederkehrenden Einheiten, sogenannten Monomeren durch Polymerisation zu kovalent gebundenen Ketten aufgebaut. Art der Monomere und Aufbau des Polymers bedingen größtenteils die Eigenschaften des erzeugten Materials. Kunststoffe werden häufig nach ihren Thermo-mechanischen Eigenschaften eingeteilt, die ebenfalls stark mit der Polymerstruktur (Kettenstruktur) verknüpft sind.

- Thermoplaste

In der einfachsten Form der Molekülkette besitzen Thermoplaste eine lineare, unvernetzte Struktur. Durch die Bildung von Verschlaufungen und Verhakungen dieser Kettenmoleküle bilden sich physikalische Bindungen aus, welche den Zusammenhalt des Materials gewährleisten. Diese physikalischen Bindungen können reversibel durch Wärme, Lösungsmittel oder mechanische Kräfte reversibel gelöst werden. Durch Temperaturerhöhung können Thermoplaste so aus einem Feststoffzustand bei Raumtemperatur in einen plastischen, fließfähigen Zustand überführt werden [24]. Vorteilhaft sind die Zähigkeit und die Schweißbarkeit der Matrixwerkstoffe. Nachteilig ist jedoch die Kriechneigung so wie die erschwerte Verarbeitbarkeit von diesen Matrixwerkstofftypen [1].

- Duromere

Duromere (oder auch Duroplaste) entstehen während der Verarbeitung aus einer chemischen Vernetzungsreaktion von (Gieß)harz und Härter. Duromere besitzen eine räumlich engmaschig vernetzte Struktur, die ihnen jegliche Fließfähigkeit nimmt [1, 24]. Bei kontinuierlichem Erwärmen tritt weit über der Raumtemperatur ein Erweichen des Werkstoffes ein, jedoch er-

reicht das Material bis zur Zersetzungstemperatur keinen plastischen Zustand. Vorteilhaft sind die verhältnismäßig einfache Verarbeitung der fließfähigen Reaktionsharze und die ausgezeichnete Wärmeform- und Kriechbeständigkeit der vernetzten Materialien gegenüber thermoplastischen Matrixmaterialien. Jedoch halten sich Risszähigkeit und Bruchdehnung in überschaubaren Grenzen. Unverstärkt sind Duromere als Konstruktionswerkstoffe ungeeignet [1].

- Elastomere

Im Gegensatz zu Duromeren sind Elastomere räumlich weitmaschig vernetzte Polymere. Sie werden durch die Vernetzung von thermoplastischen Kautschuken hergestellt. Je nach Vernetzungsdichte haben die chemischen oder die physikalischen Bindungen mehr Einfluss auf die Materialeigenschaften. Üblicherweise sind bei Anwendungstemperatur die physikalischen Bindungen erweicht, was eine entropieelastische Verformung des Materials ermöglicht. Ein plastischer Zustand ist durch Erhitzen ebenfalls nicht erreichbar [24]. Vorteilhaft sind die großen, erreichbaren Bruchdehnungen der Elastomere. Nachteilig ist die geringe Stützwirkung als Matrixwerkstoff. Daher werden Faserverstärkungen in Elastomeren nur in auf Zug belasteten Bereich eingesetzt. Häufige Anwendungen für faserverstärkte Elastomere sind Reifen, Förderbänder oder geflechtarmierte Schläuche wie bspw. Hydraulikschläuche [1].

2.4.3 Matrixsysteme für die Injektionstechnik

Als die ältesten und am häufigsten verarbeiteten Matrixsysteme in FKV-Bauteilen sind duromere Matrixsysteme zu nennen. Die Materialien für die Injektionstechnik sind niedrig-viskose Typen klassischer Harzsysteme. Zur Anwendung kommen:

- Ungesättigte Polyesterharze (UP) [25]
- Epoxidharze (EP) [9]
- Polyurethanharze (PUR) [9, 26]
- Vinylesterharze (VE) [9]

Da das verwendete Harzsystem der Gruppe der Epoxidharze angehört und somit einen wesentlichen Teil der vorliegenden Arbeit darstellt, wird das folgende Kapitel 2.4.4 dieser Reaktionsharztype gewidmet. Für genauere Beschreibung der anderen genannten Harztypen sei auf die Literaturstellen [1, 3] verwiesen.

Es sei angemerkt, dass neben den klassischen, duromeren Matrixwerkstoffen thermoplastische Matrizen immer größere wissenschaftliche und industrielle Beachtung gewinnen. Die zuvor herausgearbeiteten Vorteile der Thermoplaste verknüpft mit der Produktivität des RTM-Prozesses sind eine deutliche Verbesserung der Produktperformance. Da die Tränkung mit typischen thermoplastischen Schmelzen aufgrund der hohen Viskosität nicht wirtschaftlich bis unmöglich ist, liegt der Fokus auf sogenannten „in-situ polymerisierende Thermoplaste“. Dies kann bspw. PA-6 sein, das aus ϵ -Caprolactam, einem ringförmigen Amid, durch ringöffnende Polymerisation synthetisiert wird. Die vorliegenden Komponenten sind Katalysator und Aktivator, jeweils gelöst in den Monomeren. Das Injektionsgemisch weist entsprechend niedrige Viskosität auf, sodass ein Injektionsverfahren möglich wird [27]. Dieser Bereich besitzt enormes Innovationspotential.

2.4.4 Epoxidharze

Diese Materialien zeichnen sich als polymere Matrixwerkstoffe durch vergleichsweise sehr gute mechanische und thermische Eigenschaften aus. Festigkeitswerte sowie Härte und Steifigkeitswerte übertreffen die vergleichbarer UP-Werkstoffe [28]. Weiter zeichnen Sie sich gegenüber UP-Harzen durch lufttrocknende Härtung, geringere Schwindung und damit verbundene geringe Eigenspannungen. Nachteilig ist der höhere Preis, die notwendige genaue Dosierung von Harz und Härter sowie die höhere Toxizität der Einsatzstoffe [27].

Gebräuchliche Epoxidharzprodukte werden fast ausschließlich aus Bisphenol A und Epichlorhydrin (Abbildung 6a) hergestellt. Unter Wasserausschluss reagieren die Edukte durch Aufspaltung des Epoxidrings des Epichlorhydrin. Als Zwischenprodukt entsteht eine Chlorhydrinverbindung (Abbildung 6b), die in Gegenwart von Alkalien (bspw. NaOH) unter Abspaltung von Wasser und einem Alkalisalz neuerlich eine Epoxidgruppe bildet. Die entstandenen Diglycidether (Abbildung 6c) werden von Wasser und Salzen getrennt. In der Praxis reicht eine stöchiometrische

Einwaage von Epichlorhydrin und Bisphenol A für die Herstellung von Diglycidylether nicht aus. Daher wird Epichlorhydrin in der 2 bis 3 fachen Menge vorgelegt. Durch die Reaktion endständiger Epoxidgruppen mit weiteren Bisphenol A entstehen höhermolekulare Verbindungen. Bei nur gering überschüssigem Epichlorhydrin entstehen höhermolekulare, feste, schmelzbare Epoxidharze. Bei großem Überschuss an Epichlorhydrin sind die hergestellten Harze niedermolekulare, viskose Substanzen [27, 28].

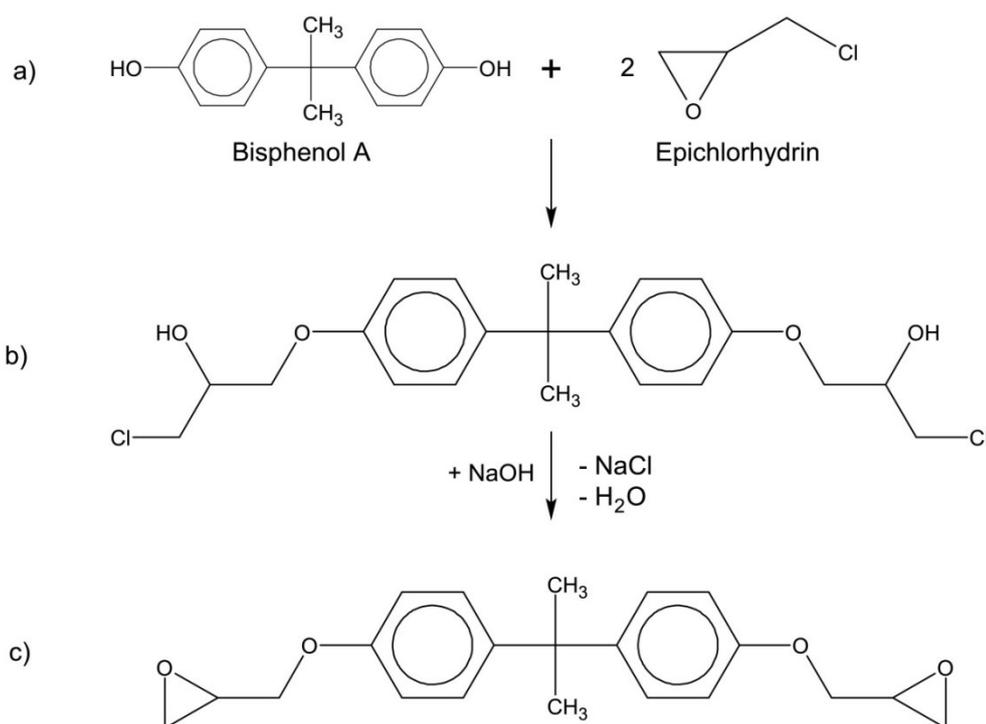


Abbildung 6: Chemismus der Epoxidharzherstellung [28].

Die Eigenschaften der Epoxidharze und der daraus hergestellten Feststoffe lassen sich durch Variation des Moleküldesigns gezielt verändern. So gibt es bspw. Harze die auf Bisphenol F anstatt Bisphenol A basieren. Sie weisen eine deutlich niedrigere Kristallisationsneigung auf. Kurzkettige, aliphatische Epoxidverbindungen agieren als Verdünnungsmittel bzw. reaktive Flexibilisatoren. Cycloaliphatische EP-Harze besitzen eine höhere Kriechstromfestigkeit und Witterungsbeständigkeit als ihre aromatischen Pendants [27].

An dieser Stelle wird in gewisser Weise vorgegriffen und der Chemismus der Epoxidharzhärtung erläutert. Die prozesstechnischen Herausforderungen werden erst

in Kapitel 2.8 vorgestellt. Als Vernetzungs- oder Härtungsmittel (kurz Härter) kommen mehrwertige aromatische oder aliphatische Diamine, Dicarbonsäuren bzw. deren Anhydride in Betracht. Diese Verbindungen besitzen sogenannte aktive Wasserstoffatome (H-Atome). Durch den Angriff dieser H-Atome auf den Epoxidring wird dieser geöffnet, wie in Abbildung 7 a) bis b) dargestellt. Bei der ablaufenden Polyaddition verbinden sich Härter und Harz zu einem engmaschigen molekularen Netzwerk, angedeutet im letzten Reaktionsschritt in Abbildung 7. Die verbleibenden, reaktiven H-Atome reagieren weiter mit Epoxidgruppen weiterer Harzmoleküle. Die bei der Polyaddition entstehenden Hydroxidgruppen sind gleichzeitig auch ein Grund für die guten Haftungseigenschaften von Epoxidharzen und können unter Umständen weiter umgesetzt werden [3, 28]. Wie aus dem Chemismus der Epoxidharzhärtung ersichtlich wird, ist eine genaue stöchiometrische Einwaage von großer Wichtigkeit [28].

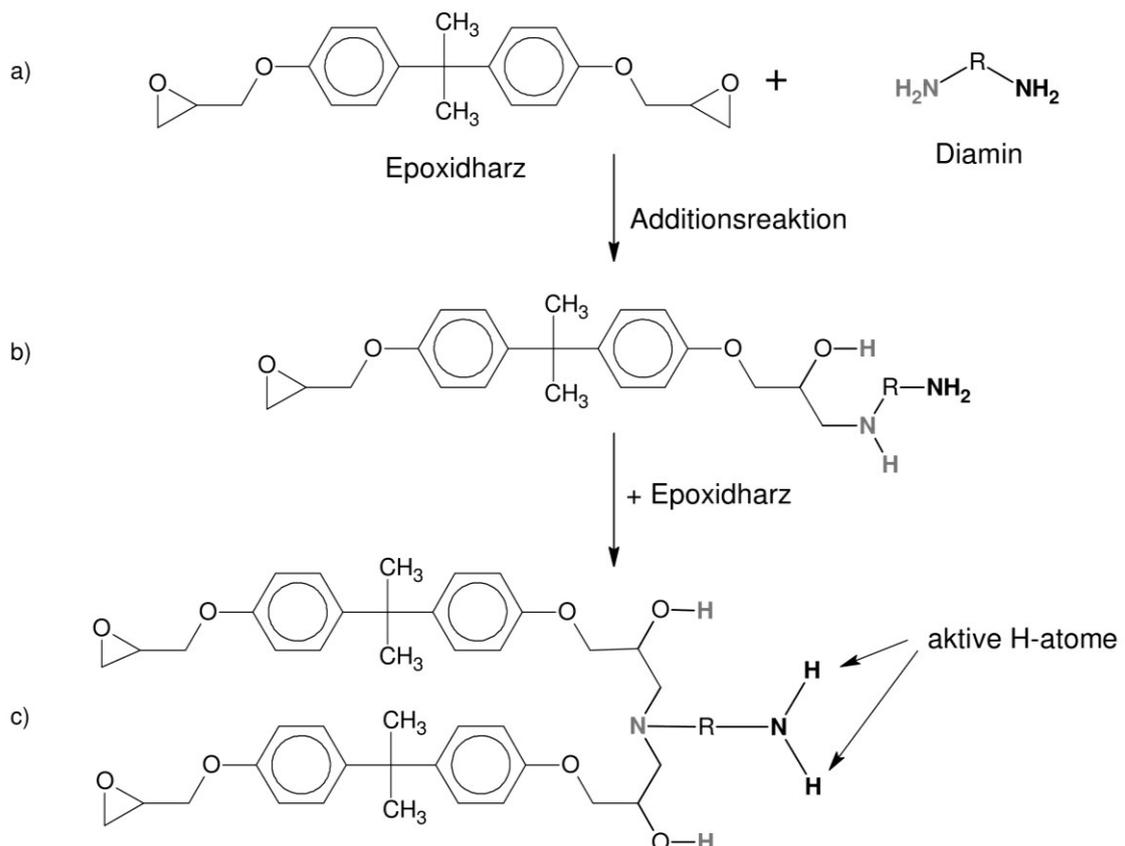


Abbildung 7: Reaktion eines Epoxidharzes mit einem Diaminhärter [3, 28].

2.5 Einlegen der Preform

Vor der Harzinjektion wird die Preform in die Werkzeugkavität eingelegt. Dabei ist auf exakte Positionierung zu achten, denn durch Fasern, welche in die Trennebene ragen, können Werkzeugschäden entstehen [5]. Im Zuge der Automatisierung der gesamten Prozesskette ist auch hier für die Bedienung von Großserien ein automatisiertes Beschicken des Werkzeugs anzustreben.

Nach dem Einlegen wird das Werkzeug geschlossen. Durch das Schließen wird Druck auf die Preform ausgeübt, der diese kompaktiert. Der Kompaktierungsdruck ist wesentlich für das Erreichen großer Faservolumenanteile und abhängig von der Steifigkeit der Preform. So haben die Faserarchitektur bzw. die Drapierbarkeit dieser und die Temperatur Einfluss auf den Kompaktierungsdruck. Faserarchitekturen mit vermehrter Faserondulation führen zu einer steiferen Preform. Binderfierte Preforms weisen eine deutliche Temperaturabhängigkeit auf [5]. Der anliegende Kompaktierungsdruck muss so gewählt werden, dass sowohl Preform und Werkzeug keinen Schaden nehmen. Weiter ist der Kompaktierungsdruck auch für die Fixierung der Preform erforderlich. Bei niedrigen Kompaktierungsgraden kann die anschließende Harzinjektion die Faserbündel verschieben und zu Abweichungen der Faserorientierung führen.

2.6 Anbindung der Injektionsanlage

Eine in der Literatur oft vernachlässigte Detaillösung ist die Gestaltung der Anbindung der Injektionsanlage an das Werkzeug. Jedoch hat diese einen erheblichen Einfluss auf die Werkzeugrüstzeit und daher auf die erreichbare Zykluszeit. Stand der Technik ist in vielen Verfahren die Anbindung mittels wegwerfbarer Schlauchleitungen. Um die Verwendung von solchen Verbrauchsmaterialien und Harzverbrauch in der Bauteilperipherie (An- und Abguss) zu reduzieren, gibt es Bestrebungen die Fließwegstrecke außerhalb des Werkzeuges möglichst zu verkürzen. In den folgenden Abschnitten sollen die einzelnen Möglichkeiten näher charakterisiert werden.

2.6.1 Schlauchleitung

Die einfachste Form der Anbindung der Injektionsanlage stellen Schlauchleitungen dar. Dabei wird ein Kunststoffschlauch an der Öffnung des Injektionskopfs angeschlossen und mit dem anderen Ende direkt mit dem Werkzeug verbunden oder durch eine Bohrung bis zur Kavität geführt. Oft sind die Spitzen der Injektionsköpfe mit Schlauchnippel ausgestattet um mit Hilfe von Schlauchschellen eine formschlüssige Verbindung herzustellen. Bei der Auslegung der Schlauchleitung ist auf die ertragbaren Schlauchinnendrucke bzw. erwarteten Injektionsdrücke und auf die Entformbarkeit der Angussleitung zu achten. Mittels Verteiler (Y-Verteiler, T-Verteiler) kann der Volumenstrom aufgeteilt und verschiedenen Injektionspunkten zugeteilt werden. Vorteile der Schlauchleitung sind die einfache Konfektionierung und die Flexibilität des Aufbaues. Sind Änderungen notwendig so kann die Schlauchgeometrie für die folgende Injektion leicht angepasst werden. Nachteilig ist der große Materialverbrauch, sowohl an Schlauchmaterial als auch an Matrixmaterial, das im Schlauch aushärtet und entsorgt werden muss.

2.6.2 Direkte Anbindung

Als Alternative zur Anbindung mittels Schläuchen ist die direkte Werkzeuganbindung zu nennen. Dabei wird der Injektionskopf (idealerweise) unmittelbar am Werkzeug angeschlossen. Trotz einer umfangreichen Literaturrecherche konnten nur die folgenden zwei Ausführungen zu dieser Problemstellung gefunden werden. Als erklärtes Ziel haben beide die Reduktion der Zykluszeit und der Abfallmenge.

- Flow-Stop Technologie (Fa. Tartler) [29]

Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine Art Ventil, das in den Angusskanal eingesetzt wird. Das kann durch einen Adapter am Werkzeug, wie in Abbildung 8 dargestellt, realisiert werden oder auch durch eine entsprechende Aufnahme im Werkzeug selbst. Durch das Einführen der Mischerhülse in das vergrößert dargestellte FlowStop-Ventil wird es auslassseitig gespreizt und der Fließweg wird geöffnet. Nach Ende der Injektion wird der Mischkopf herausgezogen und das Ventil verschließt den Angusskanal selbsttätig. So wird das Austreten von Matrixmaterial verhindert.

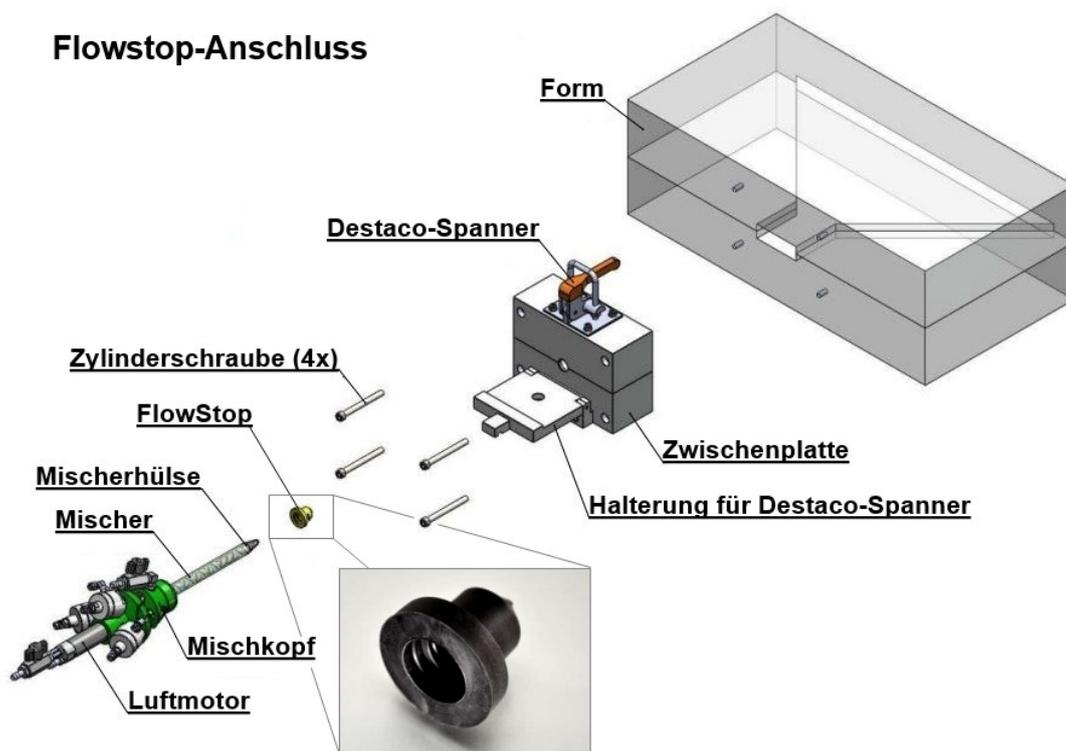


Abbildung 8: Adaptierte Darstellung der Flow-Stop Anbindung mittels Adapter von [29, 30].

- Mischkopf mit Dichtmanschette (Fa. Krauss-Maffei) [31]
Bei diesem Patent ist ein Mischkopf zur Verarbeitung und Einbringung von Duromer-Material in ein geschlossenes Werkzeug geschützt, welcher neben einem Auslaufrohr mit einem Austragskanal ebenfalls eine Dichtvorrichtung am Ende des Auslaufrohres aufweist. Durch das Einführen in eine konische Öffnung des Werkzeugs bis zur Werkzeugkavität wird durch eine Flächenpressung eine Abdichtung gegenüber der Umgebung erreicht. Ein Reinigungskolben im Austragskanal ist derartig gestaltet, dass er durch Verfahren in axialer Richtung im Austragskanal das Reaktionsgemisch austrägt und so den Austragskanal vom Reaktionsgemisch reinigt.

2.7 Injektion

Die Injektion des Matrixmaterials kann als das Herzstück der RTM-Prozesskette verstanden werden, unterscheidet sie doch die Verfahrensfamilie der Harzinjektionsverfahren von all den anderen Verfahrensvarianten. Im Folgenden soll im Überblick die Theorie zum Injektionsablauf dargestellt werden.

2.7.1 Strömung im porösen Medium

Es ist von der Fachöffentlichkeit akzeptiert, dass die Fließphänomene bei der Harzinjektion durch Modelle basierend auf dem Gesetz von Darcy, wie in Gleichung (1) dargestellt, beschrieben werden können [5, 32, 33].

$$\underline{v} = -\frac{1}{\eta} \cdot \underline{K} \cdot \nabla p \quad (1)$$

Dabei bezeichnet \underline{v} den Vektor der über die Querschnittsfläche gemittelten Darcy-Geschwindigkeit in [m/s]. Die dynamische Fluidviskosität in [Pa·s] wird mit η berücksichtigt. Der Permeabilitätstensor \underline{K} beschreibt die „Harzdurchlässigkeit“ der Faserstruktur in die drei Raumrichtungen. Er besitzt die Einheit [m²] und ist im Allgemeinen eine vollbesetzte 3 x 3 Matrix. Als letzter Beitrag zur Harzausbreitung ist der Druckgradient in die drei Raumrichtungen ∇p in [Pa/m] [34]. Für typische Bauteilgeometrien ist ein schalenförmiger Aufbau annehmbar. Dadurch vereinfacht sich das Gesetz von Darcy zu seiner zweidimensionalen Form:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = -\frac{1}{\eta} \cdot \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

In der Praxis müssen die Permeabilitätskennwerte empirisch bestimmt werden [35]. Einflussgröße auf die sich lokal ausbildende Permeabilität ist im Wesentlichen der Faservolumengehalt [35], der durch die Fasergröße [5], den Kompaktierungsgrad [36] und die Scherung des Textils [37–39] beeinflusst ist.

2.7.2 Injektionsstrategien

Die Injektionsstrategie charakterisiert die prinzipielle Lage der Anguss- und Entlüftungspunkte der Kavität. Die erreichbare Füllzeit und die Teilequalität sind von der gewählten Injektionsstrategie abhängig. Die Injektionsstrategien können in drei Gruppen, dargestellt in Abbildung 9, zusammengefasst werden [5].

- Punktanguss

Bei dieser Strategie wird das Harz über eine mehr oder weniger zentrale Angussbohrung in die Kavität zu geführt. Der Massestrom breitet sich dabei je nach Fließwiderstand radial aus. Das in der Kavität befindliche Luftvolumen muss über peripher-liegende Entlüftungsöffnungen ausströmen können [14].

- Linien- oder Filmanguss

Unter Linien- oder Filmanguss wird eine längliche Injektionsöffnung entlang einer Bauteilkante verstanden. Die Fließfrontausbreitung ist mehr oder weniger unidirektional. Um Trockenstellen zu vermeiden muss die Entlüftung auf der gegenüberliegenden Seite der Kavität möglich sein. Nachteilig gegenüber dem Punktanguss ist der längere Fließweg und dadurch die erhöhte Füllzeit bzw. der erhöhte Druckbedarf bei gleicher Bauteilgröße [5].

- Umfangs- oder Ringanguss

Die Injektion wird durch eine Öffnung entlang einer geschlossenen Linie am Bauteilumfang realisiert. Der Entlüftungspunkt liegt zentral auf der Bauteiloberfläche. Es entspricht somit der umgekehrten Situation des Punktangusses, weshalb diese Variante auch als Umkehrfahrweise bezeichnet wird [14]. Vorteilhaft ist die bessere Druckwirksamkeit, da eine größere Fläche zur Einbringung des Injektionsdrucks zur Verfügung steht. Nachteilig erweist sich die aufwendige Gestaltung des Harzverteilersystems sowie die Fertigung der Entlüftungsöffnung.

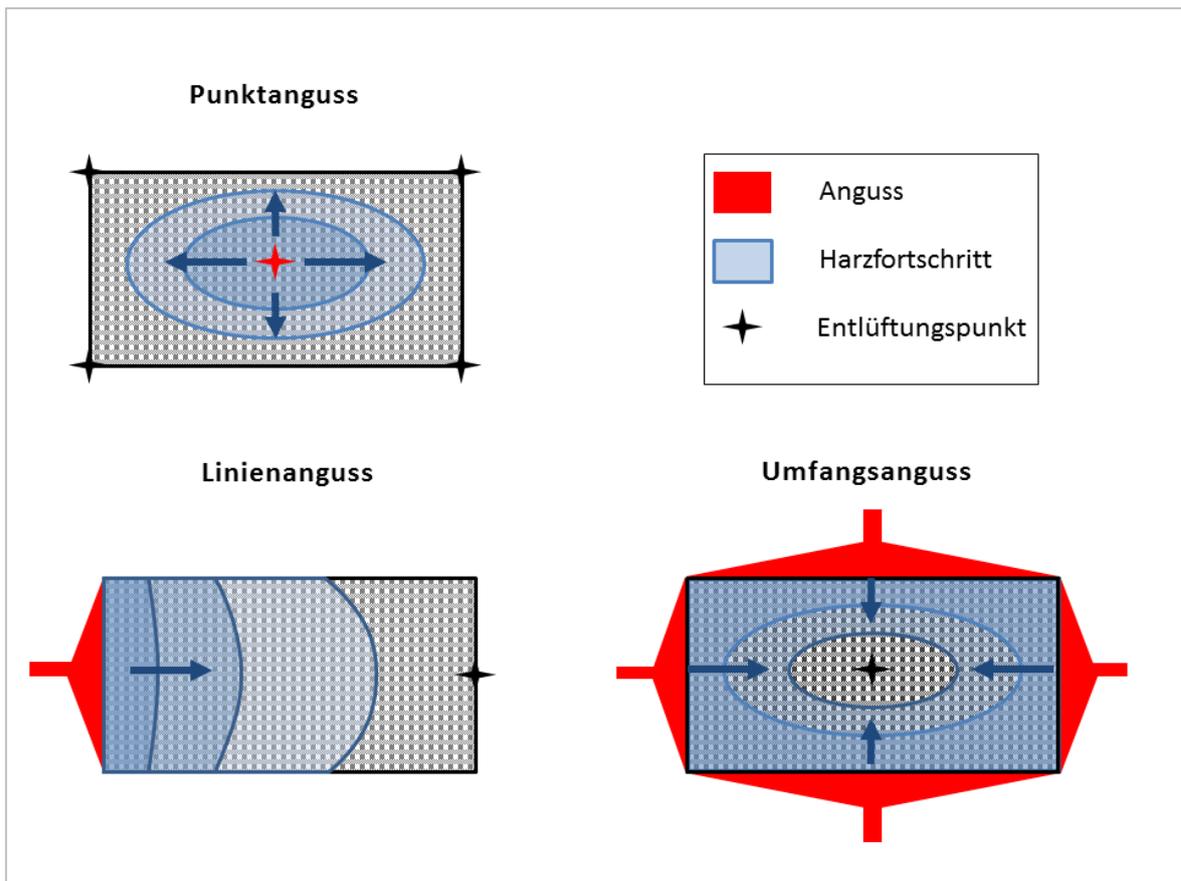


Abbildung 9: Injektionsstrategien für die Harzinjektionstechnik.

2.7.3 Phasen der Formfüllung

Ab Injektionsstart können mehrere Phasen der Formfüllung unterschieden werden. Zunächst wird in Phase I das **Füllen des Angussystems** erzielt. Dabei fließt das Matrixmaterial durch Kanäle, die weder mit Verstärkungsmaterial gefüllt sind noch auf dem Bauteil verbleiben sollen. Mit dem Eintreten der Fließfront in die Kavität beginnt Phase II der Formfüllung, die eigentliche **Tränkung der Faserstruktur**. Die Strömung bildet sich nach dem Gesetz von Darcy aus und durchströmt in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur, Druck und Viskosität die Verstärkungsstruktur. Sobald die Fließfront die Entlüftungspunkte der Kavität erreicht haben, beginnt Phase III, das **Spülen**. In dieser Phase wird versucht mit überschüssigem Matrixmaterial eventuelle Luftreste aus der Kavität in das Abguss- bzw. Steigersystem zu befördern [5].

2.7.4 Sensorik und Prozessregelung

Für eine optimale Bauteilqualität ist eine Prozessüberwachung und –regelung erstrebenswert. Für die Prozessregelung ist die Ermittlung der Prozessparameter unerlässlich. Im Falle der Harzinjektion handelt es sich vor allem um Prozessdrücke, -temperaturen, Fließfrontfortschritt und den Aushärtegrad des Matrixsystems.

Ähnlich der Sensorik aus verwandten Prozessen, wie der Spritzgießtechnik, gibt es Forminnendruckensoren der verschiedensten Ausführungsvarianten. Wesentlich für den Einsatz in der Harzinjektionstechnik sind Messgenauigkeit, maximal und minimal messbarer Druck sowie die Fertigungstoleranzen. Diese bestimmen in großem Maß die Dichtigkeit des Spaltes zwischen Sensorkopf und Werkzeugmaterial. Ein Eindringen von Matrixmaterial kann die Funktion und das Ausbauen des Sensors beeinträchtigen. Ähnliches kann im übertragenen Sinn auch für Temperatursensoren festgehalten werden [40].

Natürlich können Temperatur- und Drucksensoren auch für die Bestimmung des Fließfrontfortschritts verwendet werden, jedoch gibt es auch weitere, sehr spezielle Sensorkonzepte. So können auch dielektrisch-kapazitive Messsensoren [35] oder faseroptische Sensoren [41] zum Einsatz kommen. Für die Ermittlung des Härungsgrades gibt es viele verschiedene Messmethoden. Vollständigkeitshalber seien hier Ultraschallsensoren, faseroptische Sensoren und Sensoren basierend auf Infrarotspektrometrie erwähnt [41].

2.7.5 Füllprobleme

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln angedeutet, können Probleme bei der Formfüllung auftreten. Es sollen nun die häufigsten Fehler und deren Ursachen sowie Vermeidung bzw. die Lösungsstrategien diskutiert werden.

- Trockenstellen

Es handelt sich hierbei um Stellen im Bauteil, die nicht ausreichend mit Matrixmaterial getränkt worden sind. Sie entstehen durch ungünstige Lage der Entlüftungs- und Angusspunkte [5, 12]. So kann in der Kavität befindliche Luft von Matrixmaterial eingeschlossen werden und vom Austreten an den Entlüftungspunkten gehindert werden. Liegen die Trockenstellen nahe

den Entlüftungspunkten und entsprechend strömungsgünstig, so kann Spülen der Kavität mit überschüssigen Harz Abhilfe verschaffen. Jedoch sollte im Sinne der Ressourcenschonung darauf verzichtet werden. Eventuell bringt das Ändern der Injektionsstrategie durch Vertauschen von Anguss- und Entlüftungspunkten den gewünschten Erfolg. Im schlimmsten Fall muss das Werkzeug überarbeitet werden [5].

- Luftbläschen und Lunker

Luftbläschen bilden sich meist durch Einschlagen von Luft an der Fließfront. Denkbar sind zwei unterschiedliche Varianten. Durch das makroskopische Umfließen der einzelnen Faserbündel treffen ständig Fließfronten der einzelnen Teilströme um das Faserbündel aufeinander. Hier kann, wie für das Zusammenfließen zweier Fließfronten typisch, Luft eingeschlossen werden. Der zweite Beitrag kommt von der Tränkung der Faserbündel selbst. Durch das Umfließen wird das im Faserbündel vorhandene Luftvolumen in gewisser Weise eingeschlossen [13, 33]. Erfolgt nun die Tränkung des Bündels selbst, wird die Luft aus dem Inneren des Bündels verdrängt und in den umströmenden Harzstrom abgegeben. Dadurch finden sich meist im fließfrontnahen Bereich vermehrt Fehlstellen als anderorts im Bauteil. Spülvorgänge und Evakuieren der Formhöhlung vor der Injektion können sich positiv auf den Bläschenanteil auswirken. Jedoch ist beim Evakuieren mit ausgasenden Harzsystemen Vorsicht geboten [5].

Lunker sind nicht zu verwechseln mit Luftbläschen. Sie bilden sich durch Härtungsschrumpf und sind evakuierte Hohlräume.

- „Race-tracking“

Unter diesem Begriff wird in der Harzinjektionstechnik das Voreilen der Fließfront verstanden. Üblicherweise tritt dieses Phänomen in Bereichen hoher Permeabilität (bzw. mit niedrigem Faservolumengehalt), wie bspw. an Bauteilrandbereichen oder –kanten auf. Bei ungünstigen Verhältnissen kann das Voreilen der Fließfront zum Einschließen von Luft und so zu Trockenstellen führen [5]. Durch gezieltes Einsetzen von Harzleitkanälen kann die Formfüllung verbessert werden [34].

- „Fiber wash-out“

Fällt das Gleichgewicht zwischen Schubspannungen zufolge des Druckgradienten und Haftreibungskräfte aufgrund der Kompaktierung der Preform zugunsten der Reibungskräfte aus, so verharrt die Faserstruktur während der Injektion an der vorgesehenen Stelle. Ist jedoch das Injektionsdruckgefälle zu groß, so gleiten die Fasern aufeinander ab und können eine beträchtliche Verschiebung erfahren. Dadurch wird die Orientierung der Fasern erheblich gestört. Bauteile, bei denen die Orientierung der Fasern eine wichtige Rolle spielen, sind dann als Ausschuss zu verwerfen [5].

- Überströmen der Verstärkungsstruktur

Bei zu niedrigem Faservolumengehalt kann es neben dem „Fiber wash-out“ auch zum „Aufschwimmen“ der Faserstruktur führen. Dabei bildet sich durch das Verdrängen der Faserverstärkung eine Art Fließkanal, in dem das Harz ganz ähnlich dem „Race-tracking“ voreilt. Um dieses Problem zu vermeiden muss entweder der Injektionsdruck gesenkt, der Faservolumengehalt erhöht oder eine steifere Preform (höhere Widerstand gegen Kompaktierung) verwendet werden [5].

- Probleme mit Sandwichbauteilen

Bei Bauteilen mit einem Kern aus Holz, Schaum oder ähnlich harzundurchlässigem Material kann es zu einer speziellen Fließsituation kommen. Ist auf einer Seite des Kernes die Fließfront schneller als auf der anderen Seite, so ergibt sich aufgrund des Injektionsdrucks und der unterschiedlichen, umspülten Flächen eine Reaktionskraft, die das Kernmaterial verschieben kann. Durch das Auftreiben des Fließkanals der voreilenden Front kann sich diese Situation weiterverschärfen. Eine Schließkrafterhöhung kann die Situation entschärfen [5].

Bei geschäumten Kernen können Injektionsdrücke zum Kollabieren der Schaumzellen führen. Das so freiwerdende Gas erzeugt eine erhöhte Porosität. Der getränkte Schaumkern wird durch das Harz unnötig schwer und erhöht somit das Gesamtgewicht des Bauteils. In beiden Fällen ist die Senkung des Injektionsdrucks ein Mittel zum Erfolg.

- Vorzeitiges Gelieren

Bei sehr reaktiven Harzsystemen bzw. langen Füllzeiten kann die Topfzeit des Harzsystems überschritten werden. Die Viskosität steigt in diesem Fall stark an und verhindert somit im schlimmsten Fall die vollständige Tränkung der Faserstruktur [4].

2.8 Härtung

Während der Härtung läuft eine komplexe, chemische Reaktion ab. In Kapitel 2.4.4 wurde der grundlegende Chemismus der Epoxidhärtung vereinfacht dargestellt. Während dieser Reaktion treten drei für die Verarbeitung wesentliche Phänomene auf. Diese sind die Exothermie der Reaktion, die Viskositäts- und eine gleichzeitige Volumensänderung [3].

2.8.1 Exothermie

Man versteht unter Exothermie das Freiwerden von Wärme während einer chemischen Reaktion. Durch die Bildung von chemischen Bindungen während der Vernetzung wird Energie frei. Kann diese Energie nicht ausreichend abgeführt werden, macht sie sich durch einen Temperaturanstieg bemerkbar [3, 15]. Dieser Temperaturanstieg beschleunigt die ablaufenden chemischen Reaktionen wiederum. Eine Aussage über die Exothermie eines Harzansatzes kann mittels sogenannten Härtungskurven bestimmt werden. Es wird der Temperaturanstieg von Reaktionsharzen während der Härtung bestimmt. Ausgangspunkt ist der homogen gemischte Reaktionsansatz bei Raumtemperatur. Bei radikalischen Harzsystemen beginnt die Temperatur erst nach einer Inhibitionsphase zu steigen bis es eine Maximaltemperatur erreicht. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch noch nicht alle Reaktionspartner verbraucht. Es läuft die Reaktion lediglich verlangsamt ab. Manche Harzsysteme brauchen für die vollständige Härtung eine weitere Energiezufuhr in Form von Wärme für die durchzuführende Nachhärtung [3]. Es muss angemerkt werden, dass dickere Bauteile eine höhere Kerntemperatur erreichen, da die Wärmeabfuhr entsprechend herabgesetzt ist. Dies kann sogar bis zum thermischen Abbau des Matrixmaterials gehen [5].

2.8.2 Viskositätsänderung

Wesentlichen Einfluss auf die Viskosität des Reaktionsansatzes besitzt die Temperatur. Es ist daher zwischen isothermen und nicht-isothermen Bedingungen zu unterscheiden. Bezogen auf den Viskositätsverlauf stellen isotherme Bedingungen die einfachere Situation dar. Der typische zeitliche Verlauf der Viskosität ist eine exponentiell steigende Kurve. Bei nicht-isothermen Bedingungen führt die freiwerdende Reaktionsenergie zum Ansteigen der Temperatur. Diese wiederum wirkt der vernetzungsbedingten Viskositätssteigerung entgegen und führt zu Beginn der Reaktion zur Senkung des Viskositätsniveaus, bevor dieses rasant ansteigt [3]. Höhere Temperaturen führen zu niedrigeren Ausgangsviskositäten, aber bedingen eine schnelle Härtingsreaktion, weshalb früher die verarbeitungskritische Viskositätsgrenze erreicht wird. Üblicherweise werden Viskositätskurven bei isothermen Bedingungen in einem Rotationsviskosimeter aufgenommen [4].

Zur Bestimmung der Gelzeit gibt es weitere, technologische Bestimmungsmethoden. Als Gelzeit wird dabei die Dauer bezeichnet bis zu der ein Messstempel nicht mehr aus der Prüfmischung herausgezogen werden kann. Ein ähnlicher Begriff ist die Topfzeit, jedoch ist diese praxisrelevanter, da sie mit größeren Harzmengen ermittelt wird, während die Gelzeit bessere Aussagen zu den theoretischen Betrachtungen der Härtung liefert [3].

Unabhängig von Harzansatzmenge ist der Gelpunkt. Er bezeichnet denjenigen Härtungsumsatz, bei dem das erste Molekül theoretisch ein unendlich großes Molekulargewicht erreicht. Praktisch lässt sich das Material ab Erreichen des Gelpunkts nicht mehr lösen oder als fließfähige Masse verarbeiten. Der Gelpunkt ist auch weitestgehend unabhängig von Druck und Temperatur, sofern diese Parameter nichts an der gebildeten Netzwerkstruktur ändern [3]. Harze, die nach Additions- und Kondensationsreaktionen reagieren, weisen hohe Umsätze bei Erreichen des Gelpunkts auf. Hingegen radikalisch polymerisierende Systeme gelieren bereits bei weit niedrigeren Umsätzen. Der Grund dafür liegt in der chemischen Struktur. Die Ausgangsprodukte für Polyadditionsreaktion weisen verhältnismäßig wenige reaktive Zentren auf und müssen für die Bildung dichter Netzwerke eine große Anzahl dieser aufbrauchen. Ausgangsstoffe von polymerisierenden Harzen

hingegen sind sehr hoch funktionell und müssen verhältnismäßig wenige ihrer Anknüpfungsstellen verbrauchen um dichte Netzwerke zu formen. Die verbleibenden reaktiven Zentren reagieren erst zu späteren Zeitpunkten [3].

Als Folge dessen läuft bei radikalisch härtenden Materialien nach dem Gelieren noch ein Großteil der Reaktionen ab, während bei Additionsprodukten die Reaktion zum größten Teil bereits abgeschlossen ist. Ab dem Gelpunkt ist die Diffusionsfähigkeit stark reduziert. Dies hat in weiterer Folge einen wesentlichen Einfluss auf das Schwindungsverhalten der Materialien und bedingt den großen Härtungsschwund bei radikalisch polymerisierenden Materialien [3].

2.8.3 Volumensänderung

Während der Härtung durchläuft das Matrixsystem einen Übergang vom flüssigen zum festen Zustand. Damit einhergehend erfolgt eine Zunahme der Dichte. Meist läuft jedoch diese Härtung bei erhöhten Temperaturen ab, wodurch vorgelagert durch das Aufheizen eine thermische Expansion des Reaktionsgemisches zu verzeichnen ist. Nicht-isotherme Verhältnisse können in einer geschlossenen Kavität auch zu Druckspitzen führen [15]. Nach der Härtung folgt die Abkühlphase. In dieser Phase kommt die thermische Schwindung zu tragen. Charakteristisch für die Längenänderung ist dabei der Wärmeausdehnungskoeffizient. Für Abkühlungsprozesse oberhalb des Glasübergangs sind starke Kontraktionen zu verzeichnen, während unterhalb das Material glasartig erstarrt ist und aufgrund der Steifigkeit nur geringere Wärmedehnungskoeffizienten aufweist. Da die Glasübergangstemperatur im Allgemeinen mit dem Härtingsgrad bis zu einem Plateau ansteigt, gilt folgender Zusammenhang zwischen Härtingsgrad und thermischer Schwindung. Materialien die (nahezu) vollständig gehärtet sind, erreichen beim Abkühlen bei höheren Temperaturen den Glasübergang. Somit erfahren diese bei der Abkühlung geringe Schwindung als unvollständig gehärtete Materialien, die erst bei niedrigeren Temperaturen den gummielastischen Bereich verlassen und ihre Endsteifigkeit erreichen [3]. Die Schwindung des Harzsystems ist hauptverantwortlich für eine ganze Reihe von Härtungsproblemen. Dazu zählen Delaminationen, Lunker, Oberflächendefekte und Eigenspannungen der Bauteile [5].

2.9 Entformung und Nachbearbeitung

Die Entnahme des Bauteils aus dem Werkzeug kann ein zeitaufwendiges Unterfangen sein. Daher gilt es im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Produktivität bereits in der Werkzeugdesignphase ein betriebsfähiges Entformungskonzept zu entwickeln. Auch kann ein fehlerhaftes oder unzureichendes Entformungskonzept ein schädigungsfreies Entformen der Bauteile unmöglich machen.

Die mechanische Entformung kann auf mehrere Arten realisiert werden. Wie bereits eingangs erwähnt, kann das Auswerfen des Bauteils durch Auswerferstifte und Abstreiferplatten, das Freigeben von Hinterschneidungen durch Schieber- und Backenelemente ähnlich der Spritzgusswerkzeugtechnik realisiert werden. Besonderes Augenmerk sollte auf die Spaltmaße gelegt werden, um ein Eindringen des Matrixmaterials und folglich ein Festkleben der Einsätze zu verhindern. Für weniger komplexe Bauteile, die bspw. einen eher einfachen, schalenförmigen Aufbau vorweisen, kann das Auslösen aus der Form durch Heraushebeln möglich sein. Dafür werden meist Aussparungen am Kavitätsrand vorgesehen, die ein Ansetzen der Hebel erlauben. Diese Hebel müssen aus einem weicherem Material als das Werkzeugmaterial gefertigt sein, um Schäden zu vermeiden. Für den Großserieneinsatz erweisen sich Entnahmeroboter als vorteilhaft, da die Entnahme somit automatisiert und gleichzeitig bauteilschonend vorgenommen werden kann.

Die Nachbearbeitung sollte im Sinne der Wirtschaftlichkeit auf ein Minimum reduziert werden [15]. Lässt sie sich nicht vermeiden, sind so viele Schritte wie möglich automatisiert zu gestalten, wenn Großserien bedient werden müssen. So können Mehrachsenroboter die Bauteile nach Entnahme aus dem Werkzeug auf dafür vorgesehene Aufspanneinrichtungen ablegen und in weiterer Folge bspw. spanend bearbeiten [11]. Für Kleinserien und Prototypen kann es sich als zielführend erweisen, von einem komplexen Werkzeugdesign Abstand zu nehmen und die notwendigen Nachbearbeitungsschritte gezielt in Kauf zu nehmen [9].

2.10 Arbeitssicherheit

Abschließend sei dieser Abschnitt der Arbeitssicherheit gewidmet. Bei den Harzinjektionstechniken wird mit flüssigen Reaktionsharzen gearbeitet, die im Allgemeinen nicht als unbedenklich einzustufen sind. So sind am Beispiel von Epoxidharzen die reizende Wirkung der meist basischen Härterssysteme sowie die allergene Wirkung dieser Reaktionsmischungen zu nennen. Neben der chemischen Belastung kommen noch Gefahren des Maschinenparks, wie Quetschgefahr, Verbrennungsgefahr und Gefahren ausgehend von unter druckstehenden Gefäßen hinzu. Bei der Konfektionierung der Faserstruktur und der Nachbearbeitung der Bauteile ist auf die Staubbelastung zu achten.

Die persönliche Schutzausrüstung hat daher Schutzbrille, Arbeitshandschuhe und entsprechende Schutzkleidung wie Arbeitsmäntel und Sicherheitsschuhe zu umfassen. Für die Arbeitsschritte mit Staubbelastung sind eine entsprechende Absaugung und/oder eine Staubmaske vorzusehen. Generell ist auf ausreichend Belüftung der Arbeitsstätte zu achten, da die Einsatzstoffe Dämpfe emittieren.

3 VERWENDETE MATERIALIEN

Ausgehend von der zuvor vorgestellten Prozesskette sollen in diesem Abschnitt die Ausgangspunkte für die RTM-Versuche, die verwendeten Materialien und der dazugehörige Entscheidungsprozess zur vorliegenden Arbeit dargelegt werden.

3.1 Bauteil

Das hergestellte Versuchsbauteil besitzt eine relativ komplexe Geometrie. In Abbildung 10 ist eine CAD-Darstellung der Bauteilgeometrie ersichtlich. Axial lässt sich das Bauteil in zwei Bereiche unterteilen: einen rotationssymmetrischen Bereich und ein Bereich mit quadratischer Querschnittsfläche. In der Mitte des Bauteils befindet sich eine Struktur, die aus zwei Kegelstümpfen aufgebaut ist. Die Verschneidung eines Kegelstumpfes mit dem Bereich quadratischer Querschnitte resultiert in einer komplexen geometrischen Situation. Die Preform wird aus einem Kernmaterial und einer zu wählenden Faserstruktur hergestellt.

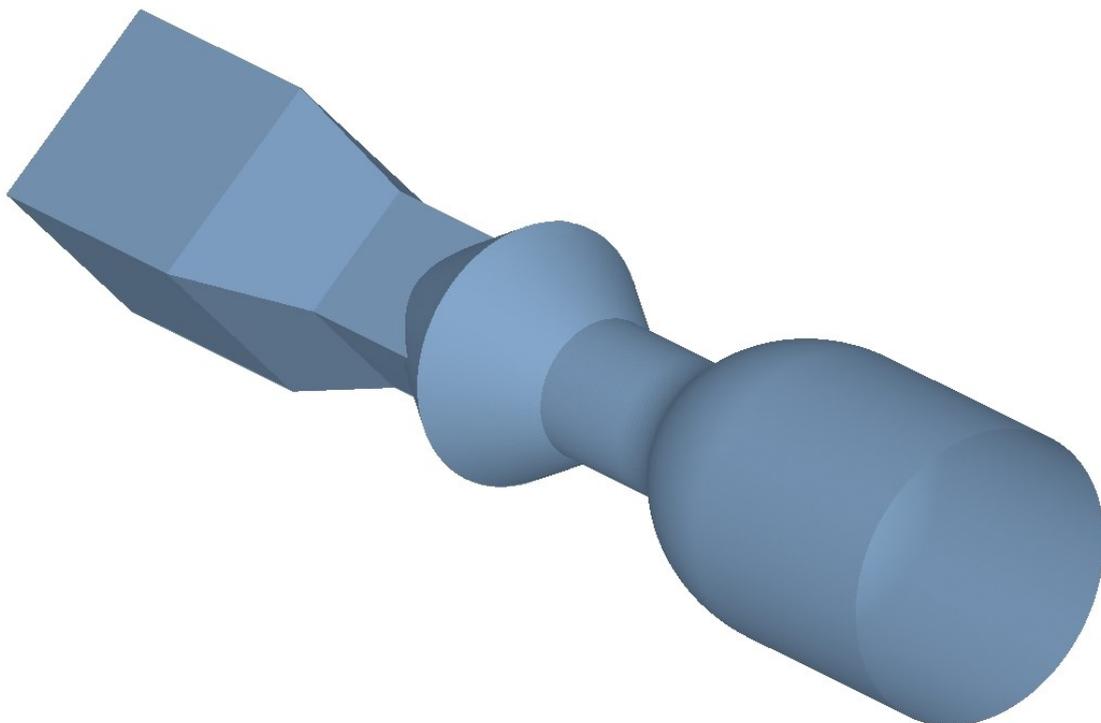


Abbildung 10: Bauteilgeometrie.

3.2 Werkzeug

Bei dem verwendeten Werkzeug handelt es sich um eine Leihgabe der Firma PRECUPA GmbH an den Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen (LVV). Es besteht aus zwei Formplatten, gefertigt aus Aluminium. Die Oberform weist dabei zwei Zentrierkoni auf, die für ein zentrisches Zusammenführen in die entsprechenden Gegenstücke in der Unterform eingreifen. Die Unterform besitzt wie aus Abbildung 11 ersichtlich, eine umlaufende Nut in der Trennebene, in der ein Silikonschlauch zu Dichtzwecken eingelegt ist. Außerdem weist die Oberform zwei Angussbohrungen und eine Abgussbohrung auf, die eine Harzinjektion ermöglichen. Außenliegend sind diese Bohrungen mit einem Gewinde versehen, sodass Doppelnippel eingeschraubt werden können. Durch diese Doppelnippel werden die Anguss- und Abgusschläuche bis zur Formhöhlung eingeführt und mittels einer Schneidringverschraubung am Doppelnippel fixiert.

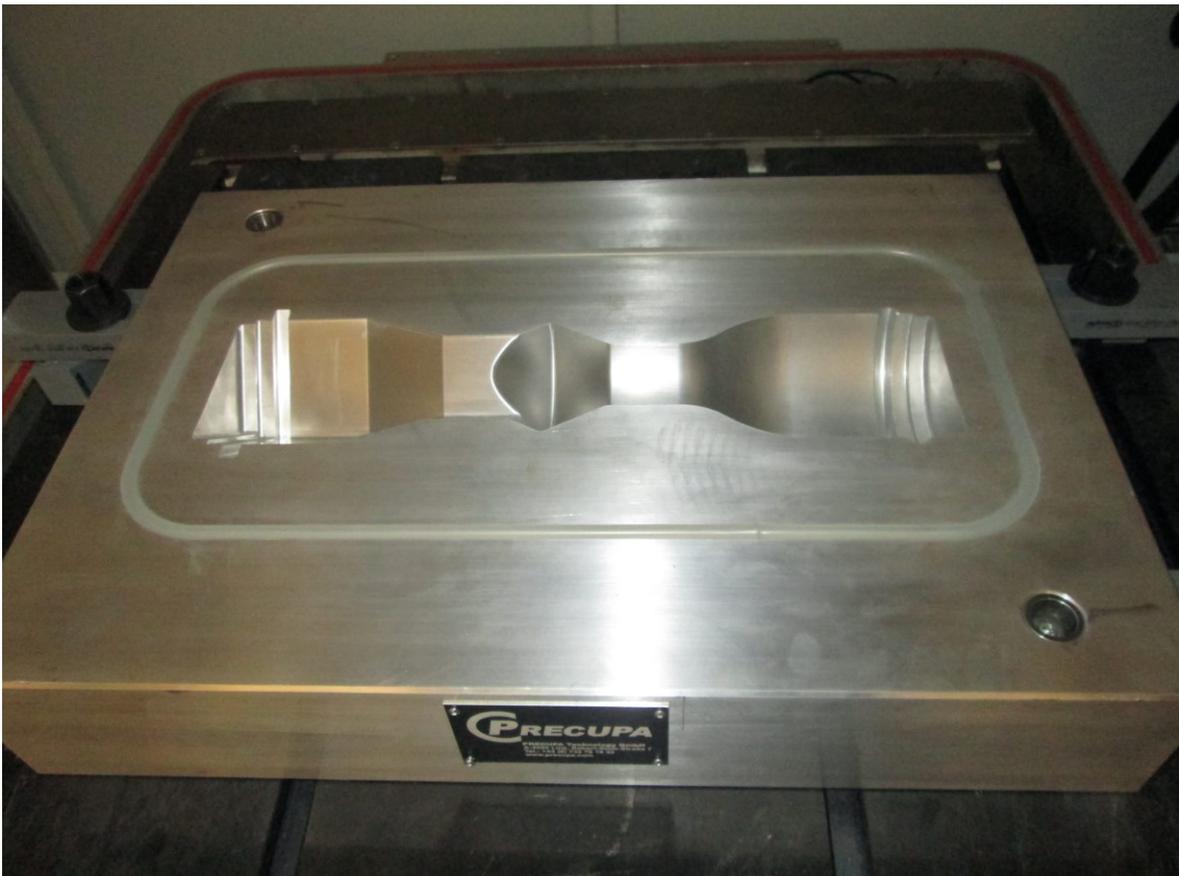


Abbildung 11: Aufgespannte Werkzeugunterform mit Kavität, Zentrierkoni und Dichtring.

Das Werkzeug besitzt an beiden axialen Enden der Kavität speziell gestaltete Fräsungen. In Abbildung 12 ist das Kavitätende des Bereichs mit quadratischem Querschnitt der Unterform dargestellt. Die hervorgehobenen Abstufungen sind von links nach rechts, die Kernauflage, der Fließkanal und der Harzverteilerkanal. Die Kernauflage dient zur Positionierung des Bauteilkernes in der Kavität. Bei entsprechender Fertigung des Kernes ist dieser gegen axiales und radiales Verrutschen nach dem Schließen des Werkzeuges gesichert. Der Fließkanal ist etwas weiter ausgeformt als die Kernauflage und gibt somit einen Spalt zwischen Kern und Werkzeugwand frei, der während der Injektion vom Reaktionsharz durchströmt wird. Er setzt sich auf der anderen Seite des Harzverteilerkanals fort. Der Harzverteilerkanal selbst hat die Aufgabe zu Beginn der Injektion das Harz radial zu verteilen um einen gleichmäßigen axialen Fließfrontfortschritt zu gewährleisten. Die Angussbohrungen führen direkt in den Harzverteilerkanal. Sie sind jedoch im Oberwerkzeug ausgeführt und daher in Abbildung 12 nicht ersichtlich.

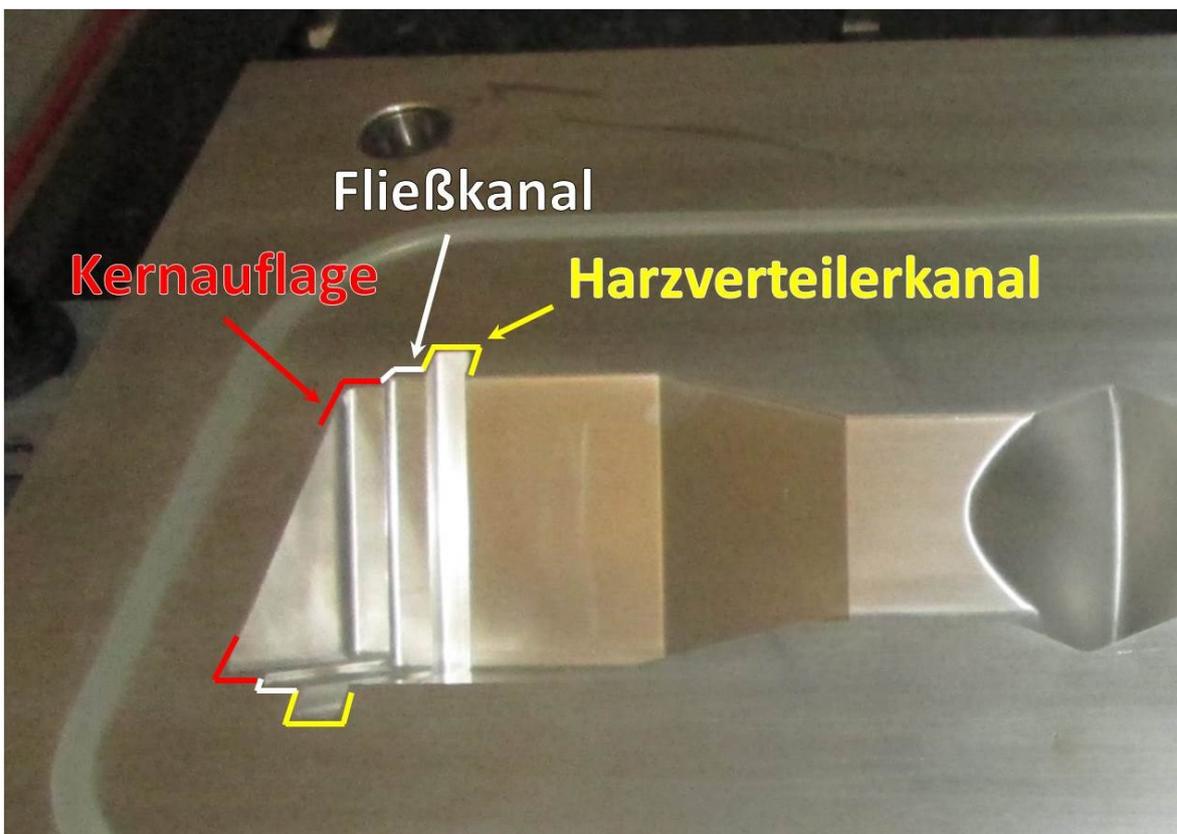


Abbildung 12: Kernauflage und Harzverteilerkanal in der Unterform.

3.3 Kernmaterial

Als Kernmaterial wurde ein Polyurethanschaum mit einer Dichte von 100 kg/m^3 verwendet. Die Kerne wurden durch die SFK Tischler GmbH/Kirchham hergestellt. Die Kerne wurden aus zwei Teilen gefertigt, die mit einer CNC-Fräsmaschine aus dem Vollen gefräst und anschließend verklebt wurden.

3.4 Faserhalbzeug

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll u.a. die optimale Textilarchitektur für das vorgestellte Bauteil ermittelt werden. Zunächst wurden einige flächige Textilstrukturen ausgewählt. In weiterer Folge wurden Geflechte untersucht. Dabei wurden Flechtschlauchhalbzeuge und direkt beflochtene Kerne verwendet.

3.4.1 Flächige Textilhalbzeuge

Zur Untersuchung des Drapierverhaltens bei komplex gekrümmten Bauteilen wurden vier flächige Textilhalbzeuge ausgewählt. Diese sind in Abbildung 13 und Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der flächigen Textilien.

	Herstellerbezeichnung	Hersteller	Bindung	Flächengewicht [g/m^2]
# ↑	02C600K	Hexcel	2-2 Köper	600
# ↓	Style 452	C. Cramer	2-2 Köper	204
≡ 0/90	BNCF-24KIMS-(0/0/90)- 582-1400	Cytec Industries Inc.	Gelege 0°/90°	596
≡ ±	BNCF-24KIMS-(-/+)-388- 1400	Cytec Industries Inc.	Gelege ±45°	402

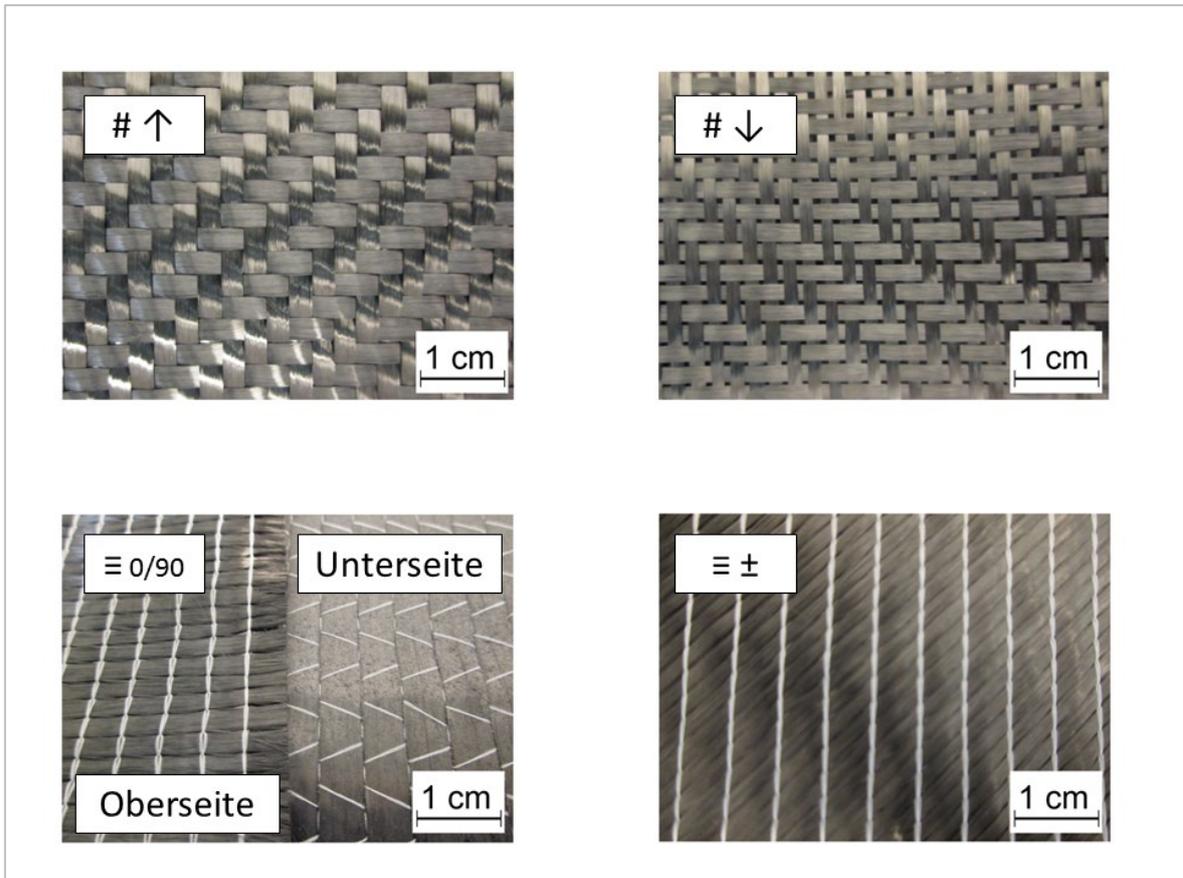


Abbildung 13: Flächige Textilhalbzeuge für die Drapierstudie.

3.4.2 Flechtschläuche

Als Vergleich zu den genannten flächigen Textilien wurde ein Geflechtschlauch der Firma Eurocarbon B.V. herangezogen. Bei dem verwendeten Halbzeug mit der Artikelnummer D144/11 handelt es sich um einen Carbonfasergeflechtschlauch hergestellt aus 144 Einzelrovings und einem Nenndurchmesser von 90 mm bei 45° Faserwinkel. Die einzelnen Flechfäden sind 12 k T300 Rovings, wodurch sich ein Nenngewicht von 164 g/m ergibt. Das Produkt wird als Rollenware angeliefert und wurde abgesehen vom Zuschnitt im Ursprungszustand verwendet. In Abbildung 14 ist eine Materialprobe dargestellt. Sie ist an den axialen Enden mit Klebefilm gegen das Ausfransen geschützt und flachgedrückt abgebildet.



Abbildung 14: Geflechschlauchhalbzeug D144/11 von Eurocarbon.

3.4.3 Direktes Beflechten

Als weitere Preformtechnik wurde das Direktbeflechten gewählt. Dazu wurden die Schaumkerne auf einem KUKA Mehrachsenroboter am Roboterkopf montiert und durch das Fadenauge einer Flechtmaschine geführt. Die Beflechtung wurde von der Firma Teufelberger GmbH/Wels durchgeführt. Die verwendete Flechtmaschine ist eine HERZOG Radialflechtmaschine 64. Die Maschine war mit 64 Klöppeln, in einfacher Fachung besetzt. Die erzeugte Flechtstruktur ist biaxial, die Flechtfaserspannung betrug 350 g. Für die Beflechtung wurde ein 12 k Carbonfaseroving der T700 Faser von Tejin Ltd./USA verwendet. In Abbildung 15 ist der beige Schaumkern in der Bildmitte erkennbar. Er befindet sich mit dem rotationssymmetrischen Ende bereits im Fadenauge. Auf der rückwertigen Seite ist der Roboterkopf in orange zu erkennen. Weiter sind die Klöppel in rot und weiß auf dem Flügelrad zu erkennen.

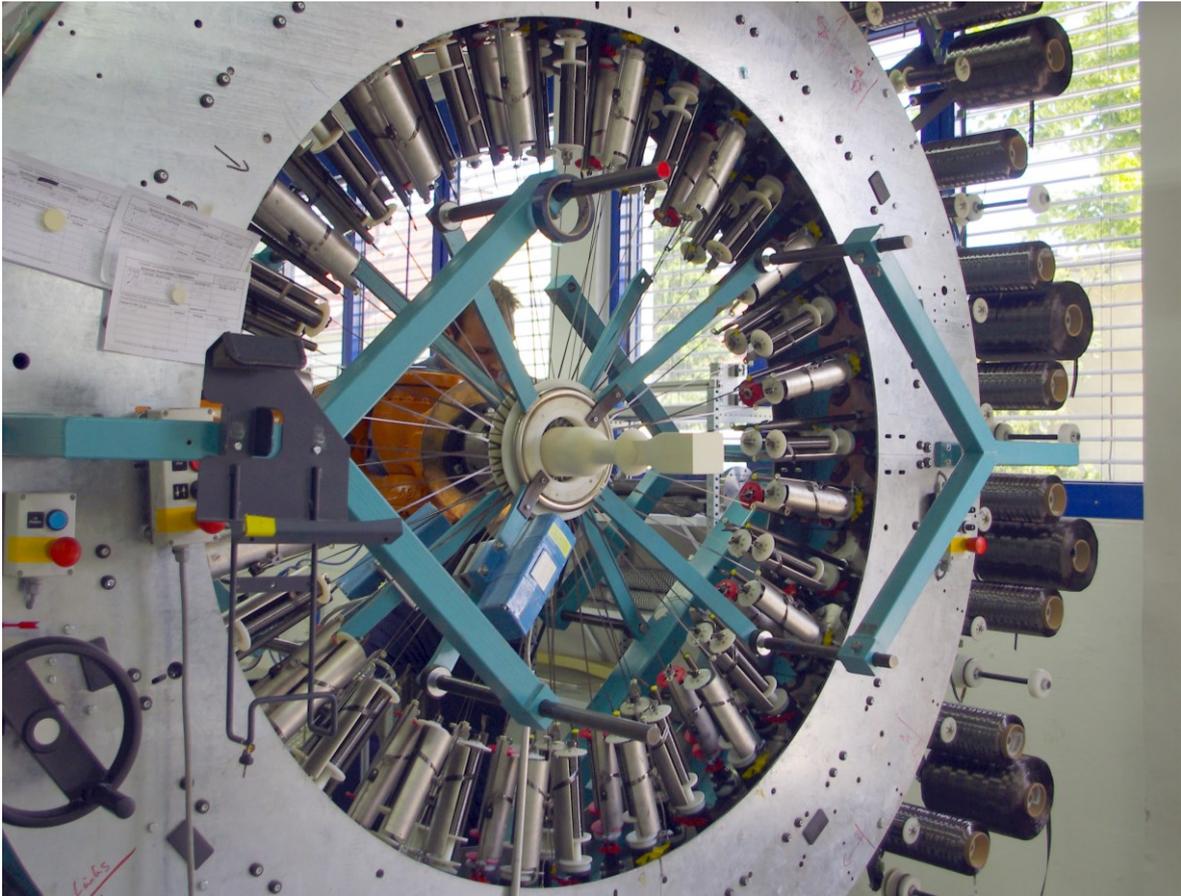


Abbildung 15: Direktes Beflechten des Schaumkerns mit einer Radialflechtmaschine.

3.5 Matrixmaterial

Das eingesetzte Matrixmaterial EPIKOTE™ Resin MGS® RIMR135 ist ein 2-Komponenten-Epoxidharzsystem mit mehreren verfügbaren Härtertypen. Der verwendete Härter ist EPIKURE™ Curing Agent MGS® RIMH1366. Die Materialien wurden über den Vertriebspartner Lange+Ritter GmbH bezogen und unmodifiziert laut Datenblatt weiterverarbeitet.

Die Entscheidung für dieses Harz/Härterssystem ist aufgrund der gutmütigen Verarbeitungseigenschaften (niedrige Viskosität, lange Topfzeit) und der expliziten Ausweisung als Infusions- und Injektionsharz gefallen. Außerdem war dieses Harzsystem bereits im Bestand des LVVs vorhanden und aus anderen Projekten bekannt.

3.6 Verbrauchsmaterialien und Werkzeuge

Für die Versuchsdurchführung von Preforming bis Injektion wurden verschiedene Verbrauchsmaterialien benötigt. Der Prozesskette folgend waren dies folgende Materialien.

Vor dem Eintrennen der Kavität wurde diese mit Reinigungsmitteln gereinigt. Für die Versuche mit Trennwachs wurde dazu „Sika[®] Mold Cleaner“ und für die Versiegelung „Sika[®] Mold Sealer“ verwendet. Für die Versuch mit Flüssigtrennmittel kam „Chemlease[®] Mold Cleaner EZ“ zum Einsatz. Die verwendeten Trennmittel für das Eintrennen der Kavität waren „Sika[®] Trennwachs“, „PTFE-Spray PS 602“ von Tectane[®] sowie das Flüssigtrennmittel „Chemlease[®] R&B EZ“ der Firma Chemtrend.

Für die diversen Preformingschritte kamen Flashtape, Sprühkleber „Aerofix 2“ von Aerovac (Umeco Group), handelsübliche Klebestreifen zum Abkleben bestimmter Bereiche, mehrere Rollmesser und Carbonscheren zum Einsatz. Außerdem wurde eine PE-Schaumfolie mit einer Dicke von etwa 1 mm zur Herstellung von Schneid-
schablonen verwendet.

Zur Herstellung der Anbindung zwischen Injektionskopf und Werkzeug sowie der Abgussleitung kamen PE-Schläuche mit 10 mm Durchmesser und PA-Schläuche 8 mm zum Einsatz. Zusätzlich wurden für diese Zwecke je Versuch 3 Schneidringe mit Nenndurchmesser von 8 mm und je ein Y-Verteilerstück mit Nenndurchmesser von ebenfalls 8 mm benötigt.

Für Dichtungsaufgaben bei den Schlauchverbindungen wurde Vakuumdichtband (Tackytape) G-seal-205-ms und insgesamt je Versuch 5 Schlauchschellen eingesetzt. Zusätzlich wurden mehrere Becher/Kübel bereitgestellt, sowie Kartonplatten zum großflächigen Abdecken des Laborbodens aufgelegt.

Nach jeder Injektion wurde der eingesetzte Einweg-Statik/Dynamik-Mischeraufsatz entsorgt und die Anlagenteile, welche mit dem Reaktionsharz in Berührung gekommen sind mit dem Acetonersatzstoff „RST-5 Black“ von Mulder-Hardenberg GmbH gereinigt. Tarmol[®]-Dichtfett wurde nach erfolgter Reinigung zur Versiegel-

ung des Injektionskopfes angewandt. Weiter wurden Papiertücher, Laborhandschuhe, ein Staubsauger, PE-Abdeckfolie und ein Werkzeugwagen bereitgestellt.

3.7 Maschinen und Anlagen

Eine zentrale Rolle der vorliegenden Arbeit stellte die Injektionsanlage des LVV vom Typ Nodopur VS-2K (Ing. Büro Tartler GmbH) dar. Diese Anlage ist eine 2-Komponenten Kunstharzdosier- und mischanlage. Sie besteht im Wesentlichen aus zwei unter druckstehenden Vorratsbehältern mit je einer Zahnradpumpenpumpe, einem Schlauch- bzw. Rohrleitungssystem mit der Möglichkeit der Kreislauf-förderung und einem Mischkopf, der aus diesem Schlauchsystem gespeist wird.

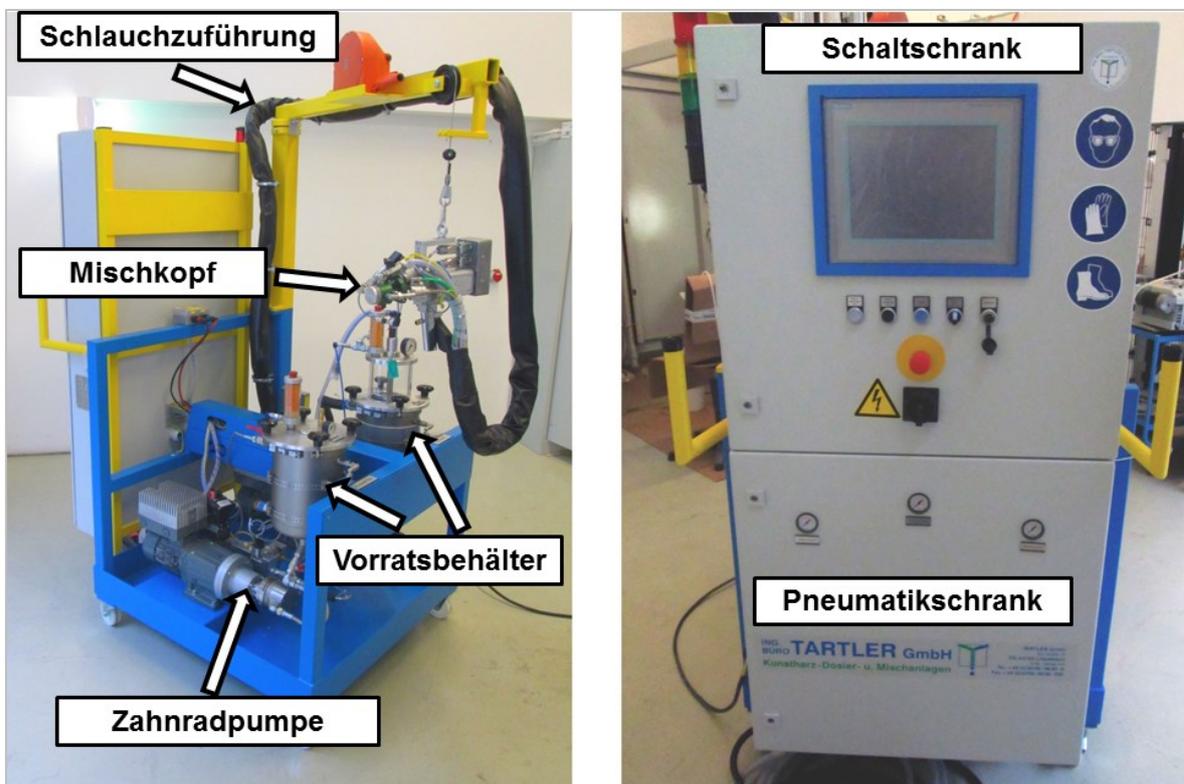


Abbildung 16: 2-Komponenten Kunstharzdosier- und mischanlage Nodopur VS-2K mit rückwärtiger Maschinenanlage und frontseitiger Bedienelemente.

Neben der Injektionsanlage, ist eine Presse als Werkzeugträger zum Einsatz gekommen. Die Presse WICKERT 3500 S (WICKERT Maschinenbau GmbH) ist eine Hydraulikpresse mit einer Maximalschließkraft von 3500 kN. Als minimal regelbare Schließkraft werden 300 kN angegeben. Die Presse ist mit Heizelementen in den

Aufspannplatten mit je neun Heizzonen ausgestattet, die ein Durchwärmen der beiden Werkzeughälften erlaubten. Des Weiteren wurde für die Versuche mit Vakuumunterstützung und zum Entgasen des Harzes eine Vakuumpumpe inklusive einer Harzfalle eingesetzt.

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Für die einzelnen Versuche sind komplexe Handlungsabfolgen abzuarbeiten, die jedoch einen gewissen Routinecharakter aufweisen. Diese entwickelte Prozessroutine soll hier nachvollziehbar und reproduzierbar dargelegt und ausführlich erläutert werden. Eine Kurzversion dieser Routine findet sich im Anhang dieser Arbeit in Form einer Checkliste.

4.1 Aufspannen und Vorbereitung des Werkzeugs

Nach dem Hochfahren des Pressenbetriebssystem wird die Presse geöffnet und für das Aufspannen der Werkzeughälften vorbereitet. Dazu werden die Aufspanflächen der Presse auf Fremdgegenstände und Verunreinigungen überprüft. Fremdkörper zwischen den Werkzeughälften und den Aufspanplatten können durch den später aufgebracht Pressdruck eine Beschädigung des Werkzeugs oder der Aufspanplatten bewirken. Das auf einer Palette liegende Werkzeug wird mithilfe eines Hubwagens auf die Höhe der unteren Aufspanplatte gehoben, in den Pressenraum geschoben und mittig positioniert. Die exakte Positionierung ist für den schonenden Pressenbetrieb unerlässlich, da sonst ein zusätzliches Biegemoment auf den Presszylinder wirken würde. Für das Aufspannen wird die Presse wieder geschlossen und die Formhöhe dabei bestimmt. Das Aufspannen selbst wird mittels DIN-normierten Spannpratzen, wie in Abbildung 17 dargestellt, realisiert. Dazu werden Schrauben mit speziell profiliertem Kopf in die Fixiernuten der Aufspanplatten eingeführt. Unterlegpakete werden stufenweise auf die notwendige Höhe eingestellt, sodass ein halbwegs waagrechtes Auflegen der Spannpratze ermöglicht wird. Mit einer Beilagscheibe und einer Sechskant-Schraubenmutter wird die Verschraubung fertiggestellt und die Werkzeughälften auf den Aufspanplatten fixiert.

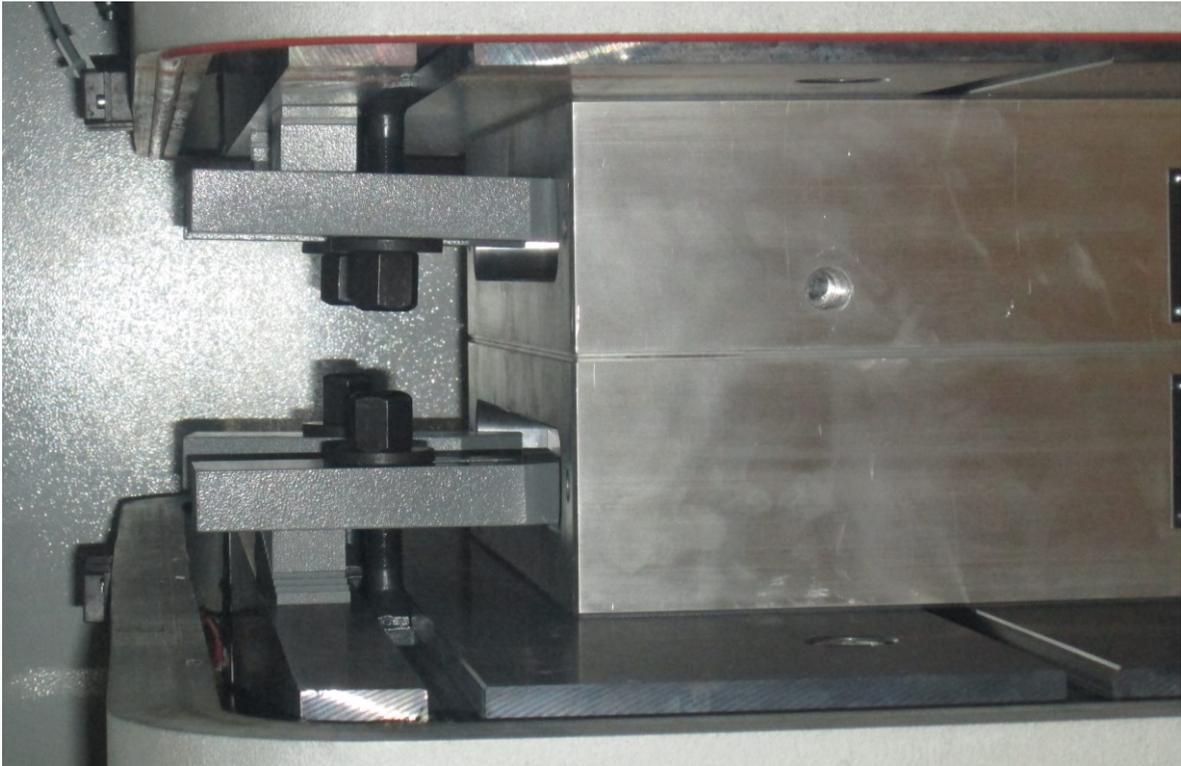


Abbildung 17: Mit Spannpratzen an den Aufspannplatten aufgespannte Werkzeughälften.

Natürlich wird das Aufspannen des Werkzeuges nur zu Beginn der Versuchsserie oder nach anderwärtiger Verwendung der Presse durchgeführt, da ansonsten das Werkzeug in der Presse verbleiben kann.

Nach erfolgreichem Aufspannen des Werkzeuges wird dieses geöffnet und für die Injektion vorbereitet. Zunächst wird das Werkzeug auf Verunreinigungen untersucht und ggf. gereinigt. Nach der Reinigung wird die Kavität mit dem jeweilig gewählten Trennmittel eingetrennt. In die Anguss- und Abgussbohrungen werden die dafür vorbereiteten Doppelnippel eingeschraubt. Zur Dichtung und zum Schutz der Gewindegänge gegen das Injektionsgemisches wird das eingeschraubte Gewinde des Doppelnippels mit Teflonband umwickelt. Die Wickelrichtung sollte so gewählt werden, dass sich das Band während des Einschraubvorgangs selbständig enger zieht. Weiter wird das Werkzeug rechtzeitig vor Injektionsstart auf Prozesstemperatur gebracht, da eine gewisse Temperaturträglichkeit vorhanden ist. Es wurde mindestens eine Stunde vor Injektionsstart mit der Werkzeugtemperierung begonnen.

4.2 Preforming

Als erster Schritt ist das Einpassen der Schaumkerne zu nennen. Trotz der CNC-Fertigung ist eine exakte Positionierung der Kerne nur selten möglich. Abbildung 18 (Foto 1-9) stellt die erforderlichen Arbeitsschritte dar. Es werden zunächst die Kanten an den Bauteilenden gebrochen (Foto 2) und Radien an den Enden geschliffen (Foto 5) um den Kern entsprechend der Kavität anzupassen, vgl. (Foto 1) und (Foto 3) bzw. (Foto 4) und (Foto 6). Ist der Kern für die Werkzeugkavität zu lang bzw. eine Hälfte zu lang, kann durch Kürzen des Kerns (Foto 8) ein zentrierter Sitz in der Kavität (Foto 9) erreicht werden. Für die sich lokal bildende Permeabilität ist die Spaltweite bzw. die Kompaktierung der Faserstruktur [36, 42] von großer Bedeutung. Um konstante Verhältnisse für die einzelnen Versuche zu sichern, ist hier etwas Geduld gefordert.

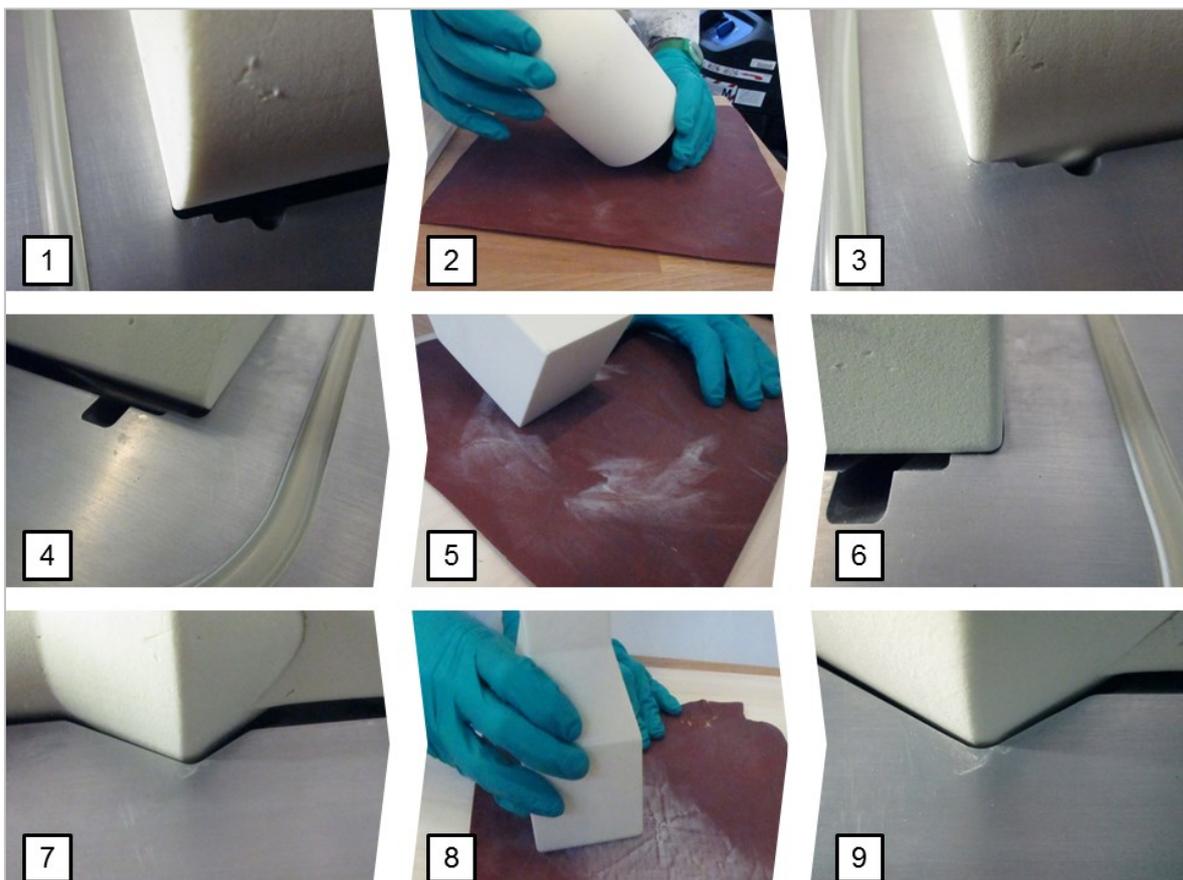


Abbildung 18: Positionierung des Schaumkerns durch Abschleifen in mehreren Schritten: Foto 1-3: Radien anschleifen, Foto 4-6: Kanten brechen und Foto 7-9: Zentrischer Sitz durch Kürzen des Schaumkerns.

Wurde der Kern entsprechend eingepasst und sein Gewicht bestimmt, kann mit der Drapierung der Faserstruktur begonnen werden. Da das Bauteil keine abwickelbare Oberfläche besitzt, kann auch kein Zuschnitt aus einem einzigen Stück flächiger Faserstruktur hergestellt werden. Daher wurden Schablonen erarbeitet, mit deren Hilfe die Zuschnitte der Faserstrukturen, wie Abbildung 19 (Foto 1) andeutet, hergestellt wurden. Für die Drapierung wird der Schaumkern mit Sprühkleber versehen und die Zuschnitte schrittweise aufgebracht (Foto 2–5).

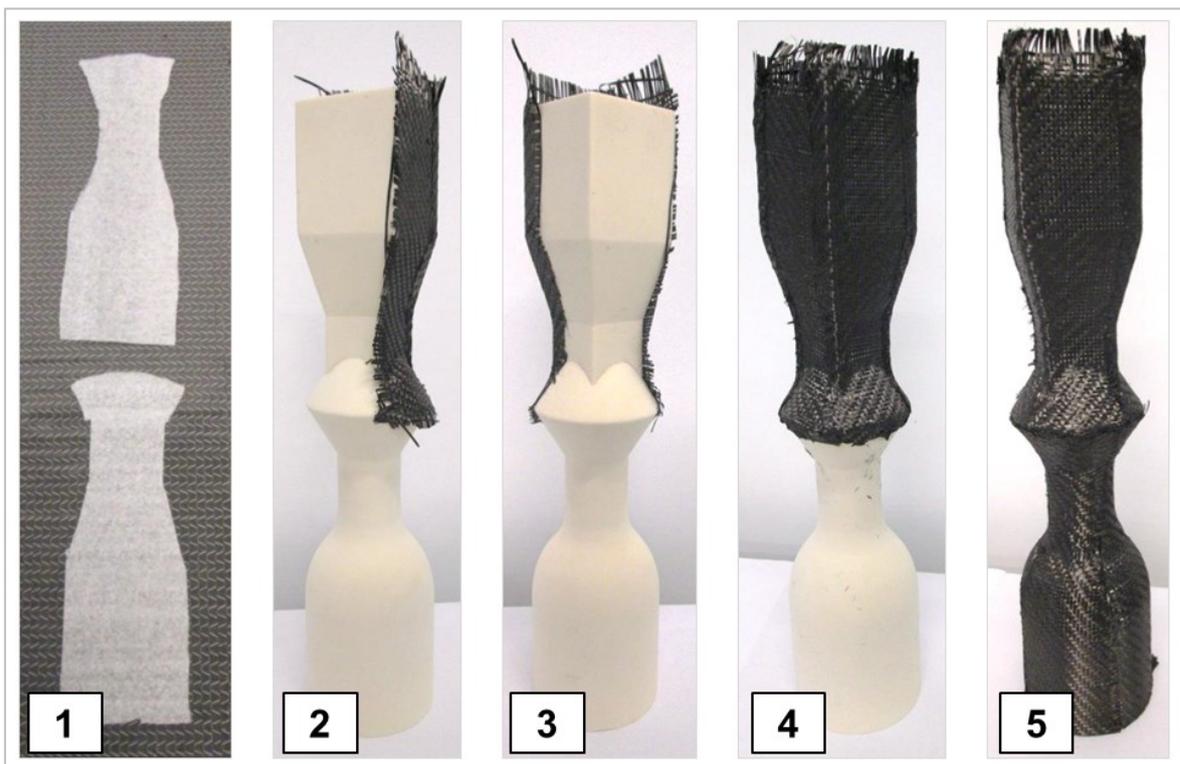


Abbildung 19: Drapieren der flächigen Faserstruktur.

Manuell etwas anspruchsvoller ist das Drapieren der Geflechschlauchhalbzeuge. In Abbildung 20 (Foto 1-12) sind die durchgeführten Arbeitsschritte dargestellt. Dazu wird der Kern auf dieselbe Art und Weise eingepasst und sein Gewicht notiert. Anschließend werden die benötigte Länge und Anzahl an Geflechschläuchen zugeschnitten. Da die Länge eines Zuschnitts eine Funktion des eingestellten Faserwinkels ist und dieser wiederum mit dem Durchmesser bzw. Breite des Schlauches korreliert, wurde beim Ablängen der Rollenware immer auf gleichbleibende Breite des Halbzeugs (Foto 1) geachtet. Vor dem Durchtrennen wird das neuentstehende Ende des Flechtschlauchs mit schwach klebendem Klebefilm ge-

gen Ausfransen gesichert (Foto 2). Die geringe Klebrigkeit ist für das spätere Ablösen von enormer Wichtigkeit, da sonst mehr Schaden als Nutzen generiert wird.

Die erstellten Zuschnitte werden von ihrer flachen, eher bandartigen Rollenwareform zu ihrer schlauchförmigen Struktur übergeführt. Dazu wird der Schlauch geöffnet und durch Stauchen der Durchmesser (Foto 4) vergrößert [1]. Durch Rollen des Schlauches auf der Arbeitsoberfläche (Foto 5) kann die Längsfalte (vgl. Bügelfalte einer Hose) entfernt werden. Um die Vorbereitung abzuschließen, werden die Geflechschläuche schließlich gestaucht um einen möglichst großen Durchmesser zu erzielen (Foto 6) und mit vertikaler Ausrichtung der Längsachse auf die Arbeitsfläche gestellt (Foto 7).

Der Schaumkern wird an den Enden umlaufend mit schwach klebendem Klebestreifen abgeklebt um beim nachfolgenden Aufbringen des Sprühklebers klebstofffreie Bereiche zu schaffen. Ohne diese Abklebungen würde sich das Handling des Schaumkerns ungemein verschlechtern, da ein Angreifen des Schaumkerns ohne festzukleben kaum möglich wäre. Nach dem Aufbringen des Klebstoffes (Foto 8) und dem Ablösen der Klebestreifen wird der Kern erneut gewogen. In weiterer Folge wird der Schaumkern vertikal in den ersten Geflechschlauch eingeführt (Foto 9). Durch vorsichtiges Schieben des Geflechschlauches in vertikaler Richtung wird der Schlauch in die gewünschte Lage zum Schaumkern gebracht. Der Schlauch wird dadurch zwar wieder länger, jedoch auch enger.

Ein frühzeitiges Festkleben vor Erreichen der richtigen axialen Lage bzw. ein Festkleben des Schlauches unter einem Winkelfehler oder in verdrehter Lage ist zu vermeiden, aber gleichzeitig auch der schwierigste Teilschritt. Ein nachträgliches Lösen ist nur dann möglich, wenn der Anpressdruck nur marginal war. Außerdem sollte zügig gearbeitet werden, da sonst die Klebrigkeit des Sprühklebers stark reduziert wird. Nach dem konturnahen Fixieren (Foto 10) des Flechschlauches werden die überstehenden Enden gekürzt (Foto 11) und mit Flashtape fixiert (Foto 12). Nun wird nochmals das Gewicht ermittelt. Für eine weitere Geflechtlage werden die erwähnten Schritte ab dem Abkleben mit dem schwach klebenden Klebestreifen bis zur Fixierung mittels Flashtape erneut durchgeführt. Nach Abschluss der Drapierschritte wird die Gesamtmasse der Preform bestimmt.

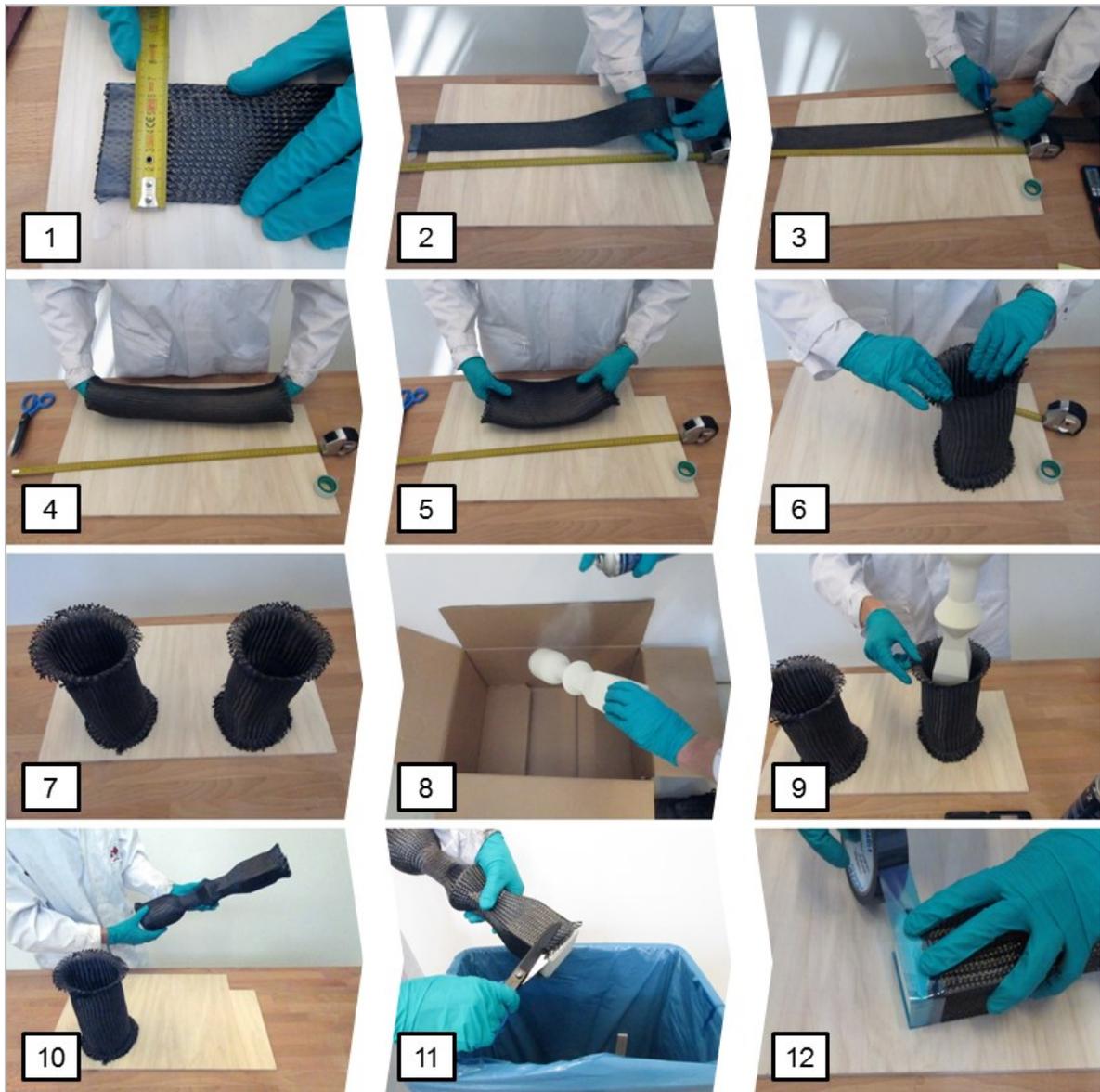


Abbildung 20: Arbeitsabfolge beim manuellen Drapieren mit einem Geflechthalbzeug: Foto 1-3: Zuschneiden der Geflechthalbzeuge, Foto 4-7: Zuschnitt-handlung, Foto 8: Aufbringen des Sprühklebers, Foto 9-10: Drapieren, Foto 11: Randbeschnitt und Foto 12: Fixierung der Textilstruktur.

Die dritte Variante der Drapierung war das erwähnte Direktbeflechten. Das Beflechten selbst wurde durch die Mitarbeiter der Firma Teufelberger GmbH/Wels durchgeführt.

4.3 Vorbereitung und Anbindung der Injektionsanlage

Nach- oder parallelgeschaltet zum Preformingschritt muss die Injektionsanlage vorbereitet werden. Als allerersten Schritt sollte durch Sichtkontrolle an der Maschine die prinzipielle Funktionstüchtigkeit festgestellt werden. Dabei kann auch an den Füllstandsanzeigen der Vorratsbehälter kontrolliert werden, ob ausreichend Material in der Maschine befindlich ist. Sollte dies nicht der Fall sein, so muss entsprechendes Harz- und Härtermaterial nachgefüllt werden. Vor dem Öffnen der Materialtöpfe müssen diese druckfrei sein. Vor dem Öffnen müssen aus Sicherheitsgründen die Manometer an den Drucktöpfen und die Überdruckventile - beide sind in Abbildung 21 erkennbar - kontrolliert werden. Durch Lösen der vier Handschrauben je Topf kann die Verschraubung des Materialtopfdeckels gelöst und der Deckel abgehoben werden. Es sollten nie beide Töpfe gleichzeitig geöffnet werden, da so ein Vermischen der Komponenten ausgeschlossen ist.

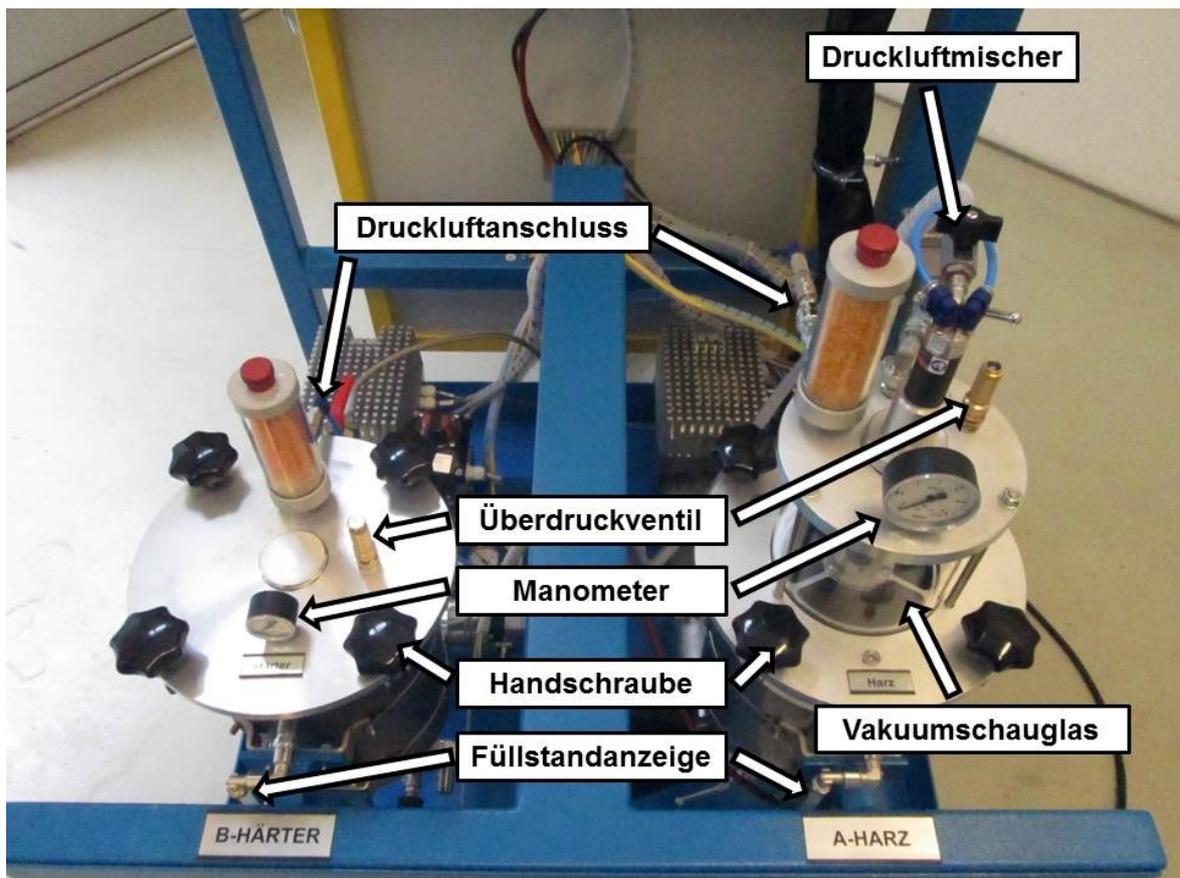


Abbildung 21: Die Materialtöpfe A und B mit ihren wesentlichen Aufbauten.

Wird Harz und Härter nachgefüllt so ist ein blasenfreies Hinzudosieren anzustreben, jedoch kaum erreichbar. Daher muss entsprechende Entgasungszeit (bis mehrere Stunden) vorgesehen werden. Für das Entgasen kann der Harzvorratstopf mit einer externen Vakuumpumpe evakuiert werden. Weiter spielt die Temperatur des Harzes für das Entgasen eine wesentliche Rolle, da dadurch die Viskosität gesenkt werden kann und so Gasblasen schneller austreten können.

Ist ausreichend Material eingefüllt und die Vorratstöpfe verschraubt, so kann die Anlage hochgefahren werden. Mit dem Betätigen des Hauptschalters beginnt die Initialisierung der Maschinensoftware (siehe Abbildung 22). Zu Beginn erscheinen Informationsmeldungen, die nach dem Hochfahren mit der Resettaste quittiert werden können. Die Maschine initialisiert in einem Zustand „Steuerspannung AUS“. Das bedeutet, dass sämtliche Bewegungs- und Heizvorgänge unterbunden sind sowie alle Druckluftsteuerleitungen in der Maschine entlastet werden. In diesem Zustand können an der Maschine typische Vorbereitungsarbeiten durchgeführt werden. Für das Vorheizen der Harzkomponente sowie den Rezirkulationsbetrieb muss die Steuerspannung eingeschalten werden. Dies geschieht durch die Betätigung des Schalters „Steuerspannung EIN“ und abschließender Bestätigung mittels Reset. Es muss täglich vor Produktionsbeginn ein Mischverhältnistest durchgeführt werden. Ist das Harzmaterial entsprechend aufgewärmt, wird zur Vorbereitung die Steuerspannung ausgeschaltet. Weiter wird im Menü des Touchdisplays das Fenster MV (Anm.: steht für Mischverhältnis) geöffnet.

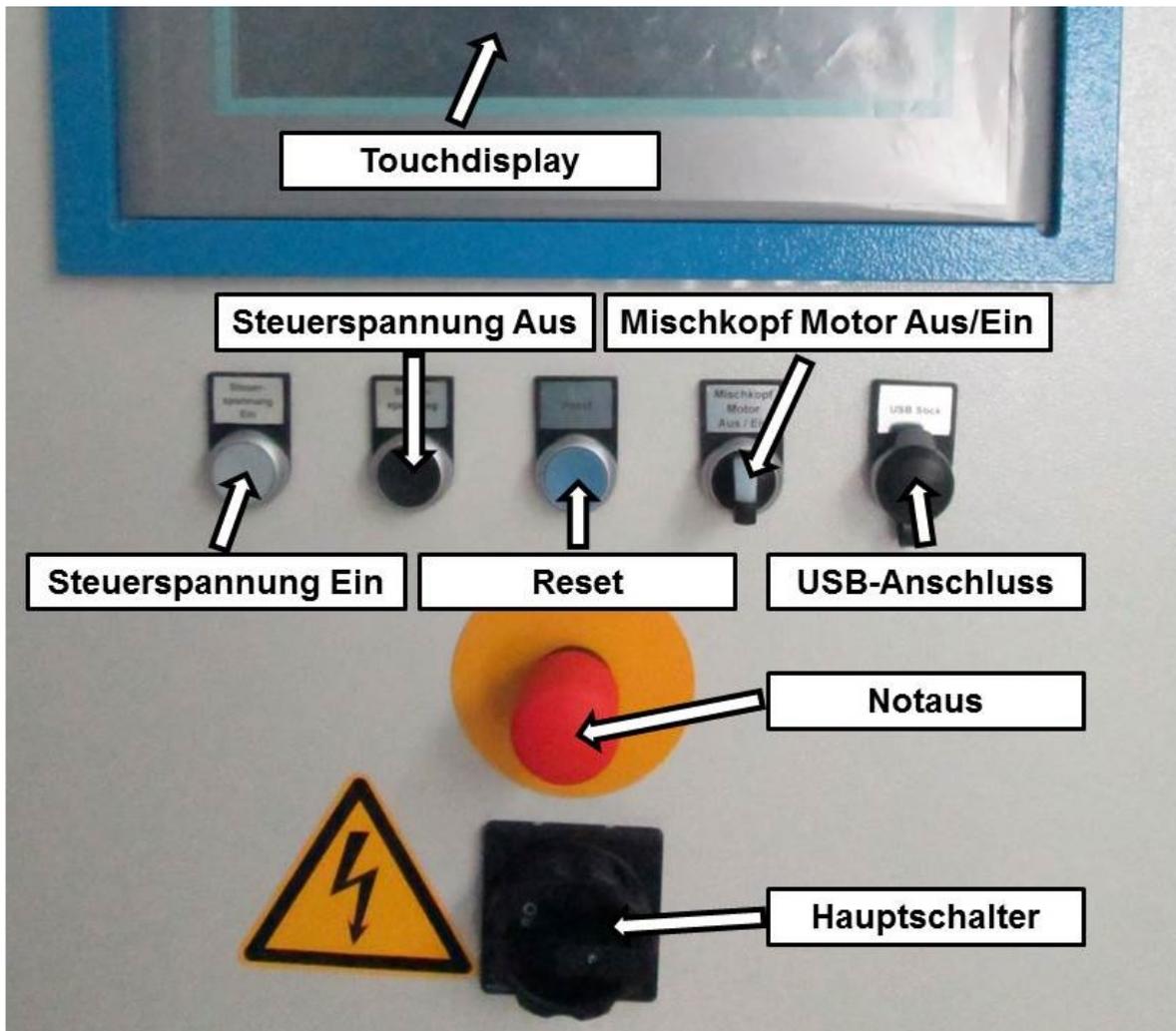


Abbildung 22: Bedienelemente der Harzinjektionsanlage.

Als nächster Schritt wird die Abdeckkappe des Injektionskopfs gelöst, die freigebliebenen Flächen vom Dichtfett gereinigt und der Testvorsatz, wie in Abbildung 23 dargestellt, aufgesetzt und auf den Injektionskopf mit einer Überwurfmutter verschraubt. Dieser Testvorsatz ermöglicht die getrennte Förderung von Harz und Härter. Jedoch muss der Mischkopfmotor deaktiviert werden, da ansonsten die Antriebswelle für den Statik-dynamikmischer zerstört werden kann! Am Touchdisplay werden die gewünschte Fördermenge und das Mischverhältnis gewählt und nach Vergewisserung, dass der Mischkopfmotor ausgeschaltet ist, kann die Steuerspannung wieder aktiviert werden. Zuvor gewogene Becher werden jeweils unter die Öffnungen des Testvorsatzes gehalten. Durch die Betätigung des Injektionsknopfs am Mischkopf wird die Förderung gestartet.

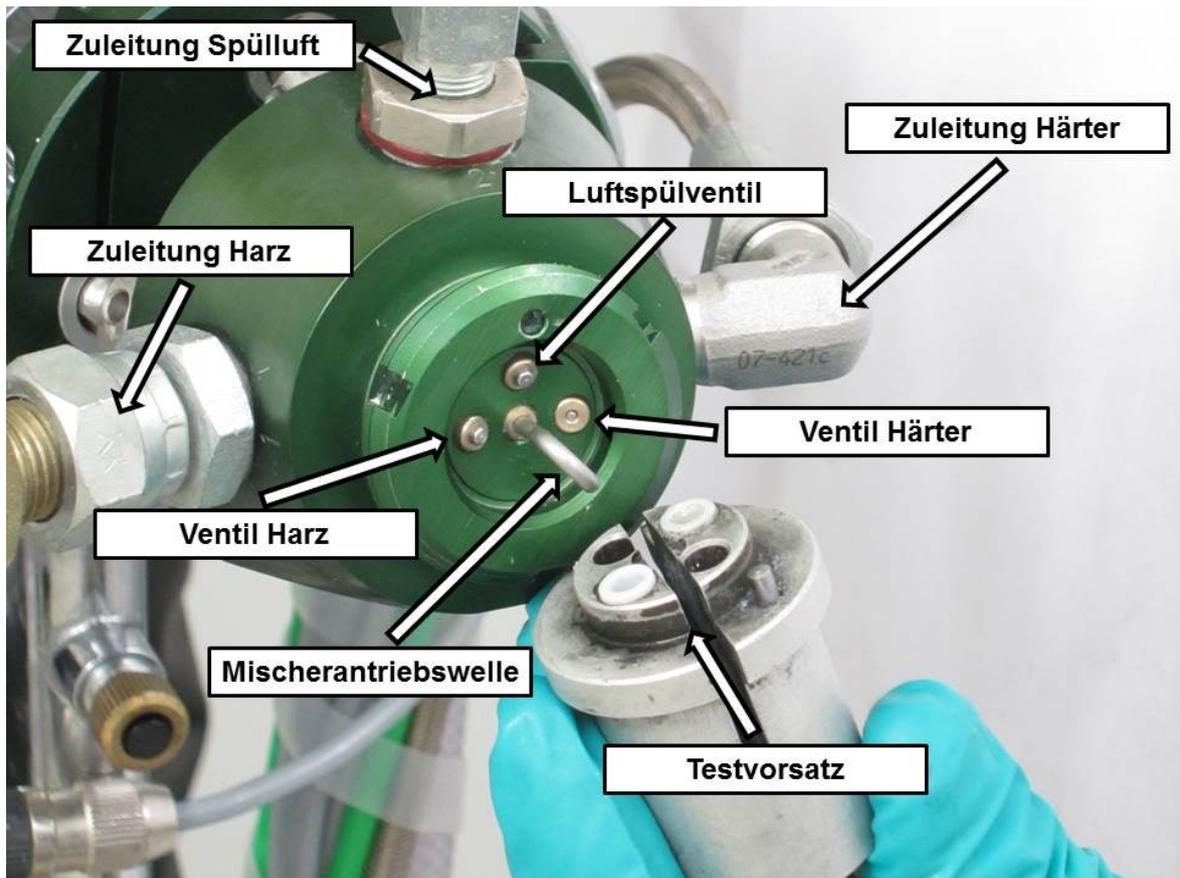


Abbildung 23: Frontansicht des Mischkopfes mit der Mischerantriebswelle, dem Testvorsatz und den Ventilen und Zuleitungen für Harz- und Härterkomponente sowie Spülluft.

Abschließend wird durch Differenzwägen die geförderte Harz- bzw. Härtermenge bestimmt und auf dem Bedienfeld eingegeben. Dieser Test sollte insgesamt viermal durchgeführt werden, wobei der erste Schuss zu verwerfen ist. Die geförderten Materialien sollten, sofern keine Verunreinigungen auftreten, im Sinne der Ressourcenschonung in die Vorratsbehälter wie bspw. Kanister zurückgefüllt werden. Nach erfolgreichem Mischverhältnistest wird der Testvorsatz vom Injektionskopf gelöst und gereinigt. In der Falllinie des Injektionskopfs sollte ein Auffangbehälter stehen, da unvermeidlich einige Tropfen Harz und Härter herabfallen werden.

Um die Vorbereitung des Mischkopfs für die Injektion abzuschließen, müssen noch einige Schritte durchgeführt werden. Zunächst wird der Einweg-Statik-Dynamikmischer an der Mischerantriebswelle eingehängt und die Mischerhülse

übergeschoben. Diese wird mit einer speziellen Überwurfmutter am Mischkopf fixiert. In diese Überwurfmutter kann das Berstschutzrohr eingeschraubt werden. Abschließend wird eine Buchse mit einem Schlauchnippel am Ende auf das freie Ende des Berstschutzrohr festgeschraubt. Abbildung 24 zeigt die Zusammenstellung dieser Baugruppen sehr verständlich.

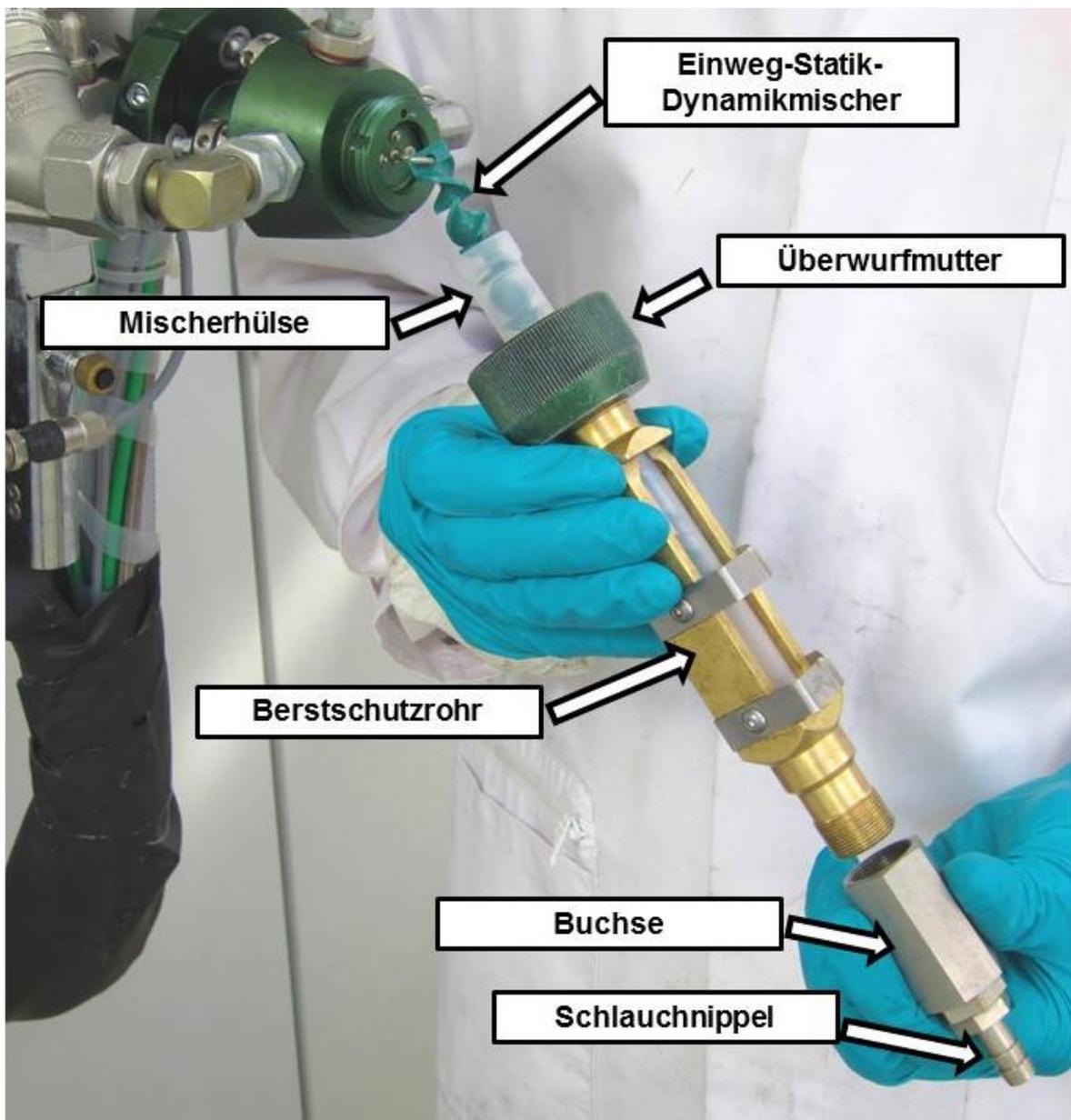


Abbildung 24: Vorbereitung des Mischkopfes.

Bevor konkreter auf die Bedienung der Anlage und die Wahl der Prozessparameter eingegangen wird, soll die Anbindung der Injektionsanlage an das Werkzeug

erläutert werden. Für die Herstellung der Injektionsleitung werden zwei Schlauchstücke mit einer Länge von jeweils 600 mm des PA-Schlauchs mit 8 mm Durchmesser zugeschnitten. Außerdem werden für die Harzzuleitung ein etwa 3 cm langes Stück des PA-Schlauchs sowie ein Schlauchstück mit 1900 mm Länge des PE-Schlauchs mit einem Durchmesser von 10 mm benötigt. Weiter werden vier Schlauchschellen, ein Y-Verteilerstück, etwas Tackytape bereitgelegt. Für die Abgussleitung wird ein weiteres 1900 mm langes Schlauchstück des PA-Schlauches vorbereitet.

In Abbildung 25 ist die Herstellung der Injektionsleitung schematisch dargestellt. Das zentrale Y-Stück wird an den Dichtflächen mit Tackytape umwickelt. Zuviel Tackytape verhindert ein Aufstecken der Schlauchleitungen, zuwenig Tackytape verfehlt seine Wirkung. Die drei PA-Schlauchstücke werden wie angedeutet auf den Y-Verteiler aufgesteckt. Anschließend wird der kurze Schlauch fein mit Tackytape umwickelt. Schließlich werden die Verbindungsstellen mit Schlauchschellen gesichert. Für die Herstellung einer Schneidringverschraubung werden eine passende Überwurfmutter und ein Schneidring auf die Angusschläuche geschoben. Die Angusschlauchleitungen selbst werden mit dem verwendeten Trennmittel eingetrennt und durch die eingeschraubten Doppelnippel bis zur Kavität eingeführt. Das Trennmittel sollte beim Eindringen von Harz in die Langlochbohrung ein Entformen ermöglichen. Zusätzlich wird bei einigen Versuchen PTFE-Spray wegen der zusätzlichen Schmierfähigkeit eingesetzt, um ein Einführen bzw. Ausziehen der Schläuche bei erwärmtem Werkzeug zu erleichtern. Abschließend werden die Schlauchleitungen durch Herstellung der Schneidringverschraubung fixiert. Die Abgussleitung wird ähnlich den Angussleitungen am Werkzeug fixiert. Sie wird nach dem Verlassen des Werkzeugs wie eine Steigleitung nach oben geführt. Der Sinn dahinter liegt in der blasenfreien Strömung des Harzes nach Austritt aus der Form bzw. der Unterstützung des Luftaustritts aus der Kavität, da die Luft nach oben hin ausweichen kann. Der PE-Schlauch wird bereitgelegt und kann erst nach erfolgter Entlüftung an den Y-Verteiler angeschlossen werden um die Anbindung endgültig zu vervollständigen.

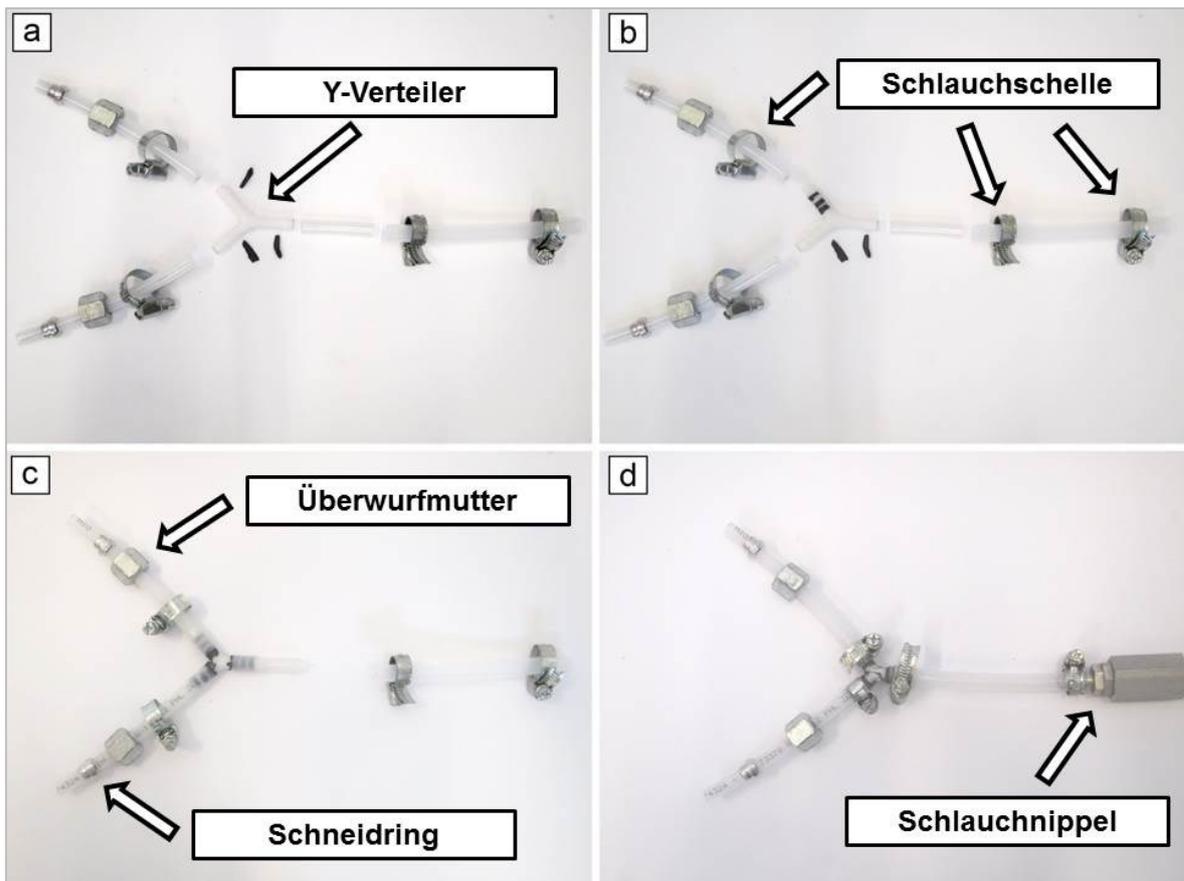


Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Injektionsleitung.

4.4 Wahl der Prozessparameter für Entlüften & Injektion

Nach den vorbereitenden Schritten kann nun mit dem eigentlichen Harzausstrag begonnen werden. Für eine blasenfreie Förderung sind jedoch einige Details im Handling unerlässlich. So muss die Mischkammer zunächst vollständig mit Reaktionsharz gefüllt werden. Lufteinschlüsse werden durch langsame Förderung, stehendem Mischer und nach oben Richten des Injektionskopfes verhindert. Die Ausstoßleistung wird auf dem Hauptbildschirm rechts ausgewählt. Idealerweise wird die minimale Ausstoßleistung gewählt, im konkreten Fall 0,13 kg/min. Der Mischkopfmotor kann durch den Kippschalter an der Bedienseite der Anlage deaktiviert werden. In Verbindung mit der vertikalen Ausrichtung der Mischkammer steigt das Reaktionsgemisch gemächlich nach Betätigung des Handschalters am Mischkopf in der Mischkammer nach oben. Das austretende Material wird in einen bereitgestellten Becher gefördert. Nachdem ersten Austritt kann der Injektionskopf in die

Ausgangslage gebracht werden. Sind keine Blasen im geförderten Material sichtbar, wird der Mischkopfmotor durch Umlegen des Kippschalters aktiviert. Das nun geförderte Material sollte deutlich bessere Homogenität aufweisen, als jenes zuvor. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, wird die Förderung durch Betätigen des Handschalters gestoppt. Ein leichtes nach oben Richten der Mischkopfföffnung verhindert ein Auslaufen des Harz bzw. ein Eintreten von Luft in die Mischkammer. Der bereitgelegte PE-Schlauch wird nun an den Schlauchnippel des Injektionskopfes angeschlossen, mit einer Schlauchschelle fixiert und derart gehalten, dass ein Fließfrontfortschritt in der Vertikalen nach oben erfolgt. U-förmige Schlaufen würden im Abwärtsbereich ein Voreilen der Fließfront und so einen Lufteinschlag bewirken. Durch neuerliches Betätigen des Handschalters wird die Entlüftung gestartet. Ist der Schlauch ausreichend gefüllt, dass ein Hantieren ohne die Bildung solcher U-förmigen Schlaufen möglich ist, so wird die Förderung erneut gestoppt. Das freie Ende des Schlauchs wird an den vorbereiteten Angussverteiler angeschlossen. An diesem Punkt werden nun die eigentlichen Prozessparameter für die Injektion gewählt. Dazu zählen Ausstoßleistung, Regeldruck und eventuell Vakuumunterdruck. Wird Vakuum eingesetzt, so wird der Angusschlauch knapp hinter der Fließfront geknickt und die Form über die Abgussleitung, welche über eine Harzfalle und weiter in eine Vakuumpumpe führt, evakuiert.

Sind die Parameter gewählt und ist sichergestellt, dass die Dokumentation aktiviert ist, kann die Injektion mit dem Handschalter gestartet werden. Nach der entsprechenden Mischervorlaufzeit beginnt der Materialaustrag. Bei geknicktem Angusschlauch muss spätestens dann der Schlauch geöffnet werden. Auf dem Hauptbildschirm können die Ausstoßmenge, das aktuelle Mischverhältnis und die Prozesstemperaturen sowie –drücke mitverfolgt werden. Nach dem Austritt aus der Form wurde je nach Versuch die Injektion beendet. Entscheidungskriterien waren die Blasenfreiheit, die Spülmenge, der Injektionsdruck oder das Mischungsverhältnis, welches ggf. nicht mehr eingehalten werden konnte.

In Tabelle 5 sind die Prozessparameter für die Injektionsversuche zusammengefasst. Angegeben sind die jeweilige Versuchsbezeichnung, die verwendete Faserstruktur, sowie die Prozessparameter Massestrom \dot{m} , Regeldruck p_R , Unter-

druck p_V und die Harz- und Werkzeugtemperaturen T_H bzw. T_W . Die Versuchsserien sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in der ersten Spalte von links hervorgehoben.

Die Bezeichnungen für die Versuche entsprechen folgender Systematik. Versuche mit Flechtschlauchdrapierung besitzen eine Bezeichnung nach dem Schema „FS \dot{m} p_R T_H p_V “. Die Zuordnung der Zahlenwerte ist somit durch die Position in der Versuchsbezeichnung sowie durch die Größenordnung eindeutig.

Für direktbeflochtene Bauteile vereinfacht sich die Systematik aufgrund der geringeren Variationbreite der Versuchsserie zu „DB \dot{m} T_H “.

Vorversuchsbezeichnungen bestehen aus dem verwendeten Faserhalbzeug und einer laufenden Nummer zur eindeutigen Identifikation.

Tabelle 5: Parameter für die Injektionsversuche.

Bezeichnung	Faserstruktur	\dot{m} [kg/min]	p_R [bar]	p_V [mbar]	T_H [°C]	T_W [°C]
$\equiv \pm 1$	$\equiv \pm$	0,13	/	950	50	50
$\equiv \pm 2$	$\equiv \pm$	0,13	/	/	50	50
$\equiv \pm 3$	$\equiv \pm$	0,13	/	500	50	50
$\equiv 0/90 1$	$\equiv 0/90$	0,13	/	500	50	50
$\equiv 0/90 2$	$\equiv 0/90$	0,13	/	500	50	50
$\equiv 0/90 3$	$\equiv 0/90$	0,13	/	500	50	50
F1	1x Flechtschlauch	0,13	/	/	50	50
F2	1x Flechtschlauch	0,13	/	500	50	50
F3	2x Flechtschlauch	0,13	/	/	50	50
<hr/>						
FS .13 / 50 /	2x Flechtschlauch	0,13	/	/	50	50
FS .36 / 50 /	2x Flechtschlauch	0,36	/	/	50	50
FS .48 / 50 /	2x Flechtschlauch	0,48	/	/	50	50
FS .60 / 50 /	2x Flechtschlauch	0,60	/	/	50	50
<hr/>						
FS .60 2 50 /	2x Flechtschlauch	0,60	2	/	50	50
FS .60 2.5 50 /	2x Flechtschlauch	0,60	2,5	/	50	50
FS .60 2.75 50 /	2x Flechtschlauch	0,60	2,75	/	50	50
FS .60 3 50 /	2x Flechtschlauch	0,60	3	/	50	50

Massestrom \dot{V} , Regeldruck p_R , Unterdruck p_V , Harztemperatur T_H , Werkzeugtemperatur T_W

Fortsetzung von Tabelle 5: Parameter für die Injektionsversuche.

Bezeichnung	Faserstruktur	\dot{m} [kg/min]	p_R [bar]	p_V [mbar]	T_H [°C]	T_W [°C]
Vakuum	FS .60 2.75 50 950	0,60	2,75	950	50	50
	FS .60 2.5 50 950	0,60	2,5	950	50	50
	FS .60 2.5 25 950	0,60	2,5	950	25	50
Direkt- beflochten	DB .48 50	0,48	2,5	925	50	50
	DB .48 37.5	0,48	2,5	925	37,5	50
	DB .60 37.5	0,60	2,5	925	37,5	50
	DB .60 50	0,60	2,5	925	50	50

Massestrom \dot{m} , Regeldruck p_R , Unterdruck p_V , Harztemperatur T_H , Werkzeugtemperatur T_W

4.5 Härtung

Die Härtung wurde bei allen Versuchen bei einer Werkzeugtemperatur von 50 °C durchgeführt. Variiert wurde die Härtungsdauer, die nach anfänglichen Härtungszeiten von über 18 h (über Nacht) sukzessive auf 5 h reduziert wurde. Dies steht in guter Übereinstimmung mit dem Datenblatt des verwendeten Epoxidharzsystems [43]. Grund für das Herabsetzen war die Verkürzung der Versuchsdauer. Jedoch kann bei verschlossenem Werkzeug und ohne entsprechende Sensoren nur bedingt auf den Härtungsverlauf zurückgeschlossen werden. Hinweise können Begleitversuche mit dem Harzmaterial geben, jedoch wurde von dieser Möglichkeit aus Zeit- und Kapazitätsgründen Abstand genommen. So wurde nach dem Öffnen die Formstabilität des Matrixmaterials qualitativ beurteilt und die Härtungszeit für den darauffolgenden Versuch daraus abgeleitet.

4.6 Bewertungsschema

Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche beurteilen zu können, wurde ein Bewertungsschema erarbeitet. Der Fokus dieses Schemas liegt klar auf der Bewertung von Füllproblemen, da diese ein großes Hindernis zu Beginn der Versuchsreihe darstellten. Es wird aber auch die Entformbarkeit der Bauteile sowie Risse, Ausbrüche und Fiber-wash out berücksichtigt.

Das Bauteil wird zunächst in die 5 Bereiche „Angussverteiler“, „Bereich des Abgusses“, „Oberseite“, „Unterseite“ und „Trennebene“ unterteilt, wie in Abbildung 26 dargestellt. Jedem dieser Bereiche wird eine maximal Punktzahl je nach gewünschter Gewichtung zugeteilt. Die Verteilung erfolgt zunächst idealerweise annähernd gleichverteilt. Nach einigen Referenzbeurteilungen kann überprüft werden, ob die erstellte Quantifizierungsmethode auch den qualitativen Eindruck widerspiegelt. Ggf. muss das Bewertungsschema angepasst werden. In weiterer Folge werden gesondert Punkte für Qualitätsmerkmale wie Risse und Ausbrüche, Fiber-wash out, Entformbarkeit und Faserverzug vergeben. Außerdem wird das Gewicht des Bauteils als besonders kritisch vor dem Hintergrund des Leichtbaus betrachtet. In Tabelle 5 ist die Punktevergabe zusammengefasst.

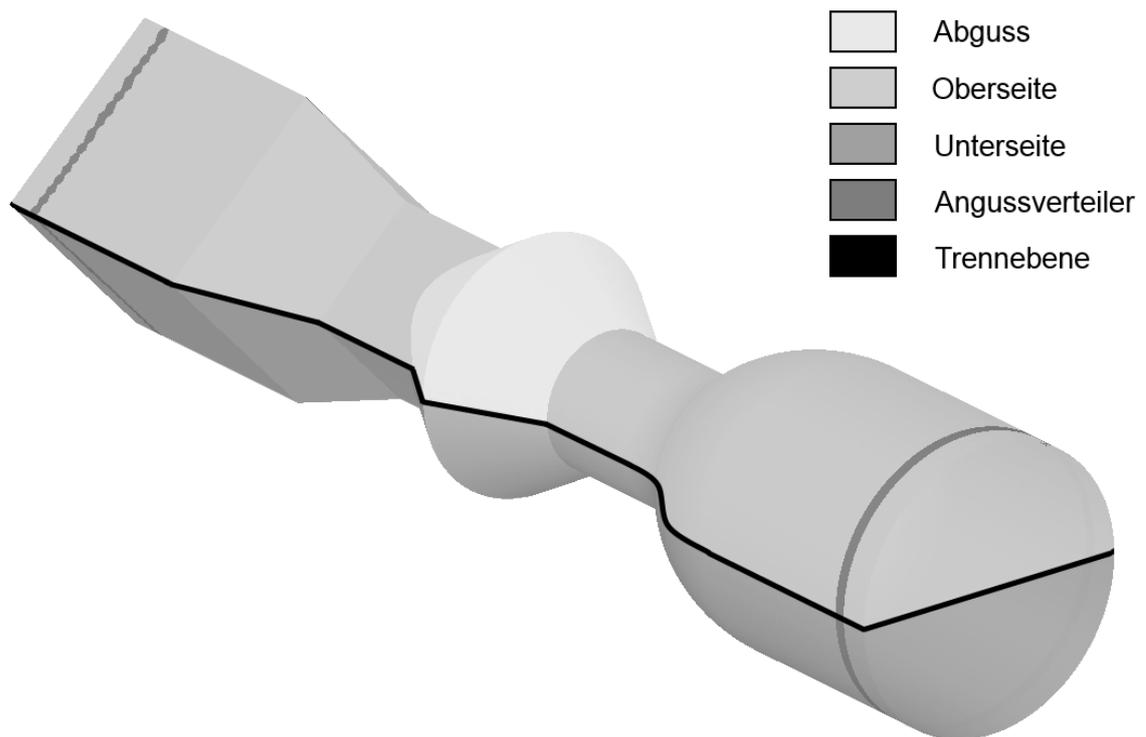


Abbildung 26: Darstellung der einzelnen Bereiche nach dem Bewertungsschema.

Tabelle 5: Bewertungsschema für die hergestellten Bauteile.

Qualitätsmerkmal	mögliche Punkte
Oberfläche, gesamt	68
└ <i>Angussverteiler</i>	8
└ <i>Bereich des Abgusses</i>	15
└ <i>Oberseite</i>	15
└ <i>Unterseite</i>	15
└ <i>Bereich Trennebene</i>	15
Risse, Ausbrüche	8
Fiber wash-out	8
Entformung	8
Faserverzug	8
Gewicht	50
Gesamt	150

Die Balancierung der Punktevergabe ist zugegebenermaßen der Willkür des Er-
stellers dieses Schemas unterworfen, jedoch unerlässlich, denn mit der Verdich-
tung der Qualitätsmerkmale zu einem einzigen Zahlenwert kommt es zu einem
enormen Informationsverlust. Daher soll diese Beurteilung nur als grober Richt-
wert interpretiert werden. Idealerweise werden die Erstellung und die Bewertung
von verschiedenen Personen durchgeführt.

Die Punkteverteilung soll nun im Detail erläutert werden. Für den Teilbereich „Angussverteiler“ werden maximal 8 Punkte vergeben. Die im Verhältnis zu den anderen Teilbereichen geringe Punktezahl kommt deshalb zustande, da dieser Bereich nicht zum endgültigen Bauteil gezählt wird und in einem Nachbearbeitungsschritt abgetrennt wird. Trotzdem ist dieser Bereich für die Beurteilung der Injektion interessant, da sich hier die höchsten Stellen der Kavität befinden und die gebildeten Luftblasen Aufschluss über die Entlüftung während des Prozesses geben. Keine Luftblasen im Angussverteiler werden mit der vollen Punktezahl bewertet. Große Luftblasen erhalten keine Punkte. Es sollen hier aber tatsächlich nur die Verteilerringe behandelt werden, denn bspw. großflächige Blasen werden in der Kategorie „Oberseite“ abgehandelt. In Abbildung 27 sind beispielhafte Bewertungen angeführt.

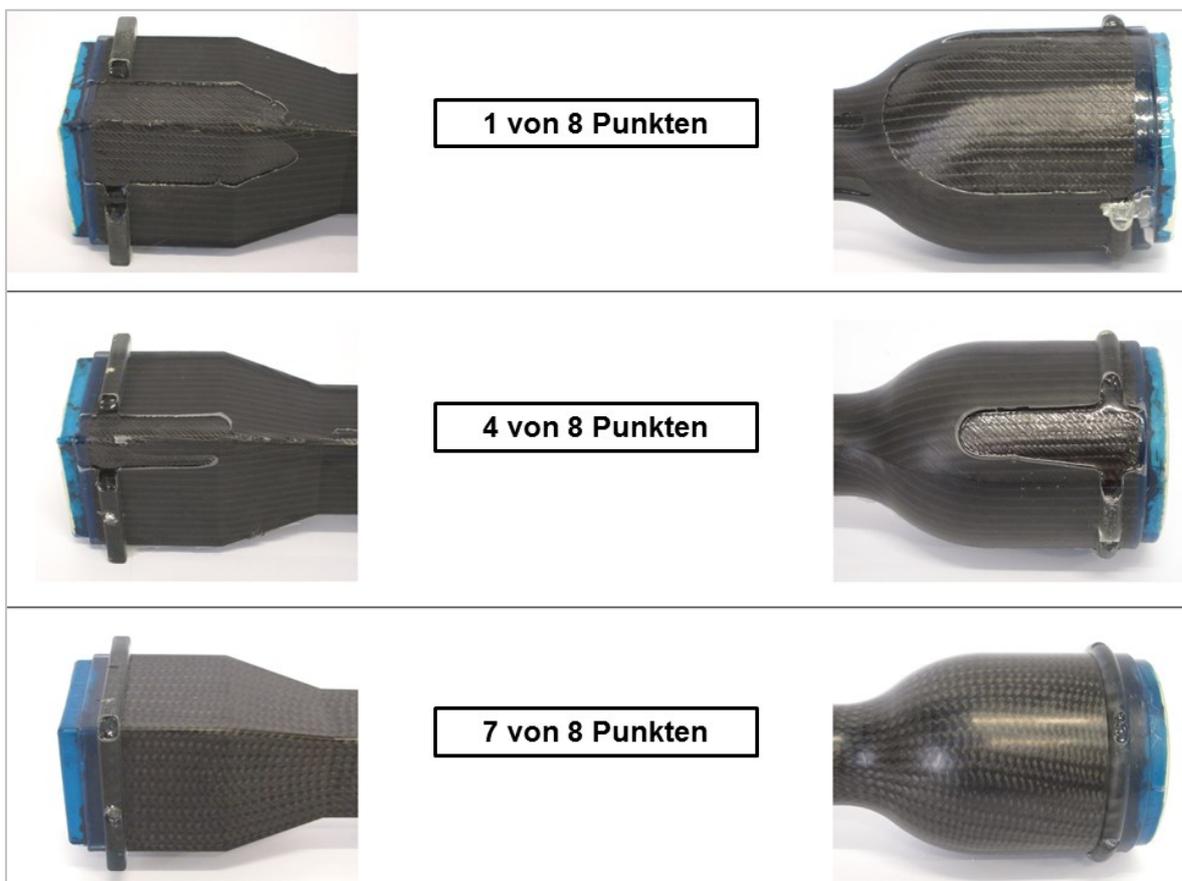


Abbildung 27: Beispielbewertungen des Bereichs „Angussverteiler“.

Ein kritischer Bereich ist der des Abgusses. Hier am Fließwegende findet der Prozess der Entlüftung statt. Ist aufgrund falschgewählter Prozessparameter oder ähnlichem die Funktion des Entlüftungspunktes gestört, bilden sich feinste bis großflächige Luftblasen aus. Diese verschiedenen Erscheinungsformen machen es auch schwierig den Bereich zu bewerten. Keine Fehlstellen bringen die volle Punkteanzahl von 15 Punkten. Einige Kleinstbläschen oder wenige, kleine Luftbläschen werden mit der Hälfte der Punktezahl bewertet. Großflächige Luftblasen führen zu 0 Punkten. Um dieser vagen Beschreibung etwas Bedeutung zu geben sind in Abbildung 28 Bewertungen dargestellt.

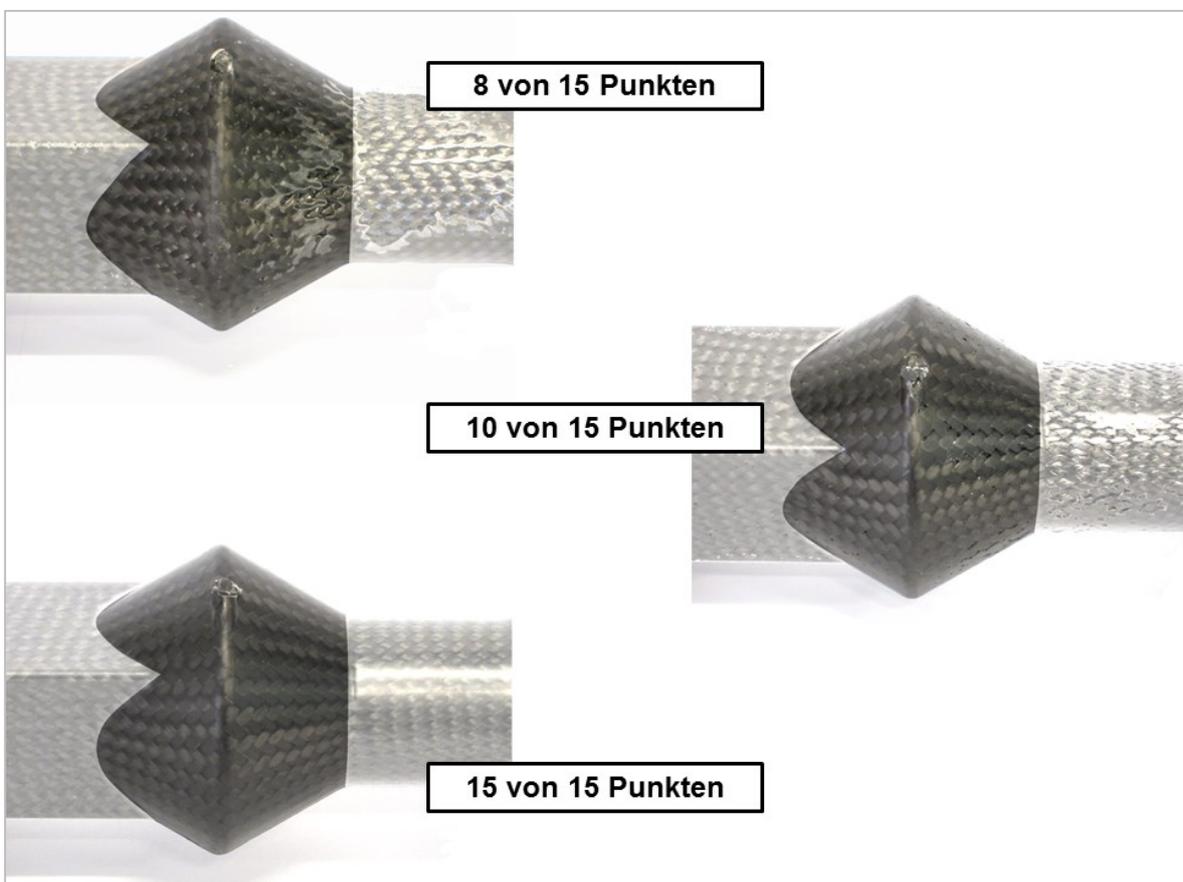


Abbildung 28: Beispielbewertungen des Bereichs „Abguss“. Die Bereiche des Bauteils, welche nicht relevant für diese Teilbewertung sind, wurden ausgegraut.

Die Bereiche „Oberseite“ und „Unterseite“ sind die Teilbereiche, die den Großteil der Bauteiloberfläche ausmachen. Blasenfreiheit bringt jeweils 15 Punkte. Sind die Blasen großflächig ausgebildet so werden keine Punkte vergeben. Die Bewertung von Blasen zwischen diesen Extremen ist nicht trivial und kann durch die verschiedenen Auftrittsformen oft nur schwer zufriedenstellend durchgeführt werden. In Abbildung 29 und in Abbildung 30 wird dieser Sachverhalt offensichtlich.

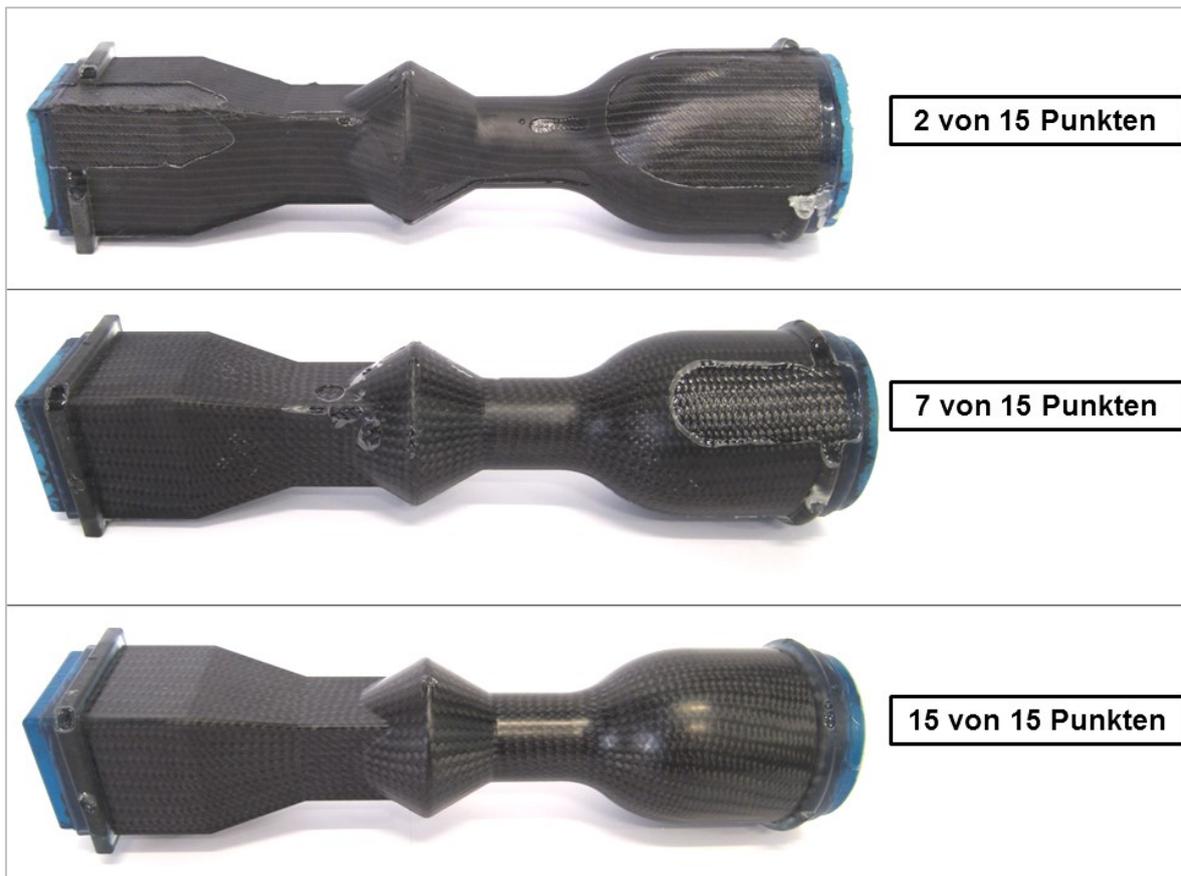


Abbildung 29: Beispielbewertung des Bereichs „Oberseite“.

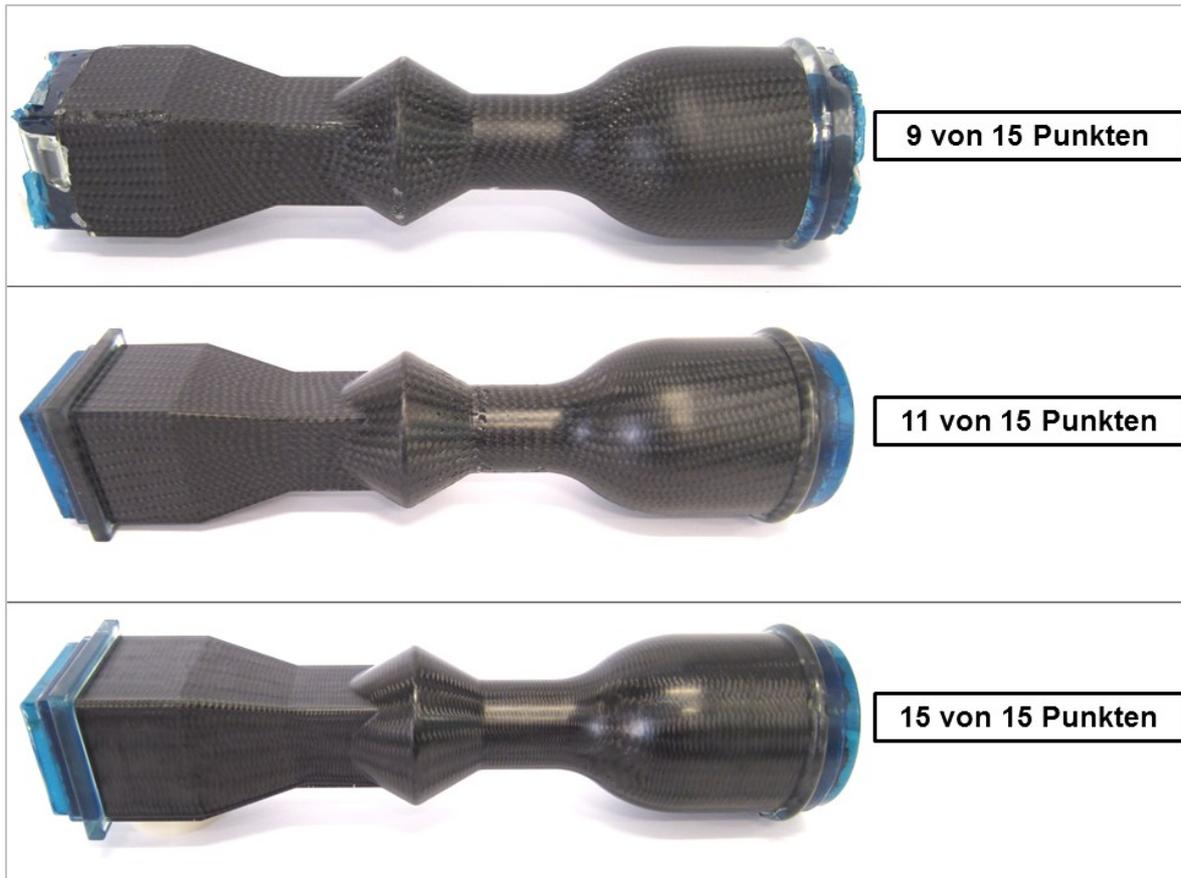


Abbildung 30: Beispielbewertung des Bereichs „Unterseite“.

Im Bereich Trennebene werden gesondert Phänomene betrachtet, die so nur dort auftreten können. Dazu zählen die Bildung von Schwimmhäuten oder das Einklemmen von Faserenden. Abbildung 31 zeigt einige beispielhafte Bewertungen. Es sei angemerkt, dass Schwimmhäute bei der Bewertung vernachlässigt wurden, da diese durch höhere Schließkräfte vermutlich zu reduzieren wären, aber aufgrund der Gefahr der stärkeren Werkzeugschädigung bei unbeabsichtigtem Einklemmen der Fasern darauf verzichtet wurde.

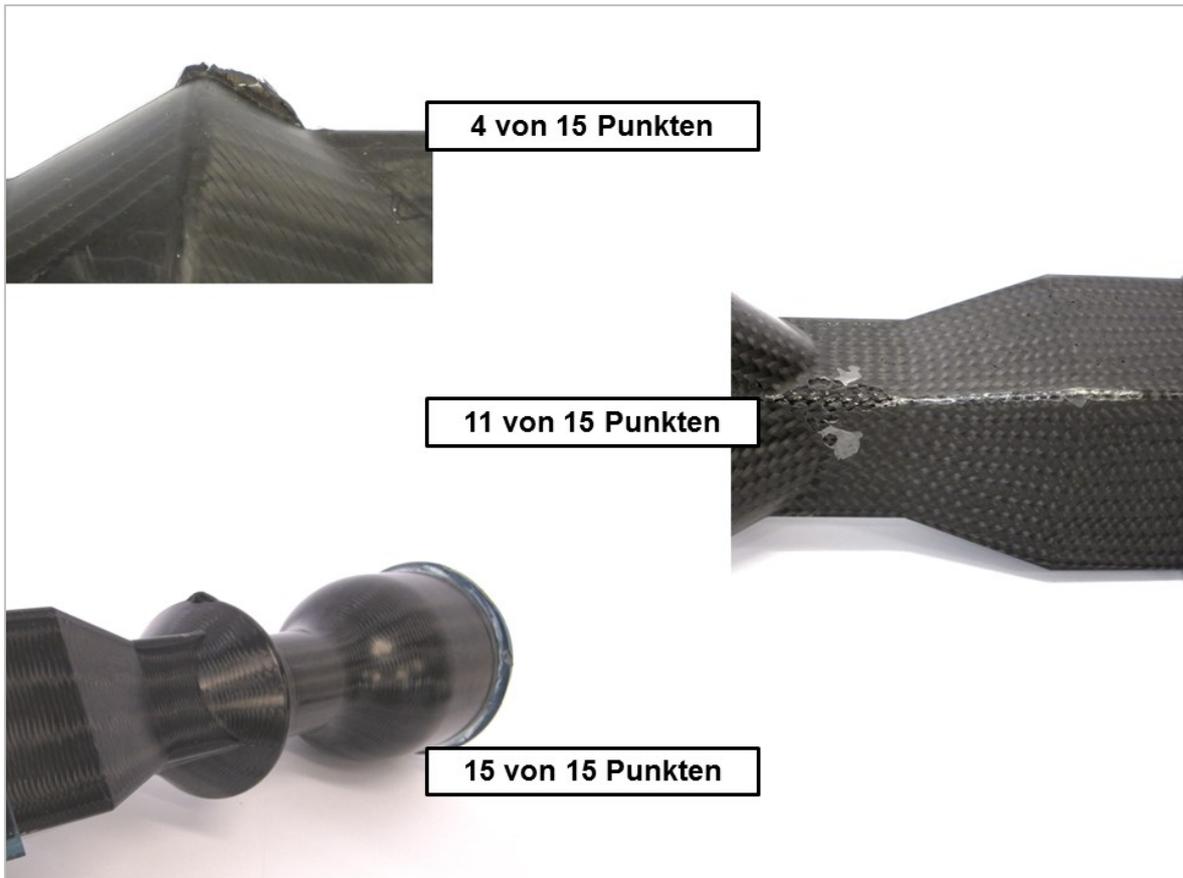


Abbildung 31: Beispielbewertung des Bereichs „Trennebene“.

Risse und Ausbrüche treten meist in Verbindung mit Entformungsschwierigkeiten auf. Die Bewertung „Risse und Ausbrüche“ richtet sich daher an die Schwere der Schäden, während sich die Bewertung „Entformung“ auf die Schwierigkeit der Entformung und die Maßnahmen zur Reduktion der Reiß- und Ausbrechgefahr fokussiert. Da die beiden Bewertungen eng verbunden sind und somit ein und derselbe Defekt oftmals zweifach bewertet wird, ist die erreichbare Punktezahl reduziert. Ähnlich verhält es sich bei „Faserverzug“ und „Fiber-wash out“. Ein Verschieben der Faserlagen im Bereich des Abgusses führt leicht zu einem Auswaschen der Fasern in die Abgussleitung. Außerdem können Fasern den Abguss verstopfen, was wiederum zur Bildung großflächiger Blasen führen kann. Deshalb werden auch hier reduzierte Maximalpunkte vergeben. In Abbildung 32 ist die Teilbewertung für „Risse und Ausbrüche“ zu sehen.

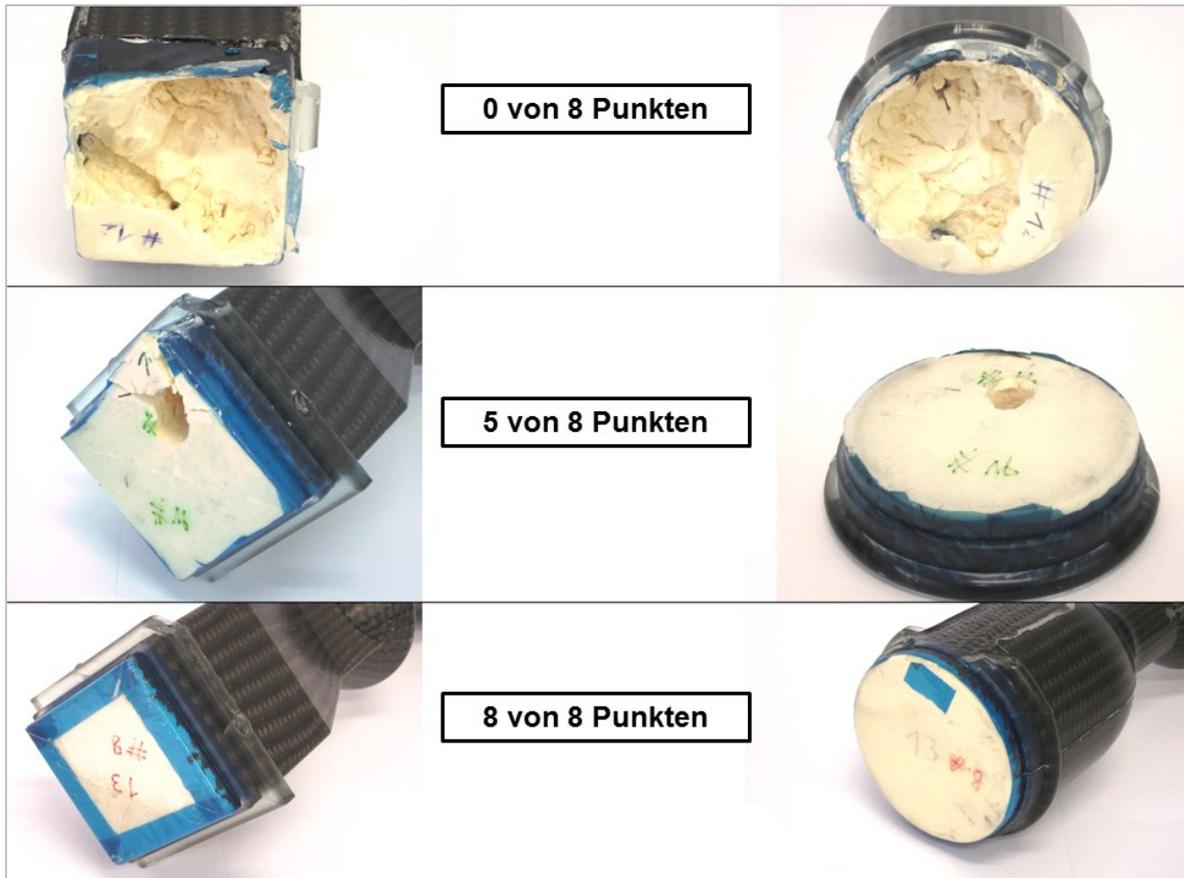


Abbildung 32: Beispielbewertung des Teilbewertung „Risse und Ausbrüche“.

In Abbildung 33 sind zwei Beispiele für Fiber-wash out dargestellt. Die Bewertungen beziehen sich nicht ausschließlich auf die dargestellte Ausprägung der Verstopfung der Abgussleitung durch Fasern, sondern ebenfalls auf die Frage, ob Fasern bis weit in die Abgussleitung getragen werden. Bei dem Versuch dargestellt in der oberen Abbildungshälfte war dies der Fall, während bei Zweitem lediglich eine Schlaufe des Geflechschlauchs ein leichtes Abheben vom Kern in diesem Bereich zeigt.

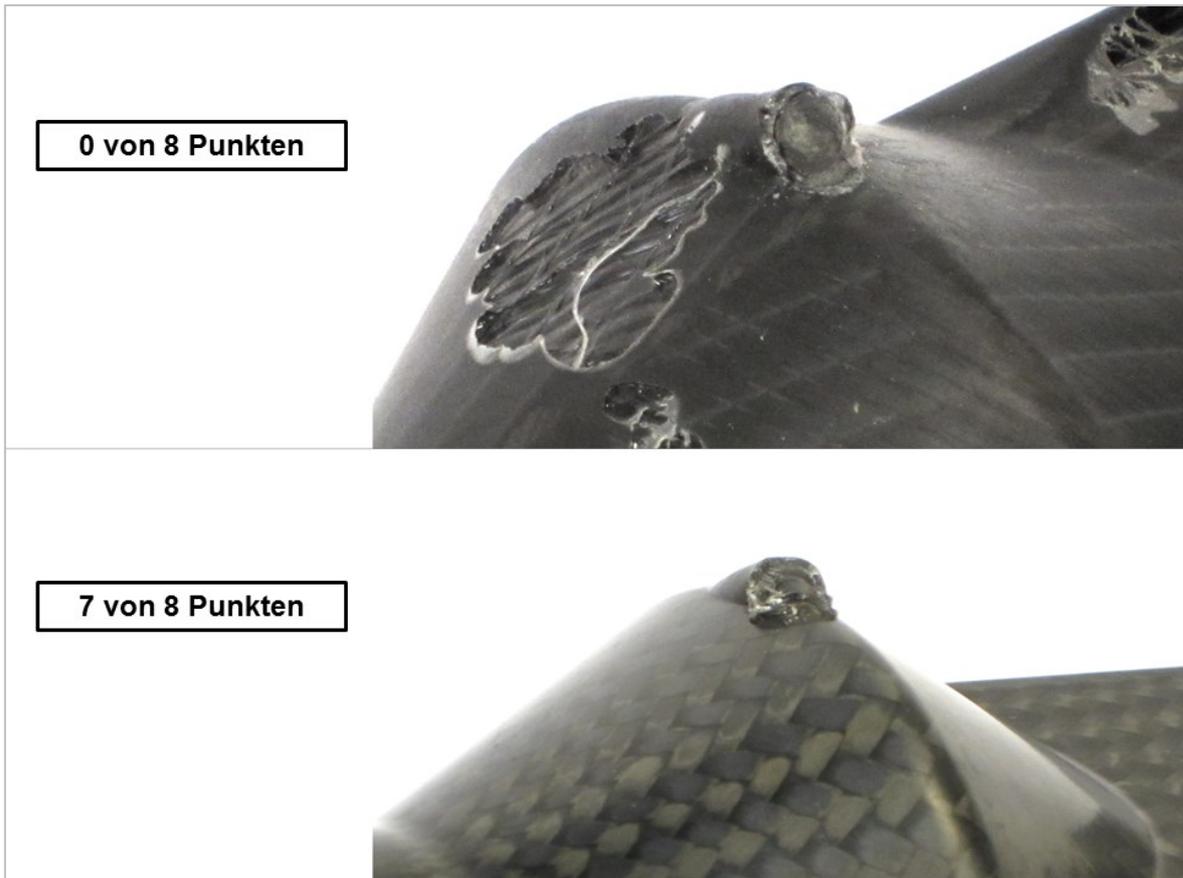


Abbildung 33: Beispielbewertung des Teilbewertung „Fiber-wash out“.

Die Bewertung der Entformung ist in Abbildung 34 dargestellt. Zum Einen wurde die Schwierigkeit der Entformung bewertet, die sich durch die dargestellten Ausbrüche erahnen lässt. Zum Anderen wurden die eingesetzten Mittel bewertet. Die höchste Bewertung erhielten dabei jene Bauteile, die durch Druckluft aus der Kavität herauszulösen waren. Bauteile, die nur durch eine spezielle Vorrichtung, die aus zwei u-förmig gebogenen Stahlstücken bestand, welche seitlich in den Kern eingeschlagen wurden (vgl. mittleren Schaumkern in Abbildung 34), entformt werden konnte, wurden entsprechend geringer bewertet. Ein Bauteil mit inakzeptabler Entformung ist Abbildung 34 oben dargestellt.

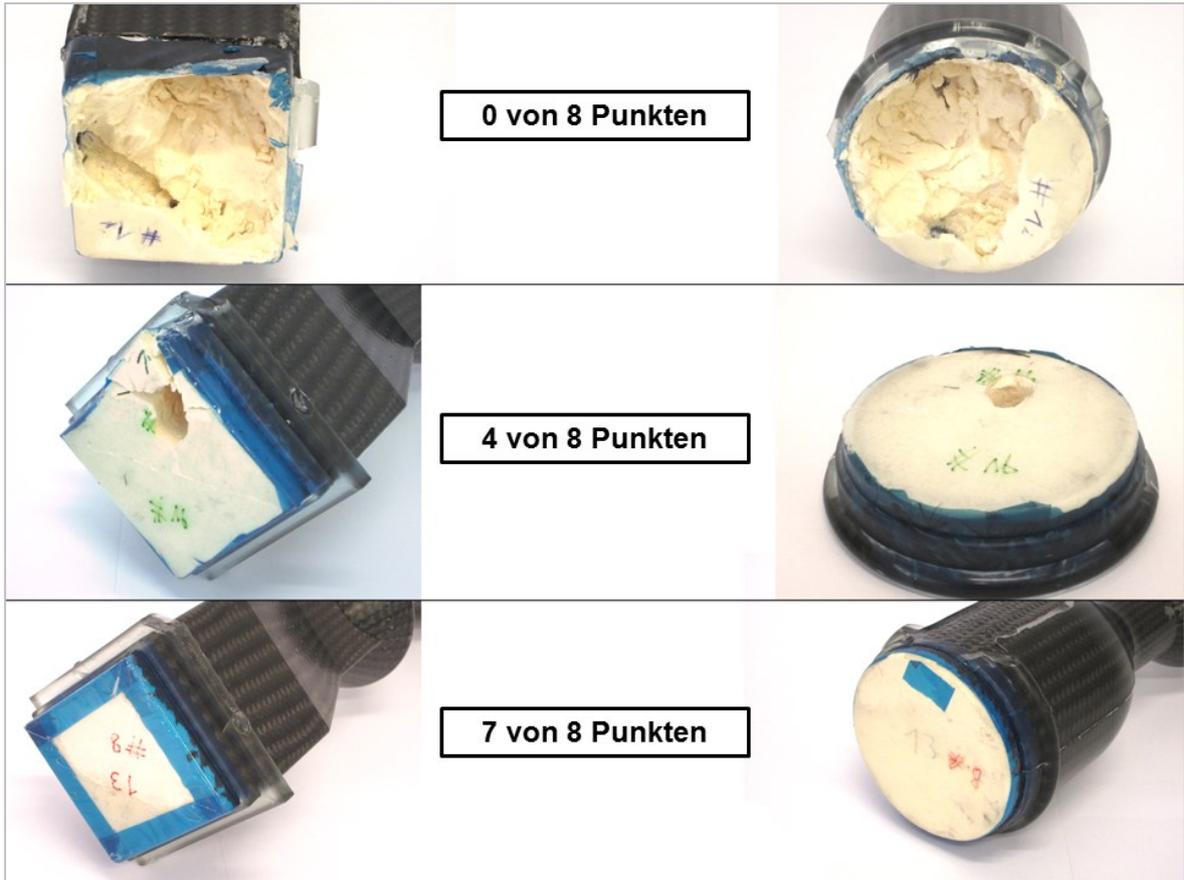


Abbildung 34: Beispielbewertung der Teilbewertung „Entformung“.



Abbildung 35: Beispielbewertung des Teilbewertung „Faserverzug“.

Für die Bewertung des Bauteilgewichts wird der Anteil des Matrixmaterials, welches am Bauteil verblieben ist, herangezogen. Die Variation des Gewichts kommt zum Einen von (großflächigen) Luftblasen, die während der Injektion durch Matrixmaterial eingeschlossen werden und zum Anderen und v.a. überwiegenden Teil aus der Penetration des Reaktionsharzes in den Schaumkern. Beachtliche Mengen des Reaktionsharzes können so in das Bauteilinnere gefördert werden. Für einen Matrixgewichtsanteil von 300 g oder weniger wird volle Punkteanzahl von 50 Punkten vergeben. Für Matrixgewichtsanteile über 500 g wird kein Punkt vergeben. Dazwischen folgt die Punktevergabe einer linearen Funktion. So ergibt sich bspw. für 400 g Matrix eine Teilbewertung von 25 Punkten.

Das Gesamtergebnis für die Bauteilbewertung wird als Mittelwert von insgesamt 3 Einzelbewertungen herangezogen. Die Mittelwertbildung dient zum Ausgleich von eventuellen Ausreißern in der Bewertung.

5 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeit dargelegt und diskutiert. Die Teilergebnisse werden in Pakete zusammengefasst um die Aussagen zu treffen.

5.1 Drapierstudie

Die Drapierstudie gliedert sich in mehrere Bereiche. Zunächst werden die verschiedenen, vorgestellten Flächentextilien betrachtet, die Vor- und Nachteile der einzelnen Textilarchitekturen zu einander herausgearbeitet und schließlich mit der Flechttechnik verglichen. Die Geflechte werden hinsichtlich verschiedener Preformingvorgänge unterschieden. Schließlich wird noch ein Vergleich zur Wickeltechnik vorgenommen.

5.1.1 Flächige Textilien

In Kapitel 3.4.1 auf Seite 47 wurden die verwendeten Textilien bereits vorgestellt. Bei dem Textil # ↑ handelt es sich um ein 2-2 Köpergewebe mit 12k Rovings in Kett- und Schussrichtung sowie einem Flächengewicht von 600 g/m². Im direkten Vergleich dazu steht das Textil # ↓, welches ebenfalls ein 2-2 Köpergewebe, jedoch mit 3k Rovings in Kett- und Schussrichtung somit einem Flächengewicht von 204 g/m² ist.

Das Köpergewebe # ↑ besitzt im Vergleich zu # ↓ eine deutlich erhöhte Integrität, was das Handling enorm vereinfacht. Bei den Schneidvorgängen wird das Material wenig zerrüttet und lässt sich zu widerstandsfähigen Zuschnitten verarbeiten. Dies dürfte auf die erhöhte Ondulation der Faserbündel aufgrund des größeren Durchmessers der Faserbündel zurückzuführen sein. So ergibt sich eine gewisse „Formschlüssigkeit“ der Faserbündel. Diese Widerstandsfähigkeit bringt aber Nachteile in der Konturabformung. Die Sperrigkeit des Gewebes # ↑ ist im Vergleich zu # ↓ auffällig. Außerdem kommt es zum Abstehen der Faserenden bei Drapierung um Kanten, da die Faserbündel erhöhte Eigensteifigkeit besitzen. Dies ist entlang der oberen und unteren Bauteilkontur in Abbildung 36 zu erkennen. Das bringt neben weiteren Nachteilen eine Quelle für Werkzeugschäden mit sich.



Abbildung 36: Abstehen der Faserenden bei Drapierung von # \uparrow um Kanten.

Das Köpergewebe # \downarrow zeigt deutliche Vorteile bei der Drapierbarkeit, da wie bereits angedeutet dieses Gewebe weniger sperrig ist. Jedoch gilt im Umkehrschluss, dass das Handling erschwert ist, da bereits beim Schneiden der Zuschnitte eine Zerrüttung der Textilstruktur eintreten kann. Genauso leicht lösen sich einzelne Faserbündel am Rand der Struktur beim Drapieren selbst aus dem Gefüge. Aufgrund des geringeren Flächengewichts wurde eine doppelte Belegung vorgenommen um ein annähernd gleiches Flächengewicht für die nachfolgenden Injektionsversuche zu erzielen. Das Aufstellen der Faserenden ist bei diesem Material weniger problematisch, jedoch ist die vollflächige Belegung des Doppelkegels eine Schwierigkeit, da hier mehrere Zuschnittkanten als bei # \uparrow zusammentreffen, wie in Abbildung 37 ersichtlich. Ebenfalls sichtbar in dieser Abbildung ist der Faserverlust eines Zuschnitts im oberen, linken Bildviertel sowie die stark variierende lokale Scherung des Gewebes und der somit von 90° abweichende Faserwinkel.



Abbildung 37: Bereich des Doppelkegels, drapiert mit # ↓.

Die Drapierbarkeit der vorgestellten Gelege $\equiv 0/90$ und $\equiv \pm$ ist wegen der Fixierfäden generell schlechter. Weiter besitzt $\equiv 0/90$ eine Faserorientierung von $0^\circ / 90^\circ$, was ein zusätzliches Sperren der 90° Fäden bei enger werdendem Durchmesser bewirkt. Außerdem sind die 0° Fäden stärker ausgeführt, was zu einem höheren Flächengewicht im Vergleich zur $\pm 45^\circ$ Variante führt.

Das Gelege $\equiv \pm$ erreicht durch die Ausrichtung der Fasern in $\pm 45^\circ$ ein besseres „Anschmiegeverhalten“ bei enger werdendem Durchmesser als $\equiv 0/90$. Dies dürfte in der Möglichkeit zum dezenten Abweichen vom Faserwinkel $\pm 45^\circ$ liegen, wodurch die Fasern beschränkt einer Wickelkurve folgen können. In Tabelle 6 ist eine Vergleichsmatrix der Drapiereigenschaften dargestellt. Diese gibt die qualitativen Eindrücke dieser Vergleichstudie übersichtlich wieder.

Tabelle 6: Vergleich der flächigen Textilien.

	Integrität	Handling	Flexibilität	Scherfestigkeit
# ↑	+	++	+	+
# ↓	--	--	++	--
≡ 0/90	++	++	-	++
≡ ±	++	++	-	+

Abschließend bleibt zu bemerken, dass flächige Textilstrukturen bei derartig komplex gekrümmten Bauteilen gravierende Nachteile besitzen. Die Drapierbarkeit ist nur bedingt gegeben. Es müssen komplexe Zuschnitte gefertigt oder diese derartig vereinfacht werden, dass ein rationelles Drapieren nicht möglich ist. Außerdem geht von den abstehenden Faserenden ein enormes Gefährdungspotential für das Werkzeug aus. Des Weiteren ergibt sich aus dem „Aufschwimmen“ der abstehenden Faserenden für die Injektion ein erheblicher Nachteil, sodass die Versuchsserie mit diesen Drapierungen sogar abgebrochen wurde. Auf dieses Phänomen wird im Kapitel 5.3 im Detail eingegangen werden.

5.1.2 Geflechte

Im vorangegangenen Kapitel 4.2 wurde die Arbeitsabfolge zum manuellen Drapieren der Geflechthalbzeuge erläutert. Wie dort bereits ersichtlich, umfasst der manuelle Drapiervorgang eine große Anzahl an Einzelschritten, die zum Einen äußerst arbeitsintensiv sind und zum Anderen eine teils hohe Anforderung an das handwerkliche Geschick des Durchführenden stellen. Abgesehen von diesen Mankos bietet diese Drapiermethode bei gegebener Geometrie eine sehr reproduzierbare Preformherstellung, die die Mängel der flächigen Textilien zu vermeiden vermag. Allen schlauchförmigen Geflechten ist gemein, dass sie rotationsymmetrische oder prismatische Körper konturnahe belegen können. So kann dieses Bauteil ohne Überlappung von mehreren Lagen vollflächig belegt werden [1, 4, 23]. Für die Realisierung größerer Faservolumengehalte wurde je ein zweiter Geflechtschlauch vorgesehen.

Ist der manuelle Arbeitsanteil zu reduzieren und der Prozess mehrheitlich zu automatisieren, ist das Direktbeflechten die Methode der Wahl. Das Beflechten kann nach entsprechender Programmierung voll automatisch durchgeführt werden. Weiter besitzt das Beflechten den Vorteil, dass durch die Vorschubgeschwindigkeit der Faserwinkel lokal eingestellt werden kann.

5.1.3 Vergleich Flechten und Wickeln

Die Möglichkeit des Wickelns wurde ebenfalls betrachtet, jedoch wurde von dieser Variante aus folgenden Gründen Abstand genommen. Für die Wickeltechnik ist es von primärer Wichtigkeit, dass die abgelegten Faserbahnen in konvexen Umschlingungskurven laufen. Denn eine konkave Struktur führt zum Abheben des Faserbandes und zum Überspannen dieser konkaven Struktur. Für den Großteil der Bauteiloberfläche ist das Wickeln möglich, jedoch nicht für den Verschneidungsbereich des Doppelkegelstumpfes in der Mitte des Bauteils. Selbst für sehr flache Wickelwinkel kommt es im Zwickelbereich zum Überspannen. Daher ist dieses Bauteil nicht durch Wickeln vollflächig belegbar.

5.2 Trennmittel

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den eingesetzten Trennmitteln sind nur in Relation zueinander aussagekräftig und von rein qualitativer Natur. Außerdem beziehen sich die Ergebnisse nur auf die Paarung der eingesetzten Matrix- und Werkzeugmaterialien. Die Entformung von Bauteilen unter Verwendung des Trennwaxes ist deutlich schlechter zu bewerten als die folgenden Alternativen. Des Weiteren ist für eine akzeptable Entformung eine sehr sorgfältige Arbeitsweise notwendig, da die pastöse Masse nur durch Einreiben bzw. Wischen in kleine Konturen gelangt. Die notwendigen Mengen an Trennmittel sind verhältnismäßig hoch und können leicht über- oder unterschätzt werden. Zu wenig Trennwachs führt zum Anhaften des Bauteils in der Kavität. Zuviel Trennmittel kann lokal zu Schlieren oder gar Unebenheiten auf der Bauteiloberfläche führen. Das Trennverhalten kann durch zusätzlichen Einsatz von PTFE-Spray verbessert werden. Hierbei ist im Allgemeinen weniger Trennwachs erforderlich um ähnliche Entformungscharakteristik zu erreichen. Der Einsatz von PTFE-Spray alleine ist zumin-

dest für die gegebene Werkzeuggeometrie weniger vorteilhaft, da in den Bereichen der Angussverteillerringe eine vollständige und gleichzeitig feine Eintrennung nur schwer zu erreichen ist. Der Sprühnebel ist manuell schwer reproduzierbar zu dosieren. Gegenteilig dazu gestaltet sich das Eintrennen des Werkzeugs mit dem Flüssigtrennmittel deutlich einfacher. Durch die hohe Fließfähigkeit dringt das Trennmittel bis in die kleinsten Radien ein. Es sind nur geringste Mengen erforderlich um die Kavitätsoberfläche vollständig mit dem Mittel zu befeuchten. Die leichtflüchtige Flüssigkeit verdampft und der Rückstand des Trennmittels bildet einen dünnen Film auf der Werkzeugoberfläche. Die Trennwirkung ist derart gut, dass sogar der dünne Harzfilm, der sich in der Werkzeugtrennebene aufgrund des Überspritzens der Kavität bildet, mitentformt werden kann (siehe Abbildung 38). Für die gegebene Materialpaarung und die verwendeten Trennmittel stellte das Flüssigtrennmittel das Optimum dar, jedoch muss auf ausreichende Belüftung der Arbeitsstätte geachtet werden.



Abbildung 38: Bauteil mit entformtem Harzfilm als Zeichen der Trenngüte. Zur besseren Visualisierung wurde ein blauer Hintergrund gewählt.

5.3 Einfluss der Verstärkungsstruktur

Die Verstärkungsstruktur ist mit Sicherheit eine der wichtigsten, wenn nicht die wichtigste Einflussgröße auf die Injektion. Zum Einen bestimmt sie die Permeabilität, die sich im Fließkanal ausbildet und zum Anderen gibt sie zu einem gewissen Grad Verfahrensgrenzen, wie bspw. die maximale Injektionsgeschwindigkeit, vor. Es wurden verschiedene Textilarchitekturen untersucht. Für die flächigen Textilien wurde unter anderem das „Aufschwimmen“ der Faserstruktur an Schnittkanten beobachtet. In Abbildung 39 ist dieser Sachverhalt dargestellt. An den Enden der Faserbündel können Luftblasen stehen bleiben und der Strömung des Harzes trotzen. Dadurch entstehen Defekte, die von einzelnen kleinen Bläschen bis hin zu großflächigen Ansammlungen von Luft reichen können. Weiter ist auf dieser Abbildung auch der dunkle Ring des harzgetränkten Schaumkerns zu erkennen.

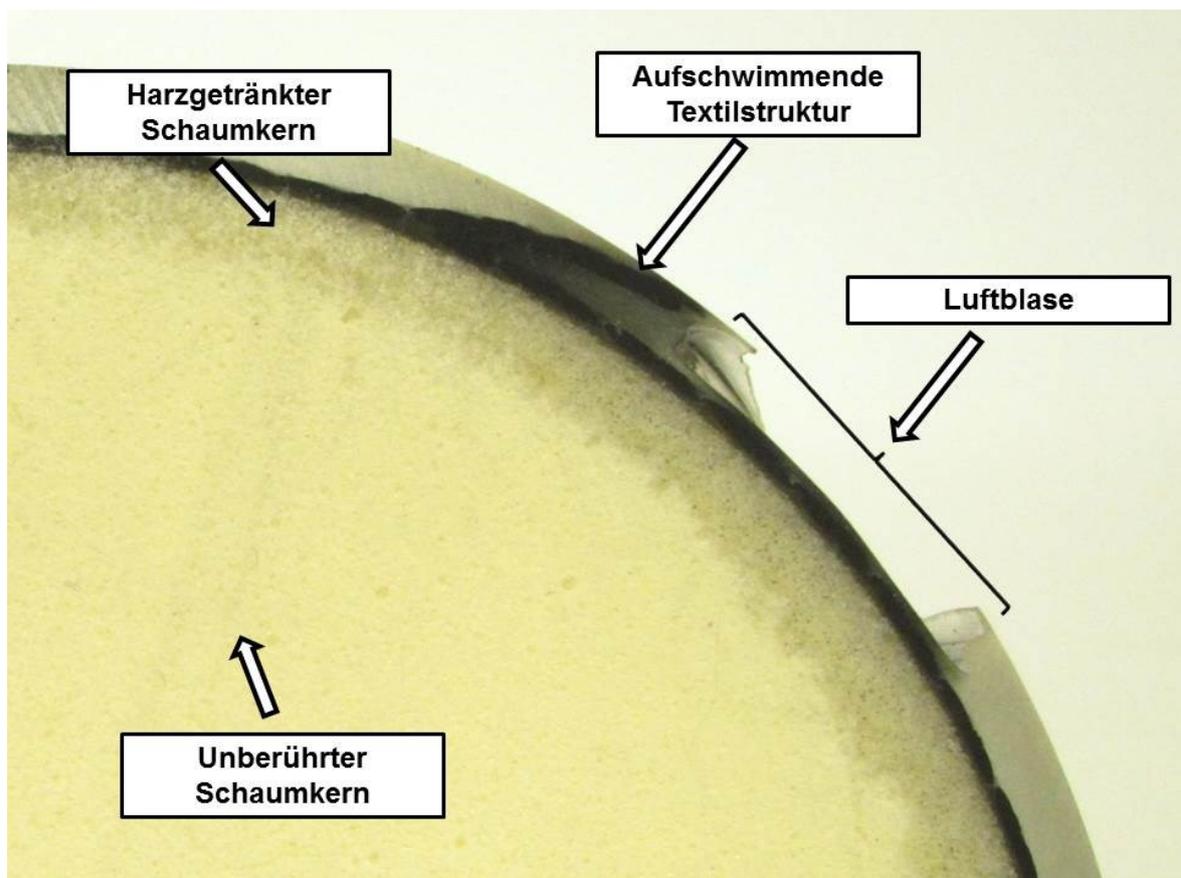


Abbildung 39: Schnittansicht einer aufschwimmenden Textilstruktur ($\equiv \pm$) mit Luftblase und harzgetränktem Schaumkern.

Da bei Geflechtem Faserenden nur an den axialen Enden zu finden sind und die Bauteilgeometrie ein Beflechtes zulässt, konnte dieser Effekt des „Aufschwimmens“ bei Geflechtem nicht beobachtet werden. Dadurch eignen sich Geflechte ausgezeichnet für diese Geometrie und tragen v.a. zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit bei, was eine Prozessoptimierung erst überhaupt möglich machte.

5.4 Einfluss des Massestroms

Ein wichtiger Regelparameter für die Injektion ist die eingestellte Förderleistung. Durch den Massestrom wird die Fließfrontgeschwindigkeit und somit das sich bildende Druckprofil bedingt. In Abbildung 40 sind die Druckverläufe ausgewählter Injektionen dargestellt. Harz- und Werkzeugtemperatur wurden mit jeweils 50° C konstant gehalten. Als Faserstruktur wurden je zwei Lagen des vorgestellten Geflechthalbzeuges D144/11 verwendet. Variiert wurde lediglich der Massestrom, der Legende in der Abbildung folgend aufsteigend von 0,13 kg/min über 0,36 kg/min und 0,48 kg/min bis 0,6 kg/min. Die Druckkurven, gemessen am Mischkopf, pendeln sich zunächst abhängig von dem Massestrom auf einem niedrigen Druckniveau ein. Bei Erreichen des Entlüftungspunktes am Fließwegende, mehr oder weniger kurz vor dem Austritt aus dem Werkzeug, durchläuft die Druckkurve einen steilen Anstieg. Der Austritt aus dem Werkzeug ist durch einen vertikalen Querstrich an den Kurven gekennzeichnet.

Zu Beginn liegen die Druckniveaus gestaffelt nach den Masseströmen vor. Je höher der eingestellte Massestrom, desto höher auch der Druck am Mischkopf. Der zunächst abfallende Trend der drei höherliegenden Druckkurven dürfte auf Anlauf- und Regeleffekte zurückzuführen sein, da die Anlage aus dem Stillstand bis zum entsprechenden Massestrom hochfährt und für die Überwindung der Systemträgheit höhere Anlaufdrücke benötigt. Die Interpretation des Druckanstiegs ist hingegen wesentlich schwieriger. Unter der Annahme, dass das Füllbild nur unwesentlich durch die Variation des Massestroms beeinflusst wird, zeigt Abbildung 40 deutlich eine große Streubreite des wirksamen Fließwiderstandes. Die sich lokal bildende Permeabilität, die ein Produkt aus dem Drapierprozess selbst und der schließlich vorliegenden Spaltweite in der Kavität ist, hat hier sicherlich erheblichen Einfluss. Die Versuche wurden nach Austritt aus dem Werkzeug, der durch

den Querstrich gekennzeichnet ist, beendet. Dazu wurde etwas Matrixmaterial einige Zentimeter in den Abgusschlauch gefördert um ein Abknicken des Abgusschlauches hinter der Fließfront zu ermöglichen.

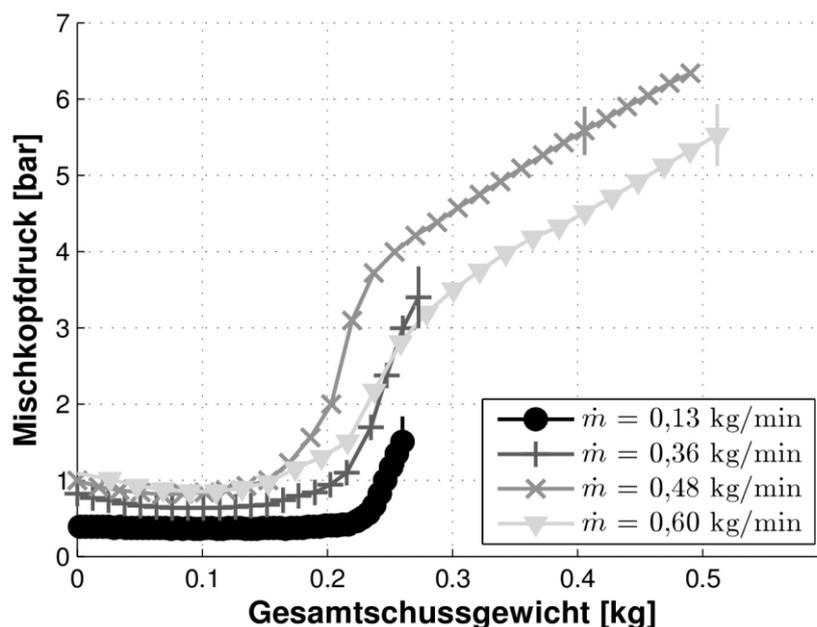


Abbildung 40: Druckverläufe bei verschiedenen Masseströmen über dem Gesamtschussgewicht. Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.

Bei dem Versuch mit 0,48 kg/min Massestrom ist ersichtlich, dass erst nach der Förderung von nahezu weiteren 0,1 kg Matrixmaterial dies möglich war. Die Vermutung liegt nahe, dass beim vorliegenden Druckniveau nahezu das gesamte Material in den Schaumkern injiziert wurde. Der Grund dafür dürfte im Verlegen der Abgussleitung durch einzelne Faserbündel liegen.

Beim Versuch mit dem höchsten Massestrom dürfte die Fließwiderstandssituation günstiger gewesen sein. Der Druckanstieg erfolgt weniger steil und erreicht erst bei höheren Gesamtschussgewichten gleiche Druckwerte.

Die Injektionen mit den zwei niedrigsten eingestellten Masseströmen sind abgesehen von den Anlaufeffekten sehr ähnliche Kurven. Auffällig ist, dass bei beiden Versuchen bei nahezu der gleichen Füllmenge das Austreten aus dem Werkzeug

erfolgt. Dies lässt auf eine Füllung mit wenig oder zumindest demselben Ausmaß an Matrixpenetration in den Schaumkern rückschließen.

Abbildung 41 macht den Unterschied in der Prozesszeit ersichtlich. Es werden für die Versuche aus Abbildung 40 die Drücke gegen die Versuchszeit aufgetragen. Hier ist wieder die Gesetzmäßigkeit zwischen den Versuchen mit 0,13 kg/min und 0,36 kg/min auffällig. Eine Erhöhung des Massestroms auf nahezu das Dreifache, führt zur Reduktion der Injektionszeit auf nahezu ein Drittel. Auffällig ist die Tatsache, dass obwohl die letzteren beiden Versuche mit 0,48 kg/min bzw. 0,60 kg/min die höheren Masseströme besitzen, zeitlich gesehen der Austritt aus der Kavität später erfolgt als bei dem Versuch mit einem Massestrom von 0,36 kg/min. Dies dürfte erneut auf die Blockade des Entlüftungspunktes zurückführbar sein.

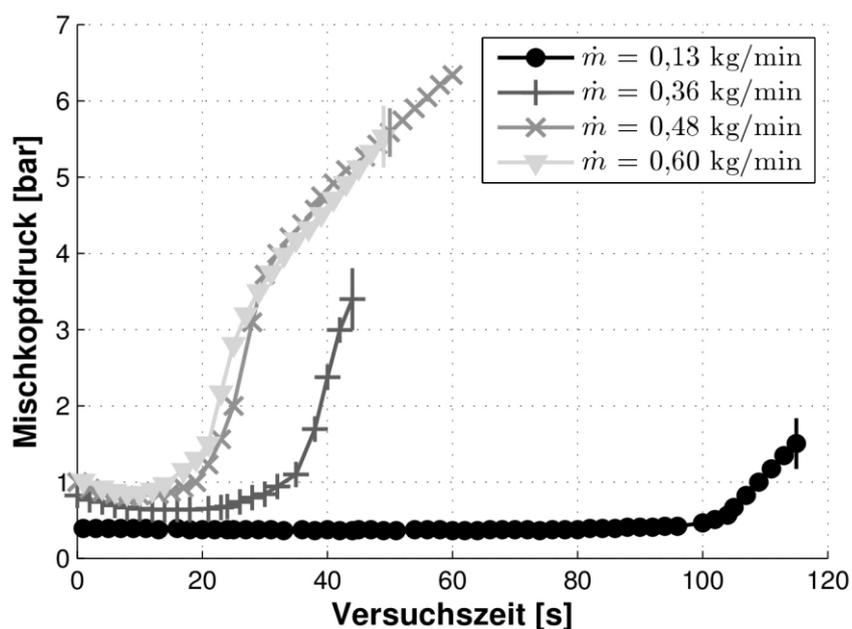


Abbildung 41: Druckverläufe bei verschiedenen Masseströmen über der Versuchszeit. Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.

5.5 Einfluss des Regeldruckes

Wie in Abbildung 39 bereits zu erahnen ist, besitzt der Schaumkern einen maximal ertragbaren Injektionsdruck, ab dem der Schaum penetriert und mit Harz getränkt wird. Aus Abbildung 40 ist deutlich zu erkennen, dass es kurz vor dem Austritt aus dem Werkzeug für jeden Versuch zu einem deutlichen Druckanstieg am Mischkopf

kommt. Im Sinne des Leichtbaus gilt es das Bauteilgewicht zu minimieren. Daher ist der Kavitätssinnendruck entsprechend zu reduzieren bzw. anzupassen um ein Eindringen des Harzes in den Kern weitestgehend zu unterbinden. Die Möglichkeit zur Druckbegrenzung bietet der sogenannte Regeldruck p_R . Bis zum Erreichen einer eingestellten Druckgrenze fördert die Injektionsanlage massestromgeregelt. Wird dieses Druckniveau überschritten, wechselt die Anlage in den druckgeregelten Betrieb und versucht diesen Druckwert entsprechend anzuregulieren. In Abbildung 42 sind Druckkurven gemessen am Injektionskopf über dem Gesamtschussgewicht zu sehen. Der Wert für die Massestromregelung wurde mit 0,6 kg/min konstant gehalten. Ebenfalls wurden alle 5 dargestellten Versuche ohne Vakuumunterstützung durchgeführt. Für die ersten 4 Versuche wurde der Regeldruck von 2 auf 3 bar in ausgewählten Schritten erhöht. Hier sind deutlich Druckspitzen und das nachfolgende Abregeln des Drucks zu erkennen. Um die Wirksamkeit der Druckregelung zu testen, wurde nach dem Werkzeugaustritt ein Spülvorgang vorgesehen. Dabei wird überschüssiges Material in die Abgussleitung gefördert. Der letzte dargestellte Versuch in dieser Serie wurde ohne Regeldruckniveau durchgeführt und entspricht dem Versuch mit 0,6 kg/min Massenstrom aus Abbildung 40. Die vertikalen Querstriche verdeutlichen neuerlich den Austritt der Fließfront aus dem Werkzeug.

Es ist hier ebenfalls eine Streuung der Kurven zu beobachten, obwohl bis zum Erreichen des jeweilig gewählten Regeldrucks jeder Versuch gleich ablaufen sollte. Andererseits haben in dieser Versuchsserie die drei Druckkurven mit den Regeldrücken 2,75 bar, 3 bar bzw. ohne Regeldruck einen nahezu identen Kurvenverlauf. Interessant ist der Sachverhalt der Prozesszeiten bis zum Austritt aus dem Werkzeug. Zum Einen bedingt ein niedriges Regeldruckniveau ein frühzeitiges Abregeln des Regeldrucks und dadurch verlängerte Füllzeiten wie im Fall der Kurve mit Regeldruckniveau von 2 bar. Zum Anderen führen hohe Drücke auch nicht notwendigerweise zu kurzen Füllzeiten. Im Fall des Versuches ohne Regeldruck ist trotz hohen Druckniveaus die Füllzeit länger als bei allen anderen Versuchen. Das Verstopfen der Abgussleitung durch Schlaufen von Faserbündeln dürfte durch hohe Drücke begünstigt werden.

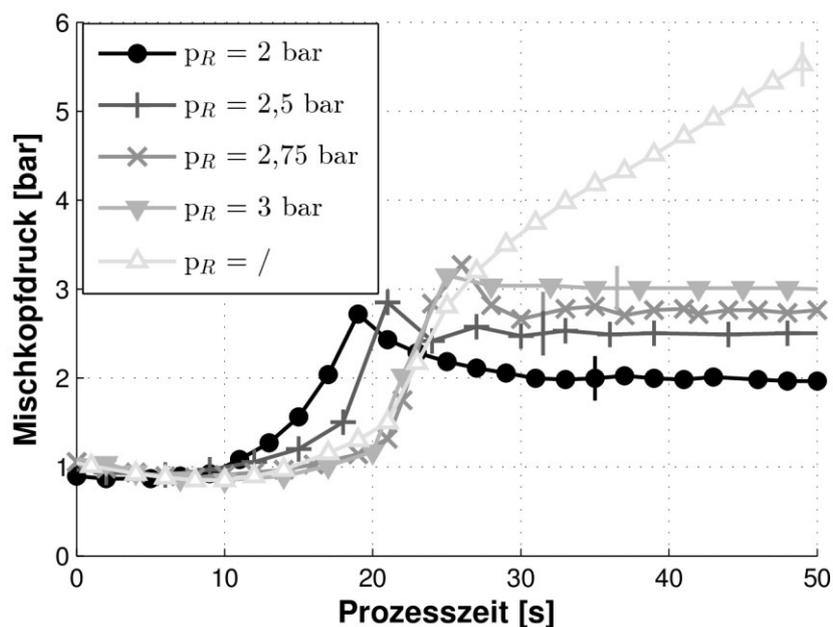


Abbildung 42: Druckverläufe über der Prozesszeit bei einem Massestrom von 0,6 kg/min bis zur jeweiligen Regeldruckgrenze p_R . Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.

Dieselbe Versuchsserie ist in Abbildung 43 dargestellt. Dies ist ein Diagramm, das dem Gesamtschussgewicht die Prozesszeit gegenüber stellt. Schön zu erkennen ist der lineare Verlauf der Kurve ohne Regeldruck. Die restlichen Schussgewichtskurven zeigen je nach eingestelltem Regeldruckniveau ein Abregeln des Massestroms, der als momentane Steigung der Kurve interpretiert werden kann.

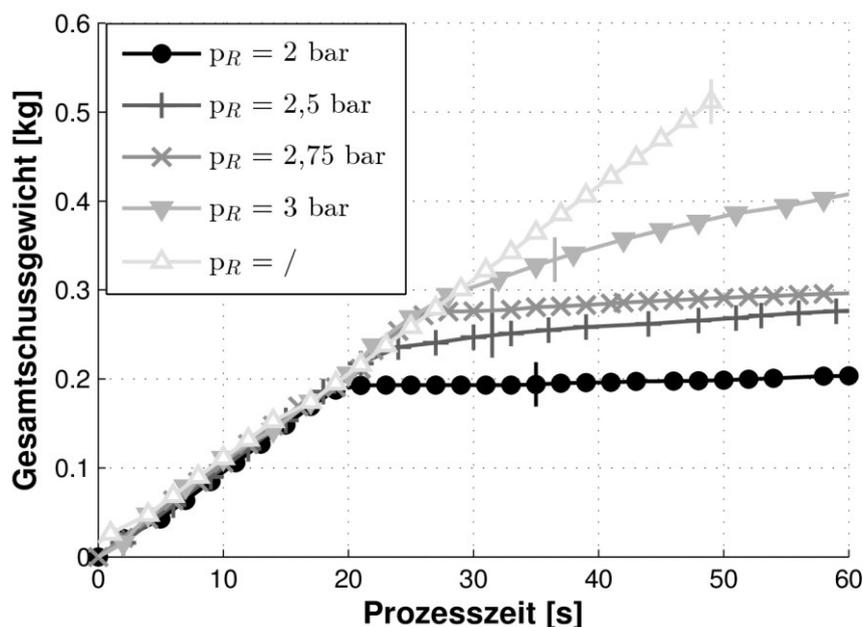


Abbildung 43: Gesamtschussgewicht über der Prozesszeit bei einem Massestrom von 0,6 kg/min bis zur jeweiligen Regeldruckgrenze p_R . Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.

Es kann nun zwischen drei verschiedenen Charakteristiken der Kurvenverläufe „Gesamtschussgewicht über Prozesszeit“ unterschieden werden. Nämlich erstens in jene Kurven, die keinen eingestellten Regeldruck besitzen und einen linearen Verlauf besitzen. Zweitens in jene Kurven, die einen Regedruck vorgegeben haben, jedoch nach Erreichen des Regeldrucks erneut einen verminderten, aber konstanten Massestrom verzeichnen – oder anders ausgedrückt einen zweiten linearen Bereich vorweisen. Und letztens in jene Kurven, die nach dem Erreichen des Regeldruckniveaus einen stetig abfallenden Massestrom erzielen bzw. einen „ausgebauchten“ Kurvenverlauf „Gesamtschussgewicht über Prozesszeit“ besitzen, wie bspw. der Versuch in Abbildung 43 mit einem Regeldruckniveau von 3 bar.

Erstere sind eher trivial zu interpretieren. Durch Verstopfen der Abgussleitung steigt zwar der Fließwiderstand, jedoch solange die Maschinengrenze nicht erreicht ist, wird lediglich der Injektionsdruck weitergesteigert (vgl. Abbildung 42) und der Massestrom konstant gehalten. Dadurch ergibt sich der lineare Kurvenverlauf.

Interessanter sind die letzteren beiden Kurvencharakteristiken. Aus Gründen der Verständlichkeit soll hier eine Hypothese zuerst angeführt sein und in den folgenden Absätzen erläutert werden. Diese Hypothese lautet: Kurvenverläufe „Gesamtschussgewicht über Prozesszeit“ mit „ausgebauchter“ Charakteristik sind jene Versuche, bei denen eine Harzpenetration des Schaumkerns auftritt. Gleichbedeutend sind jene mit linearem Kurvenverlauf nach dem Erreichen der Druckgrenze, jene Versuche ohne Harzpenetration.

Dieser Sachverhalt lässt sich anschaulich erklären, wenn man folgende Annahmen trifft:

- Es gelte der Massenerhaltungssatz für das geförderte Material.
- Der Fließwiderstand für das Ein- und Durchströmen der Abgussleitung sei konstant.
- Bei Erreichen des Regeldruckniveaus sei der Kavitätssinnendruck konstant.
- Unter dem maximal ertragbaren Druckniveau verhalte sich der Schaumkern wie ein idealer starrer Körper.
- Über dem maximal ertragbaren Druckniveau verhalte sich das Kernmaterial wie ein ideales, poröses Medium und folgt so dem Gesetz von D’Arcy.

Für den Fall, dass der maximal ertragbare Druck nicht überschritten wird, jedoch der eingestellte Regeldruck erreicht wird, ist die Lösung relativ trivial. Dem gesamten, geförderten Massestrom, der die Kavität über die Angussöffnungen erreicht, muss ein Massestrom gegenüber stehen, der im selben Zeitraum die Kavität über die Abgussöffnung wieder verlässt. Da der Druck und der Fließwiderstand konstant sind, ist auch der Massestrom konstant. Der Verlauf des Gesamtschussgewichts über der Zeit ist somit linear.

Für den Fall, dass der maximal ertragbare Druck (deutlich) überschritten wird, kommt nun die letzte Annahme ins Spiel. Dem geförderten Massestrom stehen nun zwei Beträge gegenüber. Nämlich jener, der durch Überwinden des Fließwiderstandes der Abgussleitung aus der Kavität hinausströmt und jener, der dem Gesetz von D’Arcy folgend in den Schaumkern eindringt. Unter der Annahme konstanter Druckverhältnisse bleibt ersterer der beiden Massestrombeträge neuerlich

konstant. Zweiterer jedoch erfährt beim Eindringen in den Schaumkern einen Fließwiderstand. Dieser Fließwiderstand ist ein Druckverbraucher. Somit fällt der Druck bis an die Fließfront im Schaumkern auf den maximal ertragbaren Druck p_{\max} ab. Bei fortschreitender Penetration wird das wirksame Druckgefälle flacher (vgl. Abbildung 44). Dadurch wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Schaumkern geringer und der Betrag des Massestroms, der pro Zeiteinheit in den Kern eindringt, nimmt stetig ab. So ergibt sich ein rückläufiger Massestrom bzw. ein Verlauf mit abnehmender Steigung der Kurve „Gesamtschussgewichts über Prozesszeit“.

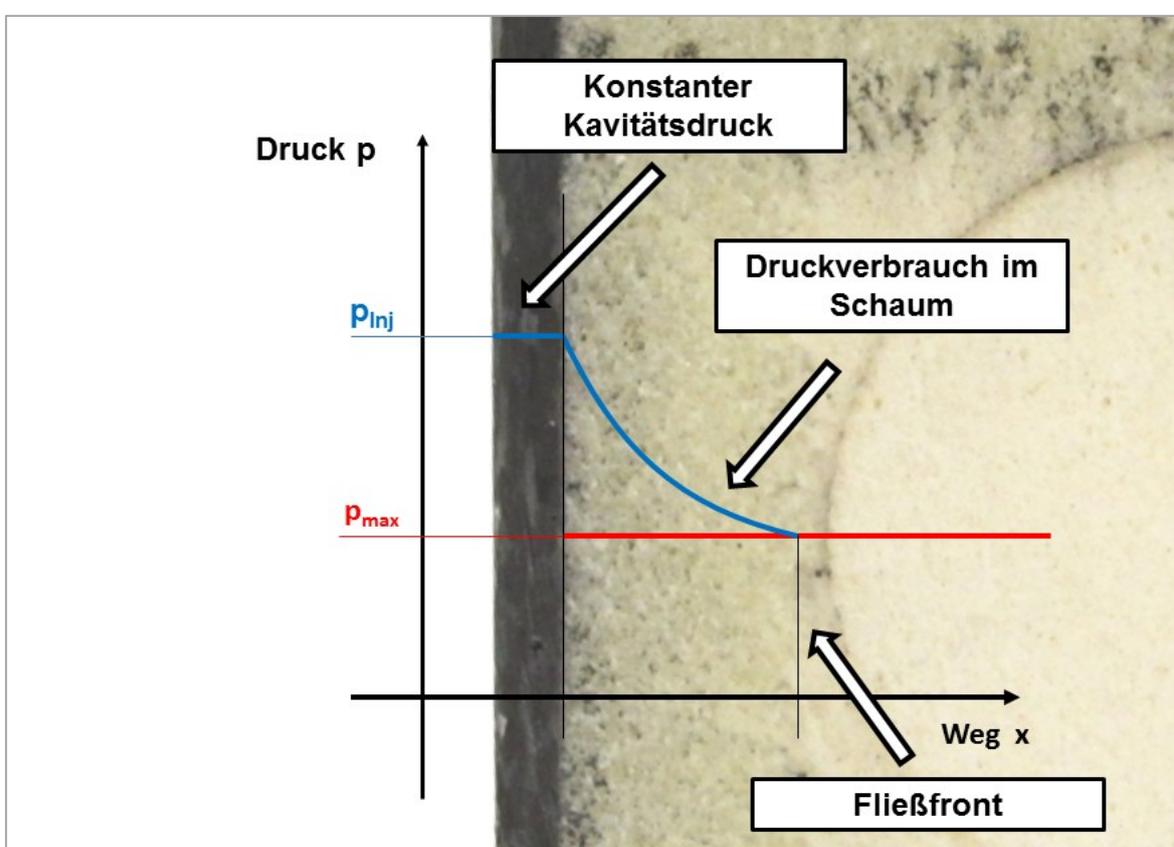


Abbildung 44: Druckverlauf im Schaumkern bei Harzpenetration.

Den tatsächlichen Beweis für diese Betrachtungen liefern die Harzgewichtsanteile der Probekörper durch Differenzwägen vor und nach der Injektion. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der diskutierten Versuche aus Abbildung 43 zusammengefasst. Angegeben sind der Versuchsname, der gewählte Regeldruck p_R in bar, die Kurvencharakteristik und der Harzgewichtsanteil nach der Injektion m_{Harz} in g.

Zu erkennen sind eklatante Gewichtsunterschiede. So besitzt der Versuch FS .60 3 50 / ein um 361 g höheres Harzgewicht als FS .60 2 50 /, was einem Zusatzharzgewicht von mehr als 150 % entspricht.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zur Druckregelung.

Versuch	p_R	Kurvencharakter	m_{Harz}
(FS in p_R T_H p_v)	[bar]		[g]
FS .60 2 50 /	2	2 x linear	239
FS .60 2.5 50 /	2,5	ausgebaucht	336
FS .60 2.75 50 /	2,75	2 x linear	293
FS .60 3 50 /	3	ausgebaucht	600
FS .60 / 50 /	/	1 x linear	506

Interessant ist nun, dass offensichtlich der Druck alleine nicht für die Harzpenetration verantwortlich sein kann. Denn der Versuch FS .60 2.75 50 / weist mit 2,75 bar Regeldruck die Charakteristik einer Injektion ohne Harzpenetration auf, während der Versuch FS .60 2.5 50 / mit 2,5 bar Regeldruck eine leichte ausgebauchte Kurve in Abbildung 43 zeigt. Es dürften daher zumindest die ertragbaren Drücke von Probe zu Probe variieren oder andere Einflussgrößen zum Absinken dieser Grenzdrücke führen. Denkbar ist bspw. eine Erweichung des Kernmaterials durch die Auslagerung im temperierten Werkzeug. So hätten Auslagerungszeit im Werkzeug, Werkzeugtemperatur, Wärmeübergang sowie Wärmeleitung durch die drapierten Faserlagen einen Einfluss auf die ertragbaren Drücke. Um diesen Einfluss zu reduzieren wurde die Auslagerungszeit vor der Injektion so kurz wie möglich gehalten und eine reproduzierbare Handlungsabfolge erarbeitet. Konkrete Untersuchungen zu den einzelnen Einflussgrößen wurden jedoch nicht angestellt.

Neben dem Bestreben nach Gewichtseffizienz gibt es noch einen zweiten Grund für die Druckbegrenzung durch das Wählen eines geeigneten Regeldrucks. Das in den Schaumporen befindliche Gasvolumen muss durch die Harzpenetration aus dem Kern entweichen, da es durch das eindringende Matrixmaterial verdrängt

wird. Da die Harzpenetration am wahrscheinlichsten zu einem späten Zeitpunkt der Formfüllung auftritt, da hier isobare Druckverhältnisse bei verhältnismäßig hohen Drücken vorliegen, kann dieses Gasvolumen oftmals nicht mehr aus der Kavität entweichen. Es wären lange Spülzeiten von Nöten, die wiederum große Mengen an überschüssigem Matrixmaterial bedingen würden und so dem Grundsatz der Ressourcenschonung widersprechen.

5.6 Einfluss der Evakuierung

Bei der Mehrzahl der Versuche wurde auf eine Vakuumunterstützung zurückgegriffen. Dazu kam eine Vakuumpumpe mit zwischengeschalteter Harzfalle zum Einsatz. Die Abgussleitung wurde direkt aus dem Werkzeug in die Harzfalle geführt, von wo eine Schlauchleitung zur Ansaugöffnung der Pumpe weitergeführt wurde.

In Abbildung 45 sind zwei Druckkurven dargestellt. Die durchgeführten Versuche wurden beide mit einem Soll-Massestrom von 0,60 kg/min und einem Regeldruck von 2,75 bar durchgeführt. Die Temperatur des Injektionsharzes wurde in beiden Fällen mit 50 °C gewählt. Die beiden Versuche unterscheiden sich lediglich im angelegten Unterdruck an der Abgussleitung. Deutlich zu erkennen ist, dass das Anlegen des Unterdrucks ein Absenken des nötigen Druckniveaus bewirkt, nämlich mehr oder weniger exakt um genau den Betrag des angelegten Unterdrucks. Die Differenz bleibt solange erhalten, bis (nahezu) der Regeldruck erreicht wurde. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die druckgeregeltere Förderung. In Abbildung 46 ist eine leicht erhöhte Steigung der Kurve mit Vakuumunterstützung zu erkennen, was auf den erhöhten Massestrom schließen lässt. Außerdem deutet die ausgebauchte Form auf eine Harzpenetration hin, die sich auch hier durch Differenzwägen bestätigen lässt.

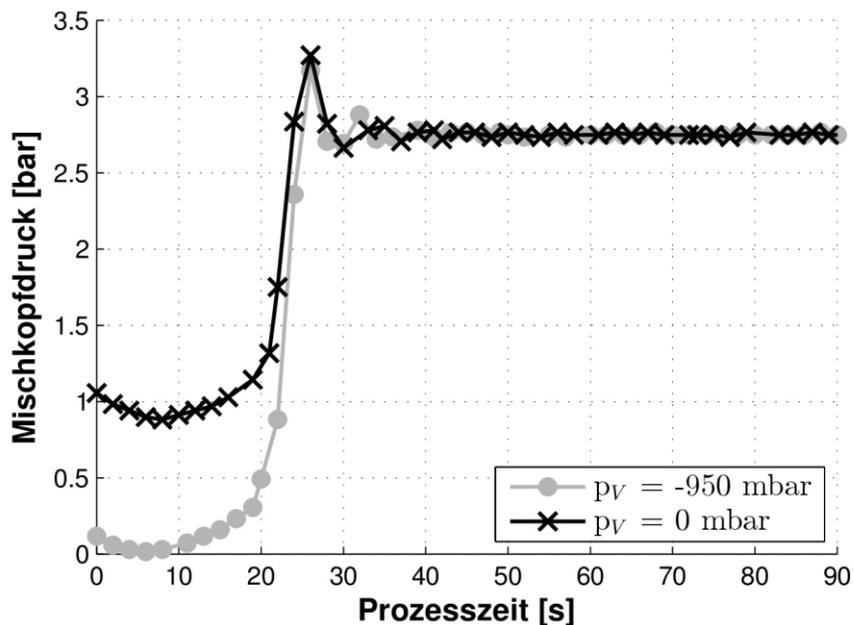


Abbildung 45: Druckverläufe mit und ohne Vakuumunterstützung.

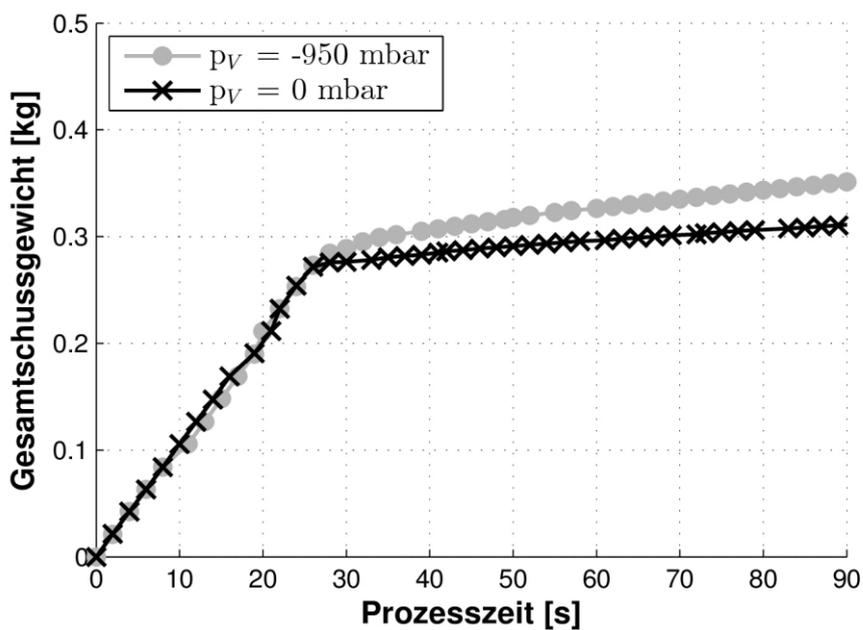


Abbildung 46: Gesamtschussgewicht über der Prozesszeit mit und ohne Vakuumunterstützung.

Direkt nach der Formfüllung sollte das Vakuum gedrosselt werden. Der Grund dafür ist einerseits, dass durch das anliegende Vakuum keine Luft mehr sondern Matrixmaterial aus der Kavität gesaugt wird. Sollte sich nun noch etwas Luft in der Kavität befinden, so wird der Durchmesser dieser Gasbläschen wesentlich durch den Umgebungsdruck bedingt. Anliegendes Vakuum würde diesen senken und den Radius dieser Bläschen vergrößern und so die Strömung der Gasblasen behindern. Geht man jedoch andererseits von einer verstopften Abgussleitung und somit weitestgehend isobaren Verhältnissen in der Kavität aus, so hat das anliegende Vakuum an der Abgussleitung kaum Einfluss auf den Kavitätsinnendruck und kann ebenfalls reduziert werden. Und drittens wurde trotz sorgfältigster, vorbereitender Harzentgasung Bläschen- bzw. Vakuolenbildung in der Abgussleitung bei anliegendem Vakuum beobachtet.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass ein Abfallen der Druckkurve deutlich unter 0 bar Injektionsdruck einige Schwierigkeiten mit sich bringt. Zum Einen verschwimmen hier die Verfahrensgrenzen von Harzinjektion und Vakuuminfusion. Zum Anderen wird dadurch das Material aus der Injektionsanlage herausgesaugt. Das Problem dabei ist, dass dies für die beiden Komponenten Harz und Härter verschieden stark passiert und die Injektionsanlage nur bedingt bis gar nicht das gewählte Mischungsverhältnis (MV) halten kann. Dies verdeutlicht Abbildung 47. Es sind sowohl der Mischkopfdruck als auch das Mischungsverhältnis dargestellt. Bei diesem Versuch wurde etwa bei Sekunde 65 der Unterdruck gelöst, was sich durch eine Stufe im Druckprofil äußert. Davor liegt das Druckniveau deutlich unter 0 bar Mischkopfdruck, wodurch die Schwankung des Mischungsverhältnisses erklärt werden kann. Dieses weicht deutlich vom Idealverhältnis 30 g Härter / 100 g Harz ab und schwankt zwischen extremen Werten. Zu erkennen ist auch, dass der Mischkopfdruck stetig zu steigen beginnt. Dies kann auf den steigenden Fließwiderstand durch fortschreiten der Fließfront erklärt werden. Mit dem steigenden Mischkopfdruck pendelt das Mischungsverhältnis auch weniger weit um den Idealwert. Jedoch erst nach dem Lösen des Unterdrucks und einer neuerlichen Einschwingphase kann das Mischungsverhältnis konstant gehalten werden.

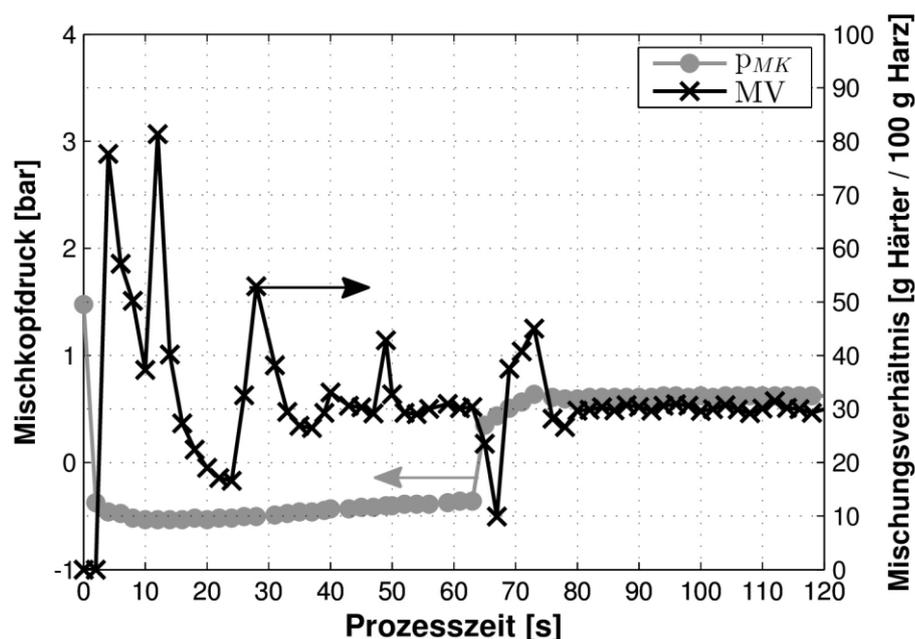


Abbildung 47: Darstellung der Beziehung von Unterdruck und Mischungsqualität.

5.7 Einfluss der Harzinjektionstemperatur

Die Harzinjektionstemperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Viskosität des Materials. Je kälter die Injektionsmasse ist, desto viskoser verhält sie sich. Dies äußert sich nach der Gleichung (2), dem Gesetz von D'Arcy, auch in der Druckkurve. Um einen bestimmten Massestrom beizubehalten ist bei niedrigeren Temperaturen ein erhöhter Injektionsdruck erforderlich. In Abbildung 48 wird dieser Sachverhalt ersichtlich. Die dargestellten Druckkurven sind Versuchen entnommen, welche bei einem Massestrom von 0,6 kg/min und einem Regeldruckniveau von 2,5 bar durchgeführt wurden. Variiert wurde lediglich die Harztemperatur durch entsprechende Parameterwahl für die Harztopf- und Harzzuleitungstemperierung. Die dargestellten Versuche wurden unter Vakuumunterstützung durchgeführt, was das niedrige Anfangsdruckniveau der ersten Druckkurve bedingt. Im massestromgeregelten Bereich¹ ist der Anstieg des Druckniveaus von der ersten zur letzten Kurve durch die steigende Viskosität und dem damit verbundenen Fließwiderstandsanstieg deutlich zu erkennen.

¹ Anmerk.: Bereich vor den Druckspitzen

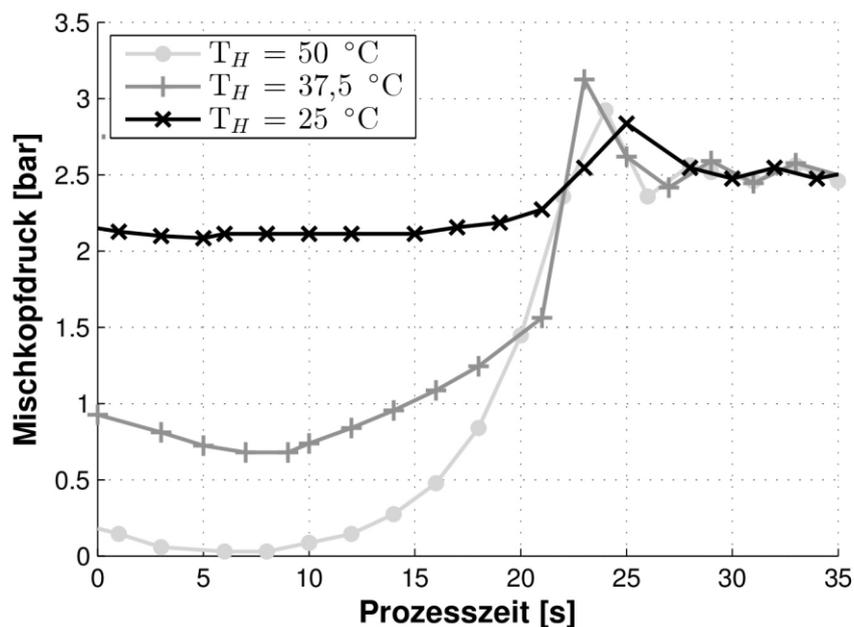


Abbildung 48: Einfluss der Harztemperatur auf den Mischkopfdruck.

Für die Balancierung der Prozessparameter ist die Harztemperatur ein wesentlicher Einflussfaktor. Gerade was die Abstimmung mit dem Evakuierungsunterdruck betrifft, bieten sich hier große Möglichkeiten. Während der Versuch bei 50 °C Harztemperatur nur knapp über der 0 bar Grenze liegt, ergibt sich bei nur 12,5 °C geringerer Temperatur bereits ein komfortabler Abstand zu dieser Prozessgrenze.

5.8 Bauteilbewertung

Für die Optimierung eines Prozesses ist die Definition einer Zielgröße unerlässlich. In der vorliegenden Arbeit wurde als Zielgröße das Ergebnis der optischen Bauteilbewertung herangezogen. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der erzielten Punkte wurde in Kapitel 4.6 erläutert. Konkret wurden drei Einzelbewertungen durchgeführt, die durch Mittelwertbildung zum Zwischenergebnis überführt wurden. In Tabelle 9 ist dieses für die Einzelversuche angegeben. Die Versuche sind nach dem in Tabelle 5 vorgestellten Schema benannt und in chronologischer Reihenfolge geordnet.

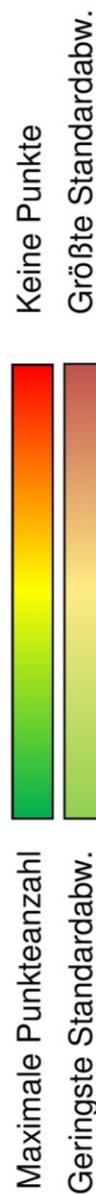
Tabelle 9: Zwischenergebnis der Bauteilbewertung.

	Max. Punkte	F1	≡ ± 1	≡ ± 2	≡ ± 3	≡ 0/90 1	≡ 0/90 2	≡ 0/90 3	F2	F3	FS .13 / 50 /	FS .36 / 50 /	FS .60 / 50 /	FS .48 / 50 /
Defekte	68	41,5	49,3	36,0	32,7	57,0	43,8	54,8	46,7	52,2	49,5	48,7	60,3	57,3
Angussverteiler	8	4,7	4,3	3,3	1,3	6,7	5,3	6,2	4,5	4,5	4,8	6,8	6,7	6,3
Bereich des Abgusses	15	8,0	9,3	9,0	8,3	13,7	9,3	13,7	8,3	13,0	12,3	10,3	13,7	13,0
Oberseite	15	6,5	7,7	6,3	2,3	12,3	9,7	10,3	7,8	9,3	7,7	9,2	12,7	12,7
Unterseite	15	9,0	14,7	13,7	11,3	14,0	10,3	13,3	14,3	12,0	11,0	11,7	13,0	11,7
Trennebene	15	13,3	13,3	3,7	9,3	10,3	9,2	11,3	11,7	13,3	13,7	10,7	14,3	13,7
Risse, Ausbrüche	8	0,0	4,0	7,7	6,0	7,7	7,0	6,7	8,0	7,7	7,3	7,7	7,7	7,7
Fiber wash-out	8	7,0	7,0	0,0	0,0	8,0	0,0	2,0	8,0	4,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Entformung	8	0,0	3,0	4,0	1,0	5,0	4,0	3,0	7,0	6,0	4,0	5,0	5,0	5,0
Faserverzug	8	6,3	3,7	3,3	3,3	3,7	3,7	3,0	6,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Oberfläche gesamt	100	54,8	67,0	51,0	43,0	81,3	58,5	69,5	76,0	77,2	75,2	75,7	87,3	84,3
Standardabweichung		8,78	4,08	4,97	8,52	5,56	7,76	3,34	6,01	5,54	3,79	3,3	1,31	2,25



Fortsetzung von Tabelle 9: Zwischenergebnis der Bauteilbewertung

	Max. Punkte	FS .60 2 50 /	FS .60 3 50 /	FS .60 2.5 50 /	FS .60 2.75 50 /	FS .60 2.75 50 950	FS .60 2.5 50 950	FS .60 2.5 25 950	DB .60 50	DB .60 37.5	DB .48 37.5	DB .48 50
Defekte	68	50,5	60,2	52,2	59,5	64,5	66,8	67,0	61,5	66,3	65,5	65,2
Angussverteiler	8	5,8	6,7	6,2	6,5	7,0	7,2	7,0	6,8	7,0	6,8	6,8
Bereich des Abgusses	15	11,7	13,8	12,3	13,5	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Oberseite	15	8,7	12,7	11,3	13,3	13,7	15,0	15,0	12,7	14,3	13,7	13,7
Unterseite	15	11,7	12,3	11,0	11,8	14,5	15,0	15,0	13,7	15,0	15,0	14,7
Trennebene	15	12,7	14,7	11,3	14,3	14,3	14,7	15,0	13,3	15,0	15,0	15,0
Risse, Ausbrüche	8	7,7	7,3	5,7	5,7	7,7	7,0	7,0	7,3	7,0	6,7	6,7
Fiber wash-out	8	7,0	7,0	7,0	7,0	6,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Entformung	8	4,0	4,0	4,0	4,0	6,0	5,0	6,0	7,7	6,0	6,0	6,0
Faserverzug	8	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	3,0
Oberfläche gesamt	100	76,5	85,8	76,2	83,5	91,5	93,2	94,3	90,5	93,7	92,5	87,8
Standardabweichung		1,47	0,62	2,95	1,08	0,41	0,85	0,47	2,86	0,24	0,71	3,06



Mit der Beurteilung der Bauteilqualität lassen sich nun quantifizierte Aussagen über die einzelnen Versuche treffen. Die Beurteilung des Bauteilgewichts ist an dieser Stelle noch ausständig und wird nach den folgenden Betrachtungen gesondert angeführt.

5.8.1 Lernkurve „Bauteilqualität“

Es ergibt sich folgender Sachverhalt, wenn die Bauteilqualität über der Versuchsnummer aufgetragen wird. Abbildung 49 zeigt diese Darstellung, sowie eine geeignete Interpolationsfunktion. Es ist deutlich zu erkennen, dass der generelle Trend der Kurve einen stetigen Anstieg zeigt. Die Wahl der Funktion erfolgte hinsichtlich der asymptotischen Annäherung an die 100 Punkte Marke, die so theoretisch erst beim unendlichsten Versuch erreicht wird. Die Parameter der Funktion wurden durch Linearisierung dieser und anschließender Linearer Regression ermittelt.

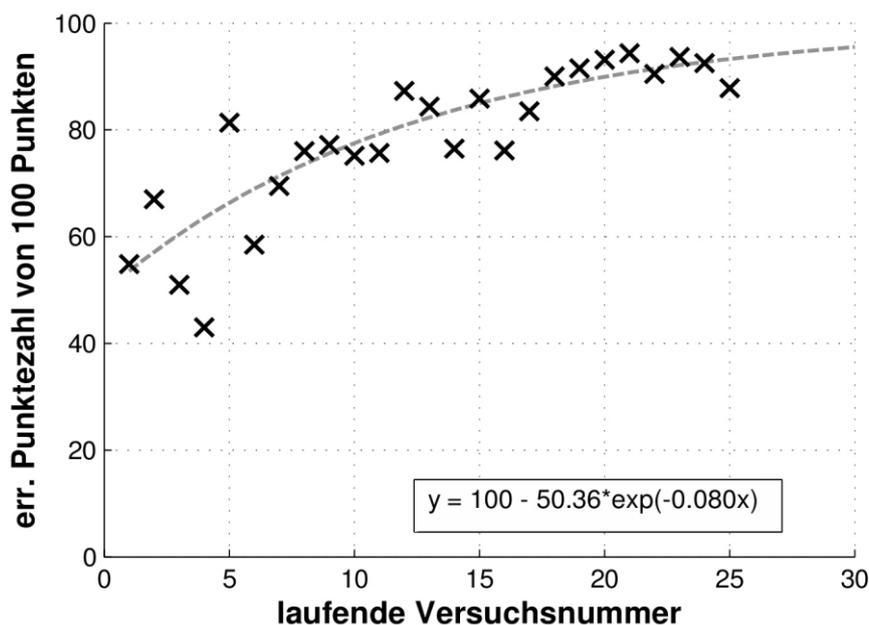


Abbildung 49: Lernkurve „Bauteilqualität“: Darstellung der Bauteilqualität über der laufenden Versuchsnummer.

5.8.2 Trainingseffekt

Neben der schrittweisen Annäherung an das Prozessoptimum dürfte auch die Erfahrung und das Training der Versuchsdurchführenden eine entscheidende Rolle spielen. Dieser Sachverhalt wird ersichtlich, wenn die erreichte Punktezahl der durchgeführten Versuche (inkl. Vorversuchsserie) dem Durchführungsdatum gegenübergestellt wird. In Abbildung 50 ist dieses Diagramm dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur ausgewählte Datumsangaben ausgewählt. Zu erkennen sind neben den Markierungen der Einzelversuche auch zwei Unterbrechungen, nämlich vom 09/07 bis zum 29/07 bzw. vom 20/08 bis zum 10/10. Es ist ein deutlicher Abfall in der Teilequalität nach der ersten Unterbrechung zu bemerken. Hier ist deutlich noch nicht die optimale Parametereinstellung gefunden worden, was durch die große Streubreite der Einzelversuch ersichtlich wird. Nach einigen Versuchen jedoch stellt sich erneut ein Lerneffekt ein und die Qualitätswerte erreichen erstmals mehr als 90 Punkte.

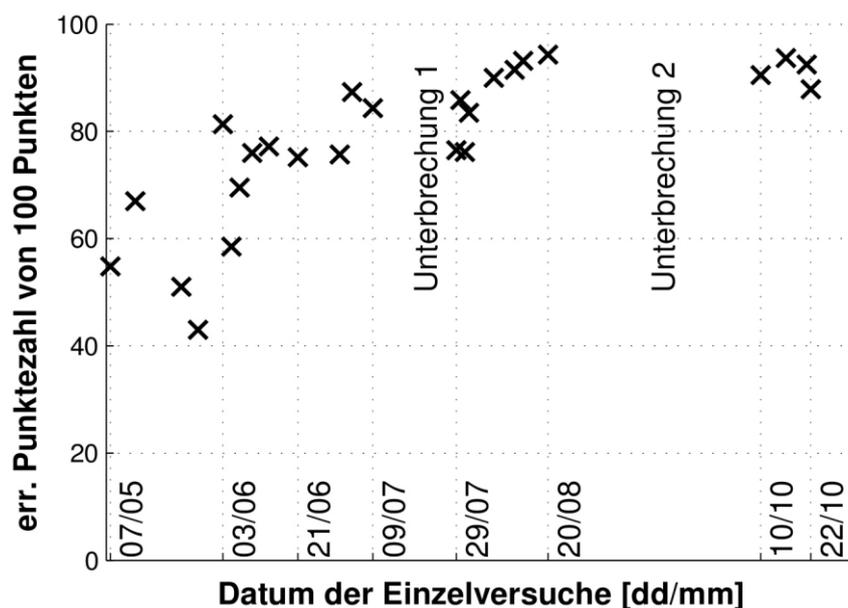


Abbildung 50: Bauteilqualität über dem Versuchsdatum. Nach den Unterbrechungen ist ein gesenktes Qualitätsniveau sichtbar.

Nach der zweiten Unterbrechung ist erneut ein niedrigeres Niveau zu erkennen. Diese Versuchsserie muss aber relativiert betrachtet werden, da es sich hierbei

um die Versuche der direktbeflochtenen Kerne handelt, die somit eine andere Faserstruktur sowie Permeabilität besitzen. Die Streuung kommt durch die Abarbeitung eines Versuchsplans, der auf den Ergebnissen der vorangegangenen Versuchen basiert. Beachtlich ist dennoch das hohe Anfangsniveau der Qualität dieser Serie im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsserien.

Vollständigkeitshalber sind hier nun in Tabelle 10 die erreichten Punkte inklusive der Punkte für das Bauteilgewicht angegeben.

Tabelle 10: Endergebnis der Bauteilbewertung.

		F1	≡ ± 1	≡ ± 2	≡ ± 3	≡ 0/90 1	≡ 0/90 2	≡ 0/90 3	F2	F3	FS .13 / 50 /	FS .36 / 50 /	FS .60 / 50 /	FS .48 / 50 /
Max. Punkte														
Oberfläche gesamt	100	54,8	67	51	43	81,3	58,5	69,5	76	77,2	75,2	75,7	87,3	84,3
Gewicht Harz in g		0	439	0	242	378	257	288	283	811	238	267	506	520
Punkte Gewicht	50	0,0	15,3	0,0	50,0	30,5	50,0	50,0	50,0	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0
Gesamtpunktezahl	150	54,8	82,3	51,0	93,0	111,8	108,5	119,5	126,0	77,2	125,2	125,7	87,3	84,3

		FS .60 2 50 /	FS .60 3 50 /	FS .60 2.5 50 /	FS .60 2.75 50 /	FS .60 2.75 50 950	FS .60 2.5 50 950	FS .60 2.5 25 950	DB .60 50	DB .60 37.5	DB .48 37.5	DB .48 50
Max. Punkte												
Oberfläche gesamt	100,0	76,5	85,8	76,2	83,5	91,5	93,2	94,3	90,5	93,7	92,5	87,8
Harzgewicht in g		239	600	336	293	499	348	323	294	286	351	311
Punkte Gewicht	50	50,0	0,0	41,0	50,0	0,3	38,0	44,3	50,0	50,0	37,3	47,3
Gesamtpunktezahl	150	126,5	85,8	117,2	133,5	91,8	131,2	138,6	140,5	143,7	129,8	135,1



5.9 Prozessroutine

In diesem Abschnitt soll die erarbeitete Routine zur Inbetriebnahme sowie die generelle Herangehensweise bei neuen Projekten ausführlich erläutert werden. Die Inhalte dieses Abschnitts sind im Anhang unter 11.1 in Form einer Checkliste zusammengefasst, die auch für zukünftige Projekte in der Praxis in angepasster Version herangezogen werden kann.

5.9.1 Ermittlung Prozessparameter

Mit der gesammelten praktischen Erfahrung aus den durchgeführten Versuchen kann ein Prozedere zur beschleunigten Ermittlung der RTM- bzw. VARTM-Prozessparameter vorgeschlagen werden. In Abbildung 51 ist die systematische Herangehensweise in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

Ausgangspunkt für die Betrachtungen sind die Vorgaben eines fiktiven Projektpartners. Diese sind die gewünschte äußere Bauteilgeometrie, ein vorhandenes Werkzeug, der Lagenaufbau bzw. Faserdrapierung inklusive evtl. Kernmaterialien und Inserts sowie das Matrixsystem. Hier kann diese Reihung von „schwer adaptierbar“ bis „leicht adaptierbar“ interpretiert werden und sollte ggf. auch entsprechend dieser Maßgabe abgearbeitet werden (Grundsatz des geringsten Aufwands). Diese Vorgaben können im Einzelfall jedoch auch abweichende Gewichtung haben und sind daher immer mit dem Projektpartner abzustimmen.

Als ersten Entscheidungspunkt gilt es die Injektionsstrategie zu wählen. Dabei sind prinzipiell die vorhandenen Öffnungen hinsichtlich ihrer Lage als technisch sinnvolle Anguss- und/oder Entlüftungspunkte zu bewerten. Bei komplexen Bauteilgeometrien, die ein nicht triviales Füllbild zur Folge haben, können übersichtsmäßige Füllsimulationen eine erste Idee zur Formfüllung geben. Erscheinen mehrere Strategien denkbar, so sollte hinsichtlich der Entlüftung die Erfolgversprechendste ausgewählt werden. Das bedeutet möglichst eine Formfüllung zu wählen, bei der die Fließfront von unten nach oben steigt und am Fließwegende erst die Entlüftungspunkte erreicht. Ist die Strategie gewählt, so kann die Wahl der Prozesstemperaturen getroffen werden.

Hauptsächlich werden die Harztemperatur und Werkzeugtemperatur gewählt. Sinnvoll ist diese aufeinander abzustimmen – im besten Fall sogar ident zu wählen. Die Expansion des Harzes durch höhere Werkzeugtemperaturen ist in einer geschlossenen Kavität behindert und führt zu Druckspitzen [15]. Angemerkt sei hier, dass ein Gelieren des Matrixmaterials ebenfalls ein Verschließen der Anguss- und Entlüftungspunkte bedeuten kann. Wird das Matrixmaterial inhomogen erwärmt und härtet lokal frühzeitig aus, können so ungewollte Druckspitzen generiert werden. Maßgabe für die Wahl der Temperaturen ist das gewünschte Verarbeitungszeitfenster, das mit dem Datenblatt des Matrixsystems abgeschätzt werden kann [4]. Für Systeme mit kurzen Reaktionszeiten (< 30 min) ist es ratsam zu Beginn durch Wahl niedriger Temperaturen bewusst längere Härtingszeiten in Kauf zu nehmen, da genügend Zeit für das Maschinenhandling eingeplant werden sollte.

Sind die Temperaturen gewählt, werden die kritischen Drücke für die einzelnen Komponenten der Preform ermittelt. Dazu zählen maximal ertragbare Drücke von Kernmaterialien ebenso wie kritische Druckgefälle, die eine Zerrüttung von sensiblen Faserstrukturen bewirken können. Diese Werte können, wenn bekannt aus Datenblättern oder anderen, vorangegangenen Projekten abgeschätzt werden. Sonst sollten diese durch Experimente bestimmt werden. Sind die Einzelkomponenten der Preform eher teuer, ist es ratsam Probekörper eigens für die Bestimmung dieser Grenzdrücke herzustellen. Als letzte Möglichkeit steht nur die iterative Anpassung des gewählten Regeldrucks zur Auswahl. Es sind aber auch die Innendruckgrenzen von druckbeaufschlagten Elementen wie bspw. Injektions-schläuche zu bedenken. Der Regeldruck darf natürlich nur maximal den niedrigsten sicherheitsrelevanten Prozessdruck erreichen. Ein entsprechender Sicherheitsrahmen ist vorzusehen. Neben der Wahl der Höhe des Regeldrucks ist auch der Sensor für die Ist-Wertabfrage festzulegen. Es empfiehlt sich einen Sensor möglichst bauteilnahe, idealerweise einen Kavitätsinnendrucksensor zu wählen. Steht dieser nicht zur Verfügung, so sollte zumindest der Druck am Mischkopf als Regelgröße herangezogen werden.

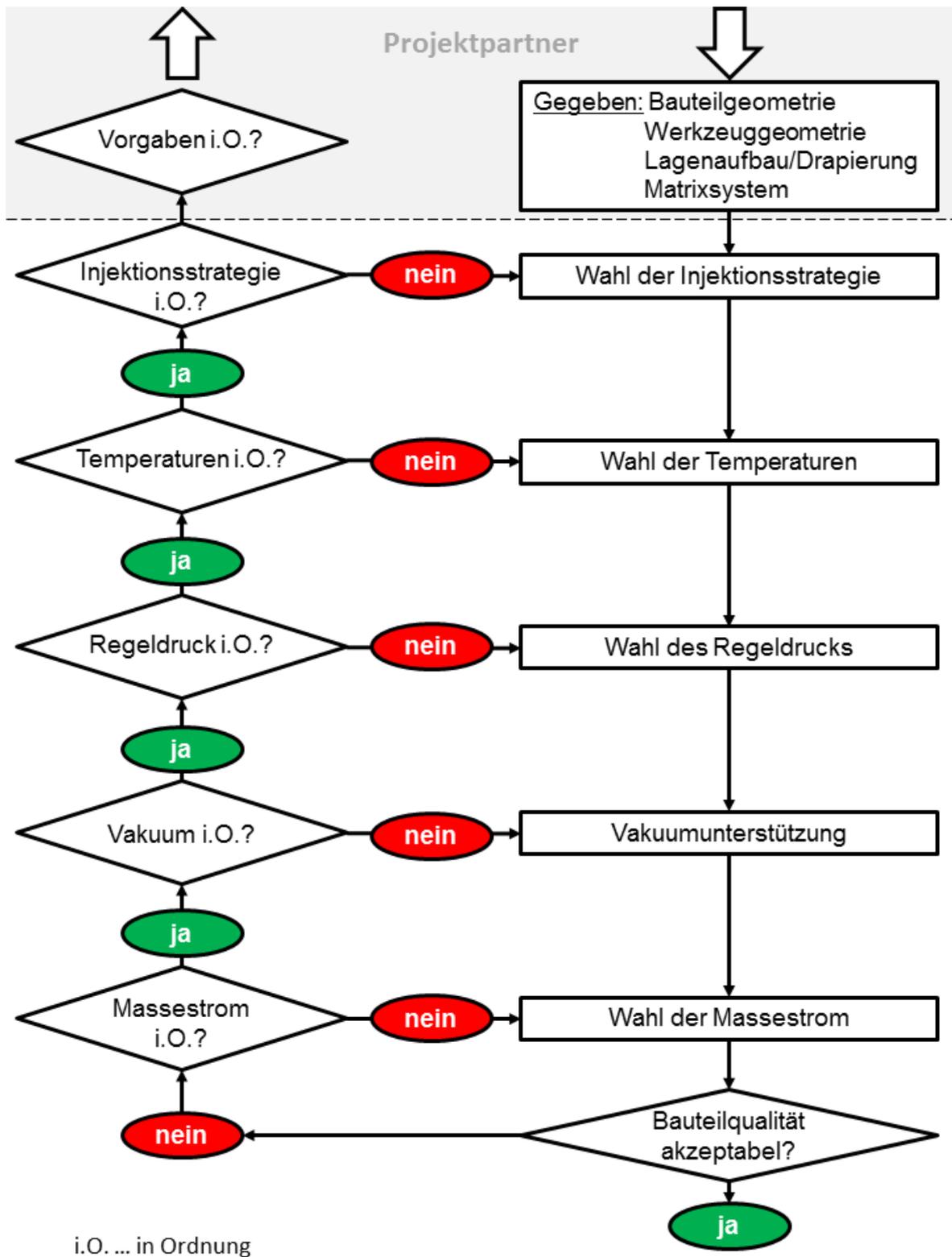


Abbildung 51: Flussdiagramm Ermittlung der Prozessparameter für RTM und VARTM.

Die Entscheidung für eine Vakuumunterstützung ist prinzipiell eine Verfahrensfrage. Soll ein reiner RTM-Prozess installiert werden, so ist diese Fragestellung klar negativ zu beantworten. Für einen VARTM-Prozess muss der Unterdruck an den Massestrom und die Harztemperatur angepasst werden. Da dies selten auf den ersten Versuch gelingt, empfiehlt es sich trotz der prinzipiellen Absicht zunächst auf eine Vakuumunterstützung zu verzichten.

Als letzter Parameter wird der Massestrom gewählt. Im durchgeführten Projekt hat der Massestrom den größten Einfluss auf die Bauteilqualität gebracht. Große Masseströme waren letztlich der Schlüssel zu hohen Bauteilqualitäten. Ein Projekt sollte generell jedoch zunächst mit niedrigen Masseströmen begonnen werden. Denn eine Verdoppelung des Massestroms bewirkt eine Halbierung der Füllzeit und somit auch der Zeit für das Maschinenhandling. Eine grobe Abschätzung der Füllzeit aus Massestrom und Kavitätvolumen ist hier ratsam.

Ist nach der ersten, getroffenen Parametereinstellung die Bauteilqualität akzeptabel so ist die Ermittlung der Parameter abgeschlossen. Ansonsten gelangt man in die Iterationsschleife. Grundlage der systematischen Parameterfindung ist immer die Variation einzelner Parameter.

Zunächst sollte der Massestrom variiert werden. Dabei ist es sinnvoll in mehreren Schritten zügig bis zum Maximalausstoß zu erhöhen. Ist die optimale Einstellung gefunden, wird die Wahl der Vakuumparameter unter die Lupe genommen. Fragestellungen sind dabei, ob bei dem gewählten Massestrom mit den gewünschten Vakuumparametern gearbeitet werden kann. Ggf. muss der Massestrom erneut angepasst werden um mit dem neuen Parameterset auf optimierte Ergebnisse zu kommen. Gleiches gilt im übertragenen Sinn für Regeldruck und Temperaturen. Bei diesen Iterationsschleifen ist stets auf das Zusammenspiel der Parameter zu achten. So kann bspw. der gewählte Massestrom \dot{m} mit der Temperatur T_{H1} sehr gute Ergebnisse liefern. Wird durch das Senken der Temperatur auf T_{H2} aber die Viskosität η derartig erhöht, dass frühzeitig der Regeldruck p_R erreicht wird, dann kann dies zu Bauteilen mit verringerter Qualität führen.

Die Prozessoptimierung ist eine sehr komplexe Problemstellung und erfordert einiges an Geduld und Prozessverständnis. Können trotz größter Anstrengungen

keine Parametereinstellungen gefunden werden, welche akzeptable Bauteilqualitäten liefern, so sollten die Vorgaben hinterfragt werden. Dabei gilt es jene Änderungen durchzuführen, die technisch sinnvoll erscheinen und dabei den geringsten Aufwand mit sich bringen. Bspw. ist der Wechsel des Matrixsystems verhältnismäßig einfach zu bewerkstelligen, während die Neukonstruktion des Werkzeugs kosten- und zeitintensiv ist.

6 ZUSAMMENFASSUNG

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde detailliert an den Harzinjektionsprozess herangeführt. Beginnend bei den Anforderungen an ein RTM-Werkzeug und die sich ableitenden Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien wurde die Prozesskette bis zur Bauteilentformung vollständig erläutert. Dies umfasste einen Überblick über technische Textilien und die Herstellung von Carbonfasern im Detail. Theoretisch wurden die gängigsten polymeren Matrixwerkstoffe und der Chemismus der verwendeten Materialklasse, der Epoxidharze, abgehandelt. Weitere Themenpunkte waren das Einlegen der Preform in die Werkzeugkavität und die anschließende Harzinjektion. Die Fachmeinung über die ablaufenden Prozesse in der Kavität von Beginn der Injektion bis zur Härtung wurde zusammengetragen und übersichtlich wiedergegeben.

Anschließend wurden die durchgeführten praktischen Versuche am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffe (LVV) an der Montanuniversität Leoben vorgestellt. Neben der vollständigen Aufzählung der eingesetzten Materialien wurde besonderes Augenmerk dabei auf die konkrete Versuchsdurchführung gelegt. Ziel war es die Vorgehensweise so klar und eindeutig wie möglich zu dokumentieren, um eine Basis für zukünftige Projekte zu bieten.

Im abschließenden Teil der Arbeit wurden die Ergebnisse der Versuche diskutiert und Zusammenhänge der einzelnen Prozessparameter dargestellt.

6.2 Schlussfolgerung

Die 2-Komponenten Kunstharzmisch- und Dosieranlage Typ Nodopur VS-2K bietet ein weites Spektrum an Parametereinstellungen für Harzinjektionsprozesse. Als besonders nützlich hat sich die Druckregelung erwiesen, erlaubt sie doch letztlich die Herstellung von Bauteilen, die dem Leichtbauanspruch genügen. Ausgeführt als Zahnradpumpenanlage ist klar die kontinuierliche, druckschwankungsfreie Förderung im Vordergrund. Außerdem erlauben die eingebauten 3-

Wegeventile in Verbindung mit den Rückstromschläuchen den Rezirkulationsbetrieb, der die Materialhomogenisierung (v.a. in Bezug auf Temperatur) erheblich verbessert. Nachteilig gegenüber Hubkolbenmaschinen kann sich die Anlage jedoch bei einer Prozessführung mit geringen bis nahezu keinen Massestrom, wie bspw. in Phasen ähnlich der Nachdruckphase im Spritzgussprozess, zeigen. Sollte eine solche Prozessphase durch bspw. großen Schwund erforderlich werden, so müsste eine entsprechende Adaptierung der Anlage durchgeführt werden. In Summe bietet die Anlage aber ein sehr zufriedenstellendes Gesamtpaket, dass durch einen ausgezeichneten Kundenservice abgerundet wird.

Der Harzinjektionsprozess ist ein komplexer Prozess mit starker Interaktion der einzelnen Parameter. Für die Bedienung von Großserien ist ein hoher Automatisierungsgrad erstrebenswert, da sowohl die Reproduzierbarkeit und die Produktivität dadurch gesteigert werden können. Eine wesentliche Schlüsselgröße für den Erfolg dieser Verfahrensklasse ist der Schritt hin zur „schlauchlosen Injektion“. Die direkte Anbindung des Mischkopfs an das Werkzeug ist noch nicht weit verbreitet, aber mit Sicherheit in Zukunft wohl nicht mehr wegzudenken.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, NY, 2007.
- [2] Reyne, M.: Verbundwerkstoff-Lösungen: Duroplaste und Thermoplaste, JEC Group Verlag, Paris, 2008.
- [3] Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften, 2. Aufl., Hanser Verlag, München [u.a.], 2006.
- [4] Neitzel, M., Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser Verlag, München, Wien, 2004.
- [5] Gebart, R.B., Strömbeck, A.L.: Principles of Liquid Composite Molding, in Processing of composites, Davé, R.S. (Hrsg.), Hanser Verlag, Munich, 2000.
- [6] Beresheim, G.: Thermoplast-Tapelegen: Ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung, in IVW-Schriftenreihe, 32, Neitzel, M. (Hrsg.), IVW Verlag, Kaiserslautern, 2002.
- [7] Kölzer, P.: Temperaturefassungssystem und Prozessregelung des laserunterstützten Wickelns und Tapelegens von endlos faserverstärkten thermoplastischen Verbundkunststoffen, in Berichte aus der Produktionstechnik, Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Schuh, G., Weck, M., Brecher, C., Schmitt, R. (Hrsg.), Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [8] Weimer, C., Preller, T., Mitschang, P., Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part II: holes, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (11), 2000, 1269–1277.
- [9] Mallick, P., Newman, S., Chapman, G.B.: Composite materials technology: Processes and properties, Hanser (Oxford University Press) Verlag, Munich [etc.], New York, 1990.
- [10] Rieber, G., Mitschang, P.: 2D Permeability changes due to stitching seams, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41 (1), 2010, 2–7.

- [11] N.N.: High Pressure Resin Transfer Molding: Schlüsselfertige Produktionslinie für die Großserienfertigung: FL_HP_RTM_LQ_DE.pdf, Dieffenbacher GmbH Maschinen- und Anlagenbau, Eppingen, 2013.
- [12] Luo, J., Liang, Z., Zhang, C., Wang, B.: Optimum tooling design for resin transfer molding with virtual manufacturing and artificial intelligence, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (6), 2001, 877–888.
- [13] Laurenzi, S., Marchetti, M.: Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications, in *Composites and Their Properties*, Hu, N. (Hrsg.), InTech Verlag, Rijeka, 2012.
- [14] Michaeli, W.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, Hanser Verlag, München [etc.], 1990.
- [15] Kendall, K., Rudd, C., Owen, M., Middleton, V.: Characterization of the resin transfer moulding process, *Composites Manufacturing* 3 (4), 1992, 235–249.
- [16] Atzeni, E., Calignano, F., Iuliano, L., Minetola, P., Salmi, A., Bassoli, E., Dentì, L., Gatto, A.: Thermoplastic Resin Transfer Moulding in a rapid manufactured mould, in *Innovative developments in virtual and physical prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, Bártolo, P.J., Soares de Lemos, A.C. (Hrsg.), Leiria, 2012.
- [17] Henning, F., Drechsler, K., Chatzigeorgiou, L.: Faserverstärkte Kunststoffe, in *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Henning, F., Moeller, E. (Hrsg.), Hanser Verlag, München, 2011.
- [18] Johnson, D.J.: High-tech Fibres for Technical Textiles, *Journal of the Textile Institute* 94 (3-4), 2003, 3–25.
- [19] Stankovich, S., Dikin, D.A., Dommett, G.H.B., Kohlhaas, K.M., Zimney, E.J., Stach, E.A., Piner, R.D., Nguyen, S.T., Ruoff, R.S.: Graphene-based composite materials, *Nature* 442 (7100), 2006, 282–286.
- [20] Rahaman, M., Ismail, A., Mustafa, A.: A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber, *Polymer Degradation and Stability* 92 (8), 2007, 1421–1432.

- [21] Qin, X., Lu, Y., Xiao, H., Wen, Y., Yu, T.: A comparison of the effect of graphitization on microstructures and properties of polyacrylonitrile and mesophase pitch-based carbon fibers, *Carbon* 50 (12), 2012, 4459–4469.
- [22] Witten, E. Dr., Jahn, B., Karl, D.: *Composites-Marktbericht 2012: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen*, Frankfurt, 2012.
- [23] Horrocks, A.R., Anand, S.: *Technical textiles*, Woodhead Verlag, Cambridge, 1999.
- [24] Ehrenstein, G.W.: *Polymer Werkstoffe: Struktur Eigenschaften Anwendung*, 3. Aufl., Hanser Verlag, München, 2011.
- [25] N.N.: *Katalog Lange+Ritter 2013 UP/PUR Polyesterharze*, Gerlingen, 2013.
- [26] N.N.: *Serientaugliche Fertigung von Composite-Blattfedern*, Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, 2013.
- [27] Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T.: *DOMININGHAUS - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 8. Aufl., Springer Verlag, Dordrecht, 2011.
- [28] Kaiser, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 3. Aufl., Hanser Verlag, München, 2011.
- [29] Kraft, A.: *Flowstop im Vergleich zu herkömmlichen Formanschlüssen*, Ing.Büro Tartler GmbH, Michelstadt, 2013.
- [30] N.N.: *Flowstop, self sealing mould adapter*, URL: <http://www.tartler.com/shop/> (abgerufen am 19. September 2013).
- [31] Patentanmeldung: WO2006069849 (A1): *Mischkopf mit Dichtmanschette*; Krauss Maffei Kunststofftech [DE]; Kern Hans Juergen [DE]; Brunner Robert [DE], Anmeldedatum 17.11.2005.
- [32] Bickerton, S., Sozer, E., Šimáček, P., Advani, S.: *Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (5), 2000, 439–458.

- [33] Shojaei, A., Ghaffarian, S., Karimian, S.: Modeling and Simulation Approaches in the Resin Transfer Molding Process: A Review, *Polymer Composites* 24 (4), 2003, 525–544.
- [34] Bickerton, S.: Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes, *Composites Science and Technology* 59 (15), 1999, 2215–2229.
- [35] Groessing, H., Wolfahrt, M., Müller, A., Schledjewski, R.: Comparison of permeability measurements of several fibre textiles using different measurement methods, in *15th European Conference on Composite Materials: Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials*, Quaresimin, M. (Hrsg.), Venedig, 2012.
- [36] Grujicic, M., Chittajallu, K.M., Walsh, S.: Effect of shear, compaction and nesting on permeability of the orthogonal plain-weave fabric preforms, *Materials Chemistry and Physics* 86 (2-3), 2004, 358–369.
- [37] Demaría, C., Ruiz, E., Trochu, F.: In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part II: Prediction model and numerical simulations, *Polym. Compos.* 28 (6), 2007, 812–827.
- [38] Louis, M., Huber, U.: Investigation of shearing effects on the permeability of woven fabrics and implementation into LCM simulation, *Composites Science and Technology* 63 (14), 2003, 2081–2088.
- [39] Arnold, M., Cojutti, M., Mitschang, P.: Influence of the shearing of textiles on the In-Plane Permeability, in *19th International Conference on Composite Materials: Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials*, Hubert, P., Hoa, S.V. (Hrsg.), Montreal, 2013.
- [40] N.N.: Brochure, Application News, Engines: Onlinekatalog, Winterthur, 2013.
- [41] Dunkers, J.P., Flynn, K.M., Parnas, R.S.: A mid-infrared attenuated total internal reflection cure sensor for control of resin transfer moulding of a pre-ceramic polymer, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (2), 1997, 163–170.

- [42] Potluri, P., Sagar, T.V.: Compaction modelling of textile preforms for composite structures, *Composite Structures* 86 (1-3), 2008, 177–185.
- [43] EPIKOTE Resin MGS® RIMR135: Materialdatenblatt, MOMENTIVE Specialty Chemicals. D-73730 Esslingen am Neckar, 2010.

8 VERWENDETE SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

Symbol	Erläuterung
# ↑	Gewebebezeichnung, schweres 2-2 Köper
# ↓	Gewebebezeichnung, leichtes 2-2 Köper
≡ ±	Gelegebezeichnung, ±45° NCF
≡ 0/90	Gelegebezeichnung, 0°/90° NCF
\dot{m}	Massestrom
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Machining
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
DB	Direktbeflochten
EP	Epoxidharz
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FS	Geflechtschlauch
K	Permeabilitätstensor
K_{xx}	Eintrag des Permeabilitätstensors in x-Richtung
K_{xy}	Nebendiagonaleintrag des Permeabilitätstensor
K_{yx}	Nebendiagonaleintrag des Permeabilitätstensor
K_{yy}	Eintrag des Permeabilitätstensors in y-Richtung
LVV	Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffe
m_{Ges}	Gesamtschussgewicht
m_{Harz}	Harzgewichtanteil
MPP	Mesophasenpech
MV	Mischverhältnis
p	Druck
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
p_{inj}	Injektionsdruck
p_{max}	Maximalertragbarer Druck des Schaumkerns
p_{MK}	Mischkopfdruck
PPTA	Polyphenylenterephthal-amid
p_{R}	Regeldruck
PUR	Polyurethanharz
p_{v}	Unterdruck

Symbol	Erläuterung
RTM	Resin Transfer Moulding
S-RIM	Structural Reaction Injection Moulding
T_H	Harztemperatur
T_{H1}	Harztemperatur, höheres Temperaturniveau
T_{H2}	Harztemperatur, niedrigeres Temperaturniveau
T_W	Werkzeugtemperatur
UP	Ungesättigte Polyesterharz
v	Fließgeschwindigkeit
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding
VE	Vinyesterharz
v_x	Fließgeschwindigkeit in x-Richtung
v_y	Fließgeschwindigkeit in y-Richtung
η	Viskosität

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Schematischer Ablauf der Harzinjektion nach [4].....	4
Abbildung 2:	Darstellung eines der hergestellten Bauteile.....	6
Abbildung 3:	Chemische Struktur von Polyacrylnitril [20].....	16
Abbildung 4:	Stabilisierung des PAN-Precursors [20].....	17
Abbildung 5:	Prognose der Entwicklung des Carbonfasermarktes. Erstellt im Oktober 2012 durch Carbon Composites e.V., Darstellung nach [22].	19
Abbildung 6:	Chemismus der Epoxidharzherstellung [28].....	28
Abbildung 7:	Reaktion eines Epoxidharzes mit einem Diaminhärter [3, 28].....	29
Abbildung 8:	Adaptierte Darstellung der Flow-Stop Anbindung mittels Adapter von [29, 30].....	32
Abbildung 9:	Injektionsstrategien für die Harzinjektionstechnik.	35
Abbildung 10:	Bauteilgeometrie.	44
Abbildung 11:	Aufgespannte Werkzeugunterform mit Kavität, Zentrierkoni und Dichtring.....	45
Abbildung 12:	Kernauflage und Harzverteilerkanal in der Unterform.	46
Abbildung 13:	Flächige Textilhalbzeuge für die Drapierstudie.	48
Abbildung 14:	Geflechschlauchhalbzeug D144/11 von Eurocarbon.	49
Abbildung 15:	Direktes Beflechten des Schaumkerns mit einer Radialflechtmaschine.	50
Abbildung 16:	2-Komponenten Kunstharzdosier- und mischanlage Nodopur VS-2K mit rückwärtiger Maschinenanlage und frontseitiger Bedienelemente.	52
Abbildung 17:	Mit Spannpratzen an den Aufspannplatten aufgespannte Werkzeughälften.	55
Abbildung 18:	Positionierung des Schaumkerns durch Abschleifen in mehreren Schritten: Foto 1-3: Radien anschleifen, Foto 4-6: Kanten brechen und Foto 7-9: Zentrischer Sitz durch Kürzen des Schaumkerns.	56

Abbildung 19:	Drapieren der flächigen Faserstruktur.....	57
Abbildung 20:	Arbeitsabfolge beim manuellen Drapieren mit einem Geflechthalbzeug: Foto 1-3: Zuschneiden der Geflechschläuche, Foto 4-7: Zuschnitthandling, Foto 8: Aufbringen des Sprühklebers, Foto 9-10: Drapieren, Foto 11: Randbeschnitt und Foto 12: Fixierung der Textilstruktur.	59
Abbildung 21:	Die Materialtöpfe A und B mit ihren wesentlichen Aufbauten.....	60
Abbildung 22:	Bedienelemente der Harzinjektionsanlage.....	62
Abbildung 23:	Frontansicht des Mischkopfes mit der Mischerantriebswelle, dem Testvorsatz und den Ventilen und Zuleitungen für Harz- und Härterkomponente sowie Spülluft.	63
Abbildung 24:	Vorbereitung des Mischkopfes.....	64
Abbildung 25:	Schematischer Aufbau der Injektionsleitung.	66
Abbildung 26:	Darstellung der einzelnen Bereiche nach dem Bewertungsschema.....	72
Abbildung 27:	Beispielbewertungen des Bereichs „Angussverteiler“.....	74
Abbildung 28:	Beispielbewertungen des Bereichs „Abguss“. Die Bereiche des Bauteils, welche nicht relevant für diese Teilbewertung sind, wurden ausgegraut.....	75
Abbildung 29:	Beispielbewertung des Bereichs „Oberseite“.....	76
Abbildung 30:	Beispielbewertung des Bereichs „Unterseite“.....	77
Abbildung 31:	Beispielbewertung des Bereichs „Trennebene“.....	78
Abbildung 32:	Beispielbewertung der Teilbewertung „Risse und Ausbrüche“....	79
Abbildung 33:	Beispielbewertung der Teilbewertung „Fiber-wash out“.....	80
Abbildung 34:	Beispielbewertung der Teilbewertung „Entformung“.....	81
Abbildung 35:	Beispielbewertung der Teilbewertung „Faserverzug“.....	82
Abbildung 36:	Abstehen der Faserenden bei Drapierung von # ↑ um Kanten.	84
Abbildung 37:	Bereich des Doppelkegels, drapiert mit # ↓.....	85
Abbildung 38:	Bauteil mit entformtem Harzfilm als Zeichen der Trenngüte. Zur besseren Visualisierung wurde ein blauer Hintergrund gewählt.....	88

Abbildung 39:	Schnittansicht einer aufschwimmenden Textilstruktur ($\cong \pm$) mit Luftblase und harzgetränktem Schaumkern.....	89
Abbildung 40:	Druckverläufe bei verschiedenen Masseströmen über dem Gesamtschussgewicht. Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.	91
Abbildung 41:	Druckverläufe bei verschiedenen Masseströmen über der Versuchszeit. Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.	92
Abbildung 42:	Druckverläufe über der Prozesszeit bei einem Massestrom von 0,6 kg/min bis zur jeweiligen Regeldruckgrenze p_R . Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.	94
Abbildung 43:	Gesamtschussgewicht über der Prozesszeit bei einem Massestrom von 0,6 kg/min bis zur jeweiligen Regeldruckgrenze p_R . Die Versuche wurden ohne Vakuumunterstützung durchgeführt.	95
Abbildung 44:	Druckverlauf im Schaumkern bei Harzpenetration.....	97
Abbildung 45:	Druckverläufe mit und ohne Vakuumunterstützung.	100
Abbildung 46:	Gesamtschussgewicht über der Prozesszeit mit und ohne Vakuumunterstützung.	100
Abbildung 47:	Darstellung der Beziehung von Unterdruck und Mischungsqualität.	102
Abbildung 48:	Einfluss der Harztemperatur auf den Mischkopfdruck.....	103
Abbildung 49:	Lernkurve „Bauteilqualität“: Darstellung der Bauteilqualität über der laufenden Versuchsnummer.	106
Abbildung 50:	Bauteilqualität über dem Versuchsdatum. Nach den Unterbrechungen ist ein gesenktes Qualitätsniveau sichtbar.....	107
Abbildung 51:	Flussdiagramm Ermittlung der Prozessparameter für RTM und VARTM.	112

10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Aufgaben eines RTM – Werkzeuges.....	7
Tabelle 2: Übersicht der verschiedenen Werkzeugmaterialien [5, 9].	12
Tabelle 3: Textile Preformtechniken und ihre Produkte [1, 4, 23].....	23
Tabelle 4: Zusammenfassung der flächigen Textilien.	47
Tabelle 5: Parameter für die Injektionsversuche.	69
Tabelle 6: Bewertungsschema für die hergestellten Bauteile.....	72
Tabelle 7: Vergleich der flächigen Textilien.....	86
Tabelle 8: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zur Druckregelung.	98
Tabelle 9: Zwischenergebnis der Bauteilbewertung.....	104
Tabelle 10:Endergebnis der Bauteilbewertung.....	107

11 ANHANG

11.1 Checkliste – „RTM – Prozessroutine ‚Pokal‘ “

I. Hochfahren der Presse

- Sichtkontrolle um die Maschine
- Sichtkontrolle des Pressenraums: Fremdgegenstände? Gefahrenquellen?
- Hauptschalter Presse einschalten
- Hochfahren der Steuerung der Presse

II. Vorbereitung Preform

- Kerne auf Maß schleifen: längs und Kanten brechen
- Gewicht des Schaumkerns ermitteln
- Drapierung, wenn nicht vorhanden applizieren
- Faserstruktur mittels Tape (blau) fixieren
- Abwägen der hergestellten Preform

III. Vorbereitung Werkzeug

- Presse öffnen
- Werkzeugtemperatur kontrollieren: Unter Umständen Verbrennungsgefahr
- Werkzeug reinigen falls notwendig
- Eintrennen von Kavität und Trennfläche
- Gewinde der Doppelnippel mit Teflonband abdecken
- Doppelnippel in die Anguss- und Abgussbohrungen einschrauben
- Länge der An-bzw. Abgussbohrungen dokumentieren (kann für das Ausbohren nötig werden)
- Angussschläuche (werkzeugseitig) ablängen (2x 8mm PA-Schlauch, 90 mm lang)
- Angussschläuche einführen und entsprechen der Werkzeugform einpassen (anspitzen)

- Angussschläuche herausnehmen
- Y-Verteiler fließrichtungsgerecht mit den Angussschläuchen verbinden
- Schlauchabschnitt 8mm PA auf das freie Ende des Y-Verteiler auf-schieben (Aufdickung)
- Mit Schlauchschellen die Verbindung fixieren
- Angussschläuche eintrennen und mit PTFE-Spray besprühen
- Überwurfmutter und Schneidring auf die Angussschläuche schieben
- Erneut in das Werkzeug einführen, bündig mit der Kavität positionieren und mittels Schneidringverschraubung im Werkzeug fixieren, Tacky Ta-pe für das Abdichten verwenden
- Vorgang für Abgussschlauch wiederholen (1 x 8 mm PA-Schlauch, 1900 mm lang)
- Abgussschlauch auf die Bedienerseite durchführen
- Angussschlauch (dosieranlagenseitig) ablängen (1 x 10 mm PE, 1900 mm lang)
- Schlauchschelle aufstecken
- Auf das Ende des Y-Verteilers mit der 8 mm Aufdickung aufschieben
- Schlauchschelle festziehen
- Falls VARTM: Vakuumpumpe inkl. Harzfalle an der Steigleitung an-schließen und mit Schlauchschelle fixieren
- Temperaturprofil wählen
- Heizung einschalten
- Wenn Werkzeug offen ->Schließen, dazu:
 - ▷ Kontrolle des Pressenraums
 - ▷ Kontrolle der Werkzeuggrennebene: Fremdkörper?
 - ▷ Kontrolle des Pressprogramms: Handbetrieb oder Einrichtbetrieb?, Schließgeschwindigkeiten, Schließkräfte, Formschutz,
 - ▷ Lichtschranken quittieren: Bedienerseitig, Rückseitigseitig
 - ▷ Pumpenmotor an
 - ▷ Aufmerksam die Presse schließen: Wege, Werkzeugversatz, etc.
- Temperaturentwicklung zeitweise kontrollieren

IV. Vorbereitung Injektionsanlage

- In die gewünschten Position bringen
- Erdungskabel erden
- Stromversorgung herstellen
- Druckluft anschließen
- Behälter für Ausschuss bereitstellen
- Reinigungsmaterialien (Papiertücher, Seifenlauge, etc.) vorbereiten
- USB Stick einstecken
- Hauptschalter ein
- Infomeldungen lesen und mit Reset quittieren
- Projektdaten kontrollieren
 - ▷ Materialien (Dichte, etc.)
 - ▷ Temperaturen
 - ▷ Drücke
 - ▷ Massestrom
 - ▷ Uhrzeit abgleichen mit anderen Messgeräten, Presse
- Protokollierung: EIN!!!
- Bei Materialwechsel: Bechertest vorsehen!!!
 - ▷ Material aus den Vorratsbehältern auslassen (Reine Komponenten können in Vorratsbehälter aufgefangen werden)
 - ▷ Positivem Bechertest, ohne Spülen der Anlage neue Komponente einführen:
 - ▷ Geringe Menge an Neumaterial einfüllen
 - ▷ Rezirkulation einschalten und Leitungen mit neuer Komponente spülen bis nur neue Komponente aus dem Rückstromschlauch ankommt.
 - ▷ Gemisch entsorgen
 - ▷ Neue Komponente entspr. Produktionsabsicht einfüllen
 - ▷ Auslitern
- Materialtemperierung rechtzeitig starten
- Bei Aufheizvorgängen mit Rührwerk oder Rezirkulation arbeiten

- Entgasen nach Materialwechsel bzw. nach Nachfüllen
- Kontrolle des Mischungsverhältnisses: (täglich vor Produktion durchführen)
 - ▷ Menü MV (--> Mischungsverhältnis)
 - ▷ Motor der Mischkopfnadel !!!AUS!!! (Kippschalter)
 - ▷ Am Injektionskopf den Testvorsatz mit separater Materialführung montieren, dabei Führungsstift und Dichtflächen beachten
 - ▷ Injektionsleitung im Handbetrieb ausspülen (Luftblasen, Materialwechsel, etc.) reine Komponenten können in Vorratsbehälter aufgefangen werden.
 - ▷ Schussgewicht für den Mischungsverhältnistest einstellen: bspw. 0,2 kg
 - ▷ 2 Becher wiegen (Waage tarieren) & unterhalten
 - ▷ Injektion starten
 - ▷ Komponentengewicht bestimmen und Ergebnis entsprechend eingeben
 - ▷ 3x wiederholen
- Im Handbetrieb die Leitungen druckfrei machen durch Öffnen der Ventile am Injektionskopf
- Schließen der Ventile
- Beide Düsen von überschüssigen Harz befreien
- Überwurfmutter (Testvorsatz) lösen und zügig abziehen, dabei die Düse gegen den Mischkopf halten
- Düse abnehmen und zusammen mit dem Verschraubungsring reinigen
- Düsen spitze mit Statik/Dynamikmischer ansetzen, Mischer in Nadel einhängen
- Berstschutzrohr überschieben und verschrauben
- Drehzahlmesser positionieren

V. Vorbereitung Injektion

- Presse öffnen
- PREFORM EINLEGEN!!!
 - ▷ Gewicht bestimmt?
 - ▷ Vorsichtiges Einlegen der Preform
 - ▷ Seitliches Spiel kontrollieren

- ▷ Faserverzug mitdokumentieren
- ▷ Positionskontrolle der Preform
- Trennfläche der beiden Werkzeugformen auf Fremdgegenstände kontrollieren (z.B.: Fasern)
- Pressenraum auf Fremdgegenstände kontrollieren
- Presse schließen
- ▷ Kontrolle der Schließkraft ($F_s = 400 \text{ kN}$)
- ▷ Aufmerksames Schließen der Werkzeughälften (Geräusche, früher Schließkraftanstieg, ...)
- Tape oder Klammern für das Abklemmen bereitlegen
- Mischkopfmotor AUS!
- Düse des Injektionskopfes nach oben gerichtet mit minimal Ausstoß entlüften (Ausschussbehälter!)
- Wenn blasenfreie Förderung, dann Mischkopfmotor EIN!
- Mischqualität kontrollieren, wenn zufriedenstellend, dann Förderung stoppen
- Mischkopf an die Angussleitung anschließen
- Angussleitung (injektionsanlagenseitig) entlüften und auf Blasenfreiheit achten
- Angussleitung (injektionsanlagenseitig) am Y-Verteiler anschließen
- Protokollierung an der Injektionsanlage gestartet?
- Aufzeichnung evtl. Peripheriegeräte gestartet?
- Volumenmessung nullen
- Prozessparameter wählen (Ausstoßmenge und Regeldruck)
- Bei VARTM: Angusschlauch kurz hinter Fließfront knicken
- Bei VARTM: Vakuumpumpe einschalten und Vakuum kontrollieren

VI. Injektion

- Injektion und Zeitnehmung starten
- Zeitlichen Referenzpunkt dokumentieren: z.B.: Eintritt ins Werkzeug
- Druckverlauf beobachten (Druckanstieg kritisch?)
- Auf Fehlermeldungen achten

- Auf Leckage achten
- Auf Schussgewicht achten
- Austritt aus dem Werkzeug mitdokumentieren, Vakuumpumpe ggf. ausschalten
- Spülen vorgesehen?
- Auf den Abguss achten und rechtzeitig die Injektion beenden
- Abgussleitung 2 x (2 Knicke) hinter der Fließfront abklemmen (Zeit notieren)
- Nachdruck vorgesehen?
- Nach Klemmen der Abgussleitung, Abgussleitung klemmen und gleichzeitig Injektion stoppen

VII. Nachbereitung Injektionsanlage

- Geklemmten Abguss Schlauch vom Injektionskopf lösen
- Harz aus dem Schlauch bis zur Klemmstelle auslaufen lassen
- Abguss Schlauch hochlagern (über Werkzeugniveau), gegen Leckage sichern
- Mischkopf: Schlauchnippel lösen, auf auslaufendes Harz achten
- Schlauchnippel reinigen
- Berstschutzrohr abnehmen, auf Verunreinigung kontrollieren und evtl. reinigen
- Mischerhülse gegen den Mischkopf drücken (damit kein Material austreten kann) und Überwurfmutter lösen
- Überwurfmutter zügig abziehen, auf Verunreinigung kontrollieren und evtl. reinigen
- Mischerhülse in den Ausschussbehälter auslaufen lassen
- Statik/Dynamikmischer aushängen
- Mischerhülse samt Statik/Dynamikmischer entsorgen
- Mischkopf reinigen und einfetten!!!
- Mischkopf verschließen
- Abschließend alle Mischkopfkomponenten nochmals auf Harzverunreinigung prüfen
- Anlage herunterfahren

VIII. Entformung des Bauteils

- Sichtkontrolle um die Presse, hochgelagerter Angusschlauch?
- Sichtkontrolle des Pressenraums: Fremdgegenstände? Gefahrenquellen?
- Presse öffnen
- Heizung aus, auf Temperatur achten: Verbrennungsgefahr?
- Schneidringverschraubungen lösen
- Schläuche herausziehen oder falls nötig abschneiden und ausbohren
- Mit kurzem 6 mm Bohrer Anguss vorbohren
- Mit langem 6 mm Spiralbohrer Anguss nachbohren (Achtung auf Länge!)
- Mit langem 8 mm Bohrer ausbohren (Achtung auf Länge!)
- Schädigungsfreie Entformung des Bauteils versuchen (evtl. mit Druckluft möglich)
- Zuhilfenahme einer Entformungsvorrichtung

IX. Nachbereitung des Werkzeugs

- Vorhandene Matrixreste mit Holzwerkzeugen und Mouldcleaner entfernen
 - ▷ AUSREICHENDE BELÜFTUNG DES ARBEITSPLATZES
- Reinigung der Dichtung und Trennflächen
- Kontrolle der Innengewinde
- Ausblasen der Form mit Druckluft
- Versiegelung der Form mit Mouldresealer
- Nach erfolgter Reinigung, Kontrolle auf Fremdgegenstände
- Presse schließen
- Pressensteuerung herunterfahren
- Pressenhauptschalter AUS