

# **„Entwicklung eines Serienfertigungskonzepts für GFK- Schlaufen mit den Anforderungen an hohe Stückzahlen in der Bauindustrie“**

## **Masterarbeit**

verfasst von

**Anton Dietrich**

erstellt am

**Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen**

**Department Kunststofftechnik**

**Montanuniversität Leoben**



Betreuung: Dipl.-Ing. Martin Fritz

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

Leoben, 11.02.2013

---

### EIDESSTÄTLICHE 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.

### AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

### Danksagung

Ich bedanke mich an dieser Stelle beim Vorstand des Institutes für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen an der Montanuniversität Leoben, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. -Ing Ralf Schledjewski für die Möglichkeit der Durchführung und der Begutachtung der Diplomarbeit, sowie für die fachliche Unterstützung.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Martin Fritz, der mir die Arbeit an diesem Thema ermöglichte. Als Betreuer der Firma 4a engineering GmbH lenkte er die Arbeit und war mein Ansprechpartner bei auftretenden Problemen und Entscheidungen.

## Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Thema Serienfertigung einer glasfaserverstärkten Kunststoff-Schlaufe (GFK-Schlaufe). Für die Entwicklung des Serienfertigungskonzeptes stehen dabei vor allem wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund. Das Bauteil GFK-Schlaufe wird in der Bauindustrie als Betonarmierung als tragender Anschluss im Übergang der Innenbetondecke zum Balkonbetonelement eingesetzt. Eine hohe statische Festigkeit und Bauteilsteifigkeit sowie chemische Beständigkeit sind Voraussetzung für den Herstellungsprozess. Durch ein Technologiescreening wird im ersten Schritt ein geeigneter Serienfertigungsprozess, die Wickeltechnik, ausgewählt. Die Konstruktion und der Bau einer Prototypenanlage ermöglichen die seriennahe Fertigung von GFK-Schlaufen für Material- und Bauteilversuche.

Darauf aufbauend wird ein Konzept für einen Serienfertigungsprozess erstellt. Die Ausarbeitung der einzelnen Prozessschritte und die Visualisierung des Materialflusses ermöglichen eine Abschätzung der Zykluszeiten. Limitierender Engpass der Fertigungslinie ist vor allem der Aushärte- und Kühlprozess. Dieser benötigt rund 88 % der gesamten Zykluszeit.

## Abstract

This diploma thesis deals with series production of a glassfiber reinforced plastic (GFRP) loop. The focus concentrates mainly on economical aspects and a series production process for high volume production. The GFRP-loop is used in the building industry as concrete reinforcement. Requirements for the manufacturing process are a high static strength, high material stiffness and a good chemical durability especially against alkaline mediums. The first step is to run a technological screening in order to determine an appropriate series-production process, in this case the winding technique. For material and component tests GFRP-loops, which are produced with a close-to-production process, are needed. Therefore a prototype plant is being designed and constructed.

Based on this, a concept for a series-production process is created. The development of single process steps and the visualisation of the flow of materials allow a calculation of cycle times. The limiting problem of the production-line is the curing- and cooling process, which requires about 88 % of the entire cycle time.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Bauteilanforderungen .....	2
1.1.1	Bauteilabmessungen .....	3
1.1.2	Mechanische Anforderungen.....	3
1.1.3	Thermische und chemische Beständigkeit .....	4
1.1.4	Wirtschaftliche Anforderungen .....	5
1.1.5	Sonstige Anforderungen.....	5
1.2	Eingesetzter Faser- und Matrixwerkstoff .....	5
1.3	Zielsetzung .....	8
2	Theoretische Grundlagen .....	9
2.1	Viskosität .....	9
2.2	Permeabilität .....	11
2.3	Faserimprägnierung .....	12
2.4	Vernetzungsreaktion.....	12
2.5	Verarbeitungsverfahren .....	14
2.5.1	Prepreg/Autoklav Technologie .....	14
2.5.2	Wickeltechnik.....	18
2.5.3	Pultrusion .....	26
3	Technologiescreening und Bewertung.....	32
3.1	Übersicht über in Frage kommende Herstellungsprozesse .....	33
3.1.1	Prepreg/Autoklav Technologie .....	33
3.1.2	Wickeltechnik.....	34
3.1.3	Pultrusion .....	35
3.2	Bewertung der aufgelisteten Verfahren und Auswahl des geeigneten Herstellungsprozesses .....	36

---

4	Herstellung eines seriennah gefertigten Prototypen .....	39
4.1	Maschinenbestandteile einer Wickelanlage und deren Aufgaben .....	39
4.2	Konstruktion und Anlagenbau .....	41
4.3	Prototypenproduktion .....	51
4.4	Maximale Prozessgeschwindigkeit und Beschreibung der Auswirkungen auf die Qualität des Bauteils .....	55
5	Ergebnisse .....	59
5.1	Serienfertigungskonzept und Abschätzung der Zykluszeit .....	59
5.2	Werkzeugkonzept .....	68
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	71
7	Literatur .....	73
8	Verwendete Symbole und Abkürzungen .....	76
8.1	Abkürzungen .....	76
8.2	Symbole .....	76
9	Abbildungsverzeichnis .....	79
10	Tabellenverzeichnis .....	82

## 1 Einleitung

Durch die hervorragenden Materialeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen und die damit verbundenen neuen Gestaltungsmöglichkeiten im Bereich der Produktentwicklung finden Glas- und Carbonfaserkunststoffverbunde immer mehr Anwendungsbereiche auch außerhalb des Flugzeugbaus und der Sportindustrie. Neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften ist jedoch eine breite Anwendung auch sehr stark von den wirtschaftlichen Aspekten des Produktes abhängig [1].

Glasfaserkunststoffverbunde werden aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und den im Vergleich zu Carbonfaser geringen Materialkosten schon in vielen Wirtschaftsbereichen eingesetzt. Im Bauwesen werden sie seit rund vierzig Jahren bspw. als kreiszylindrische Lagersilos oder als Rohre mit großem Durchmesser eingesetzt. Die Bauteile werden dabei hauptsächlich im Schleuderverfahren oder mittels Wickeltechnik hergestellt [2].

Die Firma AVI entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Betonbau an der Technischen Universität Graz ein neues Konzept für Thermokörbe, in dem Stahlbewehrungen durch Bauteile aus Faserkunststoffverbunden und Betonelementen ersetzt werden sollen. Unter „Thermokorb“ (Abb. 1.1) versteht man ein Bauelement, das ein auskragendes Bauelement (z.B. Balkon) mit der Innendecke eines Gebäudes verbindet.

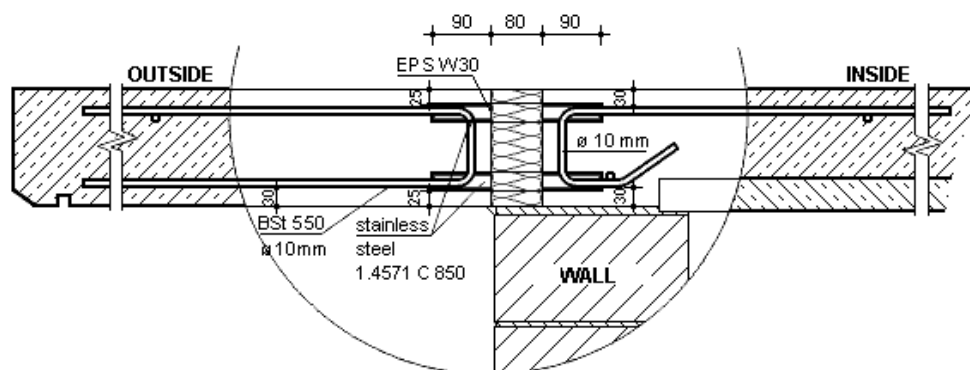


Abb. 1.1: Thermokorb [3].



Die beiden Elemente sind dabei thermisch durch eine Isolationsschicht im Bereich der Gebäudewand getrennt. Um die Tragfähigkeit des Bauelements gewährleisten zu können, werden die beiden Deckenelemente mit der GFK-Schlaufe zur Aufnahme von Zuglasten und einem hochfesten Betonelement zur Aufnahme von Schub und Drucklasten (Abb. 1.2) verbunden.

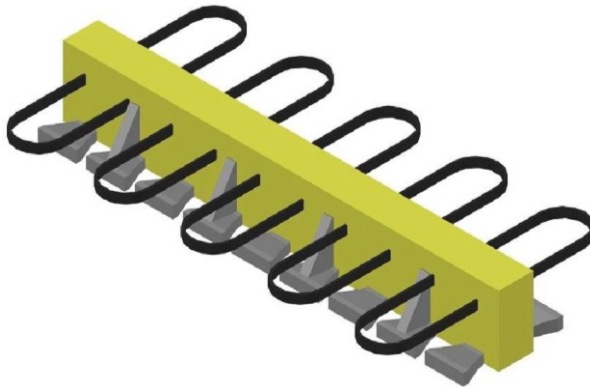


Abb. 1.2: Entwickeltes Konzept für den Thermokorb bestehend aus GFK-Schlaufe (schwarz), Betonkeilen (grau) und Isolation (gelb) [3].

Da Beton sehr hohe Drucklasten aber nur geringe Zuglasten aufnehmen kann, sind sowohl die Innendecke, als auch die Balkondecke mit Stahlarmierungen versehen. Die GFK-Schlaufe und die Stahlarmierungen der beiden Deckenelemente überlappen im verbauten Zustand. Die Lastübertragung erfolgt über Schubkräfte durch den sich dazwischen befindlichen Beton. Dabei soll eine GFK-Schlaufe die Zuglasten im Thermokorb aufnehmen. Die dazu benötigte Materialauswahl, Geometrieoptimierung und der Prototypenbau wird von der Firma 4a engineering GmbH durchgeführt.

## 1.1 Bauteilanforderungen

Die von der Firma AVI und dem Institut für Betonbau definierten Bauteilanforderungen zeigen zum einen die mechanischen und thermischen Anforderungen an die GFK-Schlaufe und zum anderen die wirtschaftlichen Anforderungen an den Fertigungsprozess. Die Bauteilanforderungen dienen als Grundlage für die Materialauswahl, die Berechnung des erforderlichen Bauteilquerschnitts und die Wahl des geeigneten Fertigungsprozesses.

### 1.1.1 Bauteilabmessungen

Die Mindestabmessungen der GFK-Schlaufe sind in Abb. 1.3 dargestellt und resultieren aus der Gesamtgeometrie des Thermokorbes. Dabei beschreibt  $H$  die Schlaufenhöhe (25 mm),  $B$  die Schlaufenbreite (100 mm),  $L$  die Gesamtlänge der Schlaufe (400 mm) und  $t$  die Wandstärke der Schlaufe (5-10 mm).

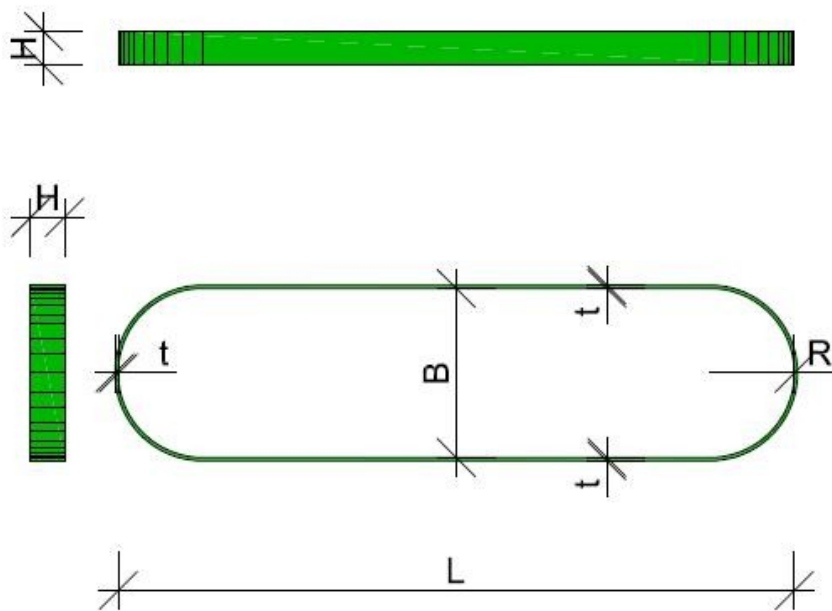


Abb. 1.3: Geometrie der GFK-Schlaufe [4].

### 1.1.2 Mechanische Anforderungen

Die mechanischen Anforderungen an das Bauteil werden von der TU Graz berechnet und der Firma 4a engineering GmbH zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten:

- Gesicherte Bemessungslast/Schlaufe (Bauteilfestigkeit): min. 125 kN
- Dehnsteifigkeit EA: min. 15.000 kN
- Elastizitätsmodul des Werkstoffes: min. 50.000 MPa

Die mechanischen Anforderungen beziehen sich dabei auf die Hauptbelastungsrichtung (Umfangsrichtung) des Bauteils sowie auf die Lasteinleitung im Bogenbereich der Schlaufe, in dem die Fasern auf Druck quer zur Faserrichtung belastet werden. Das Bauteil muss des Weiteren die

geforderten Festigkeiten auch nach 50 Jahren noch aufweisen. Um die Festigkeiten mit minimalen Materialeinsatz (minimale Bauteildicke) realisieren zu können, ist eine definierte Ausrichtung aller Fasern im Querschnitt wichtig. Da die Festigkeit maßgeblich durch die Anzahl der gerichteten Fasern definiert ist, kann bspw. die Ondulation von Fasern eine drastische Minimierung derselben zur Folge haben. Abb. 1.4 veranschaulicht die Verringerung des tragenden Querschnittes eines unidirektionalen Faserkunststoffverbundes ( $A_1 \rightarrow A_2$ ) aufgrund von ondulierten Fasern.

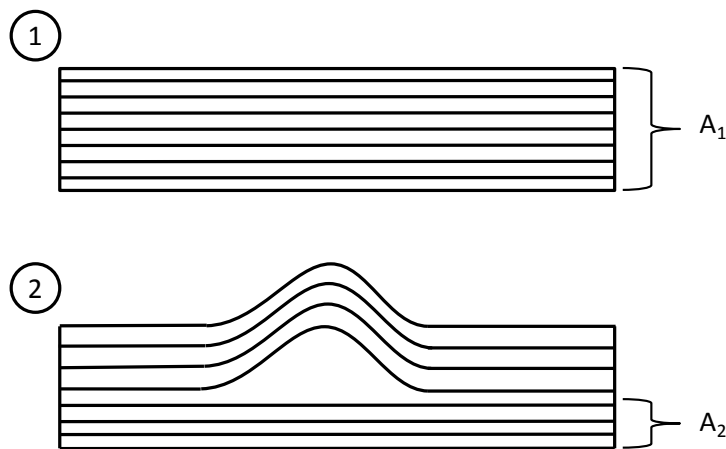


Abb. 1.4: Prinzipdarstellung der Faserondulation (1 Verbundwerkstoff mit gerichteten Fasern, 2 Verbundwerkstoff mit Faserondulation).

### 1.1.3 Thermische und chemische Beständigkeit

Durch den Einsatz als Strukturbauteil in der Bauindustrie muss die GFK-Schlaufe auch Brandschutzbestimmungen nach DIN 1045 genügen. Hierbei ist im Speziellen der im Isolationsbereich befindliche Bauteilbereich im Brandfall hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Da das Bauteil in Beton eingebettet wird und der Beton während der Aushärtephase stark alkalisch (pH 12.6) ist, muss der eingesetzte Werkstoff auch eine hohe Chemikalienbeständigkeit aufweisen. Ein geeigneter Matrixwerkstoff wirkt für die lasttragenden Fasern während dieser Phase auch als Schutz vor dem alkalischen Medium.

### 1.1.4 Wirtschaftliche Anforderungen

Zu den wirtschaftlichen Anforderungen zählen maximale Stückkosten von 4-8 € bei einem Produktionsvolumen von 300.000 Stück pro Jahr [3].

### 1.1.5 Sonstige Anforderungen

Um die geforderten mechanischen Eigenschaften auch nach der Lagerung bzw. Montage des Bauteils noch gewähren zu können, muss eine Baustellentauglichkeit des Bauteils gegeben sein. Die GFK-Schlaufe muss also eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegen Impact-Belastungen, eine Formbeständigkeit in einem breiten Temperaturbereich sowie eine Widerstandsfähigkeit gegen abrasivem Verschleiß aufweisen.

## 1.2 Eingesetzter Faser- und Matrixwerkstoff

Die Werkstoffauswahl liefert einen weiteren Eckpunkt für die Wahl des geeigneten Fertigungsverfahrens und wird auf Basis der Bauteilanforderungen von der Firma 4a engineering GmbH durchgeführt. Dabei werden verschiedene Materialpaarungen mit gleichem Faservolumengehalt und Matrixwerkstoff in Machbarkeitskennfeldern von 4a gegenübergestellt. Aufgrund der hohen Steifigkeitsanforderungen, der geringen Grenzkosten und der hohen Alkalibelastung im eingebauten Zustand wird eine Kombination aus S-Glasfaser und Vinylesterharz (VE) für den Einsatz gewählt.

Tabelle 1.1: Herangezogene Materialdaten [5] [6].

	Einheit	Faser	Matrix
Bezeichnung		AGY ZenTron® S-2 Generic	Atlac 430
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,48	1,06
E-Modul	[MPa]	86900	3600
Zugfestigkeit	[MPa]	4890	83
Bruchdehnung	[%]	5,7	4,2
Kosten	€/kg	9	3,4

Tabelle 1.1 zeigt die herangezogenen Materialdaten des herangezogenen Faser- und Matrixwerkstoffes. Der Mindestfaservolumenanteil im Bauteil beträgt bei einer Schlaufenbreite von 25 mm und einer Schlaufendicke von 10 mm 56 %.

Da die GFK-Schlaufe aus endlos in Umfangsrichtung ausgerichteten Fasern gefertigt werden soll, ist aufgrund der Reibung zwischen den Fasern ab einer bestimmten Umschlingungszahl eine Selbsthemmung gegeben [7]. Die Bauteilfestigkeit und –steifigkeit würde also auch ohne Matrix zu einem Großteil gegeben sein. In der Anwendung der GFK-Schlaufe dient die Matrix eher als Schutz der Fasern bzw. formstabilisierende Masse während des Einbaus und zur gleichmäßigen Kräfteinleitung. Im Brandfall ist demnach das mechanische Verhalten der Faser für die Funktionalität des Bauteils ausschlaggebend.

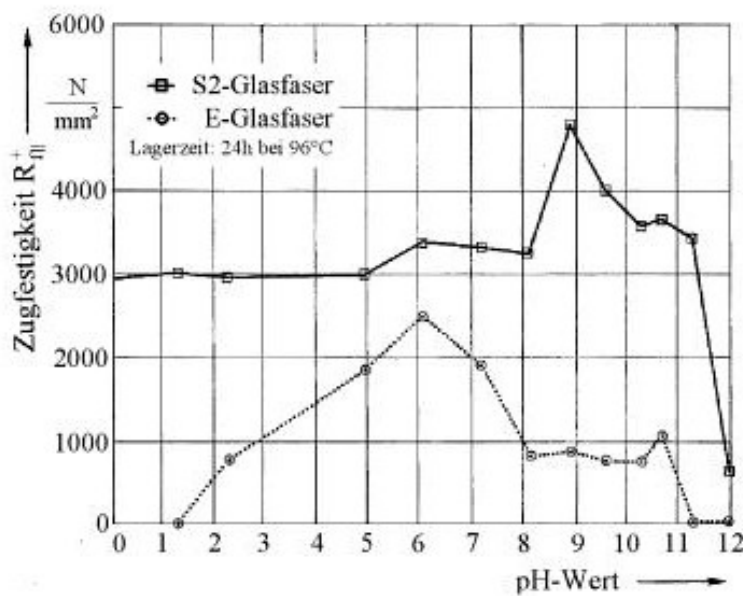


Abb. 1.5: Zugfestigkeitsreduktion aufgrund saurer oder basischer Medien [7].

Wie in Abb. 1.5 dargestellt, zeigt die S-Glasfaser auch ein relativ konstantes Festigkeitsverhalten über einen weiten pH-Bereich. Durch den hohen pH-Wert von Beton während des Aushärtevorgangs von bis zu 12,6 muss mit einer zeitabhängigen Festigkeitsabnahme der Glasfaser gerechnet werden. Durch die sogenannte „Karbonatisierung“ des Betons verringert sich jedoch der pH-Wert auf 9,5 [8]. In diesem Bereich weist die S-Glasfaser die höchste Festigkeit auf. Eine zusätzliche Schutzwirkung kann durch einen geeigneten Matrixwerkstoff erzielt werden, da die Fasern vor einem direkten Kontakt mit dem Umgebungsmedium geschützt werden.

Durch die sehr hohe Alkalibeständigkeit und die guten mechanischen Eigenschaften eignet sich das VE-Harz als Matrixwerkstoff für die Bauteilanwendung. Wird das Bauteil über lange Zeiträume dem alkalischen Medium ausgesetzt, ist jedoch aufgrund von Diffusionsprozessen mit einer Schädigung der Fasern zu rechnen [7].

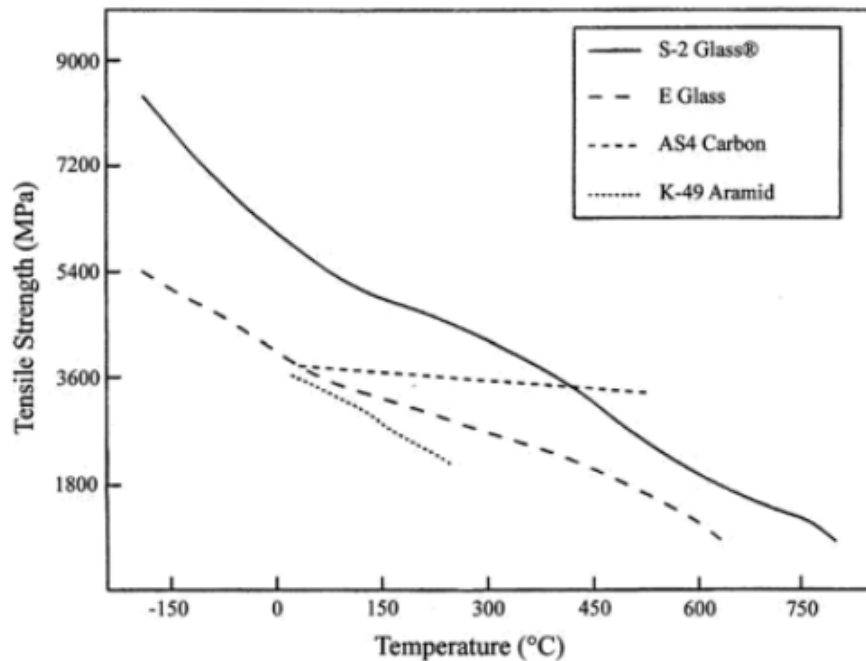


Abb. 1.6: Einfluss längerer Temperatur-Auslagerung (24 h) auf die Festigkeit der wichtigsten Verstärkungsfasern [7], [9].

Aufgrund der thermischen Belastung im Brandfall muss die Verstärkungsfasern auch bei hohen Temperaturen noch eine ausreichende Restfestigkeit aufweisen. In Abb. 1.6 ist die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Temperatur bei einer Auslagerungszeit von 24 Stunden für verschiedene Fasertypen dargestellt. Die Festigkeitsermittlung erfolgt dabei bei der jeweiligen Auslagerungstemperatur. Mit Ausnahme der Carbonfaser weisen alle dargestellten Fasertypen qualitativ ein ähnliches Verhalten auf. Die Carbonfaser zeigt dabei die besten Eigenschaften, da sich die Festigkeit mit steigenden Temperaturen nur geringfügig verringert, weist jedoch eine nicht so gute Alkalibeständigkeit auf. Bei der S-Glasfaser kann bei Temperaturen von 700 °C im Vergleich zur Raumtemperaturfestigkeit ein Festigkeitsverlust von ~80 % berechnet werden. Durch die Einbettung des Bauteils in der Betondecke ist im Brandfall mit einer geringeren

Temperatureinwirkung in diesem Bereich zu rechnen. Die größte thermische Schädigung ist somit im Bereich der Isolationsschicht des „Thermo-Korbes“ zu erwarten. Hier könnte das Anbringen von Brandschutzplatten erforderlich sein, um das Bauteil von der direkten Feuereinwirkung zu schützen.

### **1.3 Zielsetzung**

In dieser Arbeit soll ausgehend von einem Technologiescreening ein Verarbeitungskonzept für die Serienfertigung von GFK-Schlaufen entwickelt werden, das den Anforderungen an hohe Stückzahlen, geringen Fertigungskosten und der engen Toleranz der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Produkts genügen soll. Durch eine wirtschaftliche und technisch qualitative Bewertung wird ein optimales Verarbeitungsverfahren für die Serienfertigung des Bauteils gewählt. Mit einer Prototypenanlage sollen des Weiteren seriennah gefertigte Bauteile für Material- und Bauteilversuche hergestellt werden. Im weiteren Schritt wird ein Konzept für die Serienfertigung erarbeitet und mögliche Engpässe der Fertigungslinie dargestellt. Ein erster Optimierungsschritt soll darstellen, wie diese Engpässe im Fertigungsverfahren optimal minimiert werden können. Ziel ist eine Minimierung der Werkzeuginvestition und der Heizstreckenlänge.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Bereich der Arbeit wird der Stand der Technik als Grundlage für die in der Arbeit aufgegriffenen Teilbereiche dargestellt. Dabei werden sowohl die herangezogenen Verarbeitungsverfahren, als auch -mechanismen näher dargestellt und erläutert.

### 2.1 Viskosität

Die Viskosität  $\eta$  ist ein Maß für die innere Reibung eines fließenden Mediums und wirkt als Widerstand gegen eine Lageveränderung. Die Lageveränderung wird durch eine angelegte Schubspannung  $\tau$  an Gase und Flüssigkeiten hervorgerufen und resultiert in einer Fließgeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ . Daraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen Schubspannung, dynamischer Viskosität  $\eta$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  [10]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Duroplastische Harzsysteme zeigen im Gegensatz zu thermoplastischen Schmelzen in der Regel kein ausgeprägtes strukturviskoses Materialverhalten. Das heißt, dass die Viskosität weitgehend unabhängig von der Schergeschwindigkeit ist. Die Viskosität ist jedoch temperaturabhängig und sinkt mit steigenden Temperaturen [11].

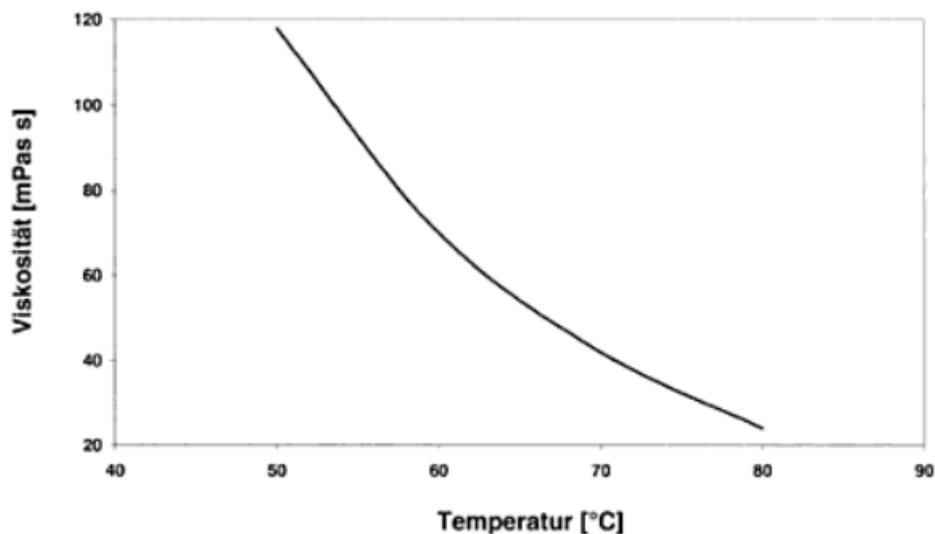


Abb. 2.1: Viskositätsverlauf als Funktion der Verarbeitungstemperatur [11].



Die Viskosität einer Reaktionsharzmasse, also dem Gemisch von Harz und Härter, weist des Weiteren ein zeitabhängiges Verhalten aufgrund der Vernetzungsreaktion auf. Dabei beginnt das Harz zu gelieren und ist nicht mehr fließfähig.

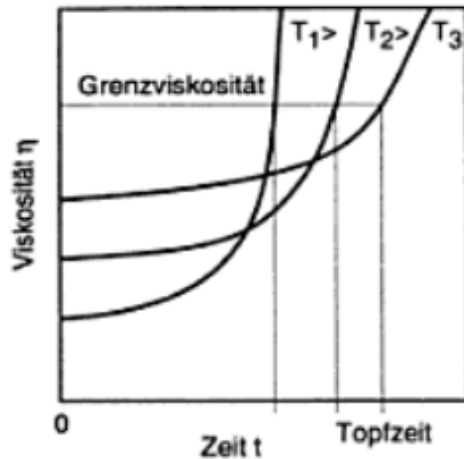


Abb. 2.2: Zeit-/Temperaturabhängigkeit der Viskosität einer Reaktionsharzmasse [11].

Abb. 2.2 veranschaulicht die Veränderung der Viskosität einer Reaktionsharzmasse bei unterschiedlichen Temperaturen über der Zeit. Bei Reaktionsharzmassen liegen demnach zwei gegenläufige Effekte vor. Kurz nach dem Mischprozess kann die Viskosität durch erhöhte Temperaturen verringert werden. Die höheren Temperaturen haben jedoch einen schnelleren Anstieg der Viskosität durch die beschleunigte Vernetzungsreaktion zur Folge. Die angegebene Topfzeit beschreibt den Zeitraum zwischen dem Start der Vernetzungsreaktion und dem Erreichen der Grenzviskosität. Die Topfzeit sinkt mit steigender Temperatur der Reaktionsharzmasse.

Eine weitere Reaktionsbeschleunigung kann aufgrund der Exothermie des Vernetzungsprozesses festgestellt werden. Bei der Verarbeitung von Reaktionsharzmassen wird aus diesem Grund zwischen isothermen und nicht isothermen Vernetzungsbedingungen unterschieden. Als isotherm werden jene Prozesse bezeichnet, bei denen die Temperatur des Werkstoffes während der Vernetzung konstant bleibt. Das gilt bspw. für

dünne Bauteile, die beidseitig an metallischen Werkzeugflächen anliegen. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen kann die entstehende Reaktionswärme sofort vom Werkzeug aufgenommen werden und somit die Temperatur in der Reaktionsharzmasse konstant gehalten werden. Nicht isotherme Prozesse entstehen bei Bauteilen mit großer Wandstärke. Hier kann die entstehende Wärme aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes nicht aus dem Material entweichen. Folge ist eine Temperaturerhöhung im Werkstoff und ein schnellerer Anstieg der Viskosität bzw. eine thermische Schädigung des Verbundwerkstoffes [11].

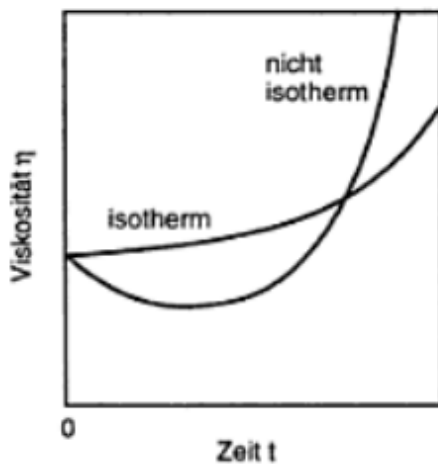


Abb. 2.3: Isothermer und nicht isothermer Viskositätsverlauf [11].

In Abb. 2.3 wird der Unterschied zwischen einem isothermen und einem nicht isothermen Viskositätsverlauf deutlich. Dabei sinkt die Viskosität beim nicht isothermen Verlauf aufgrund der Reaktionswärme zu Beginn ab, steigt jedoch dann im Vergleich zur isothermen Kurve aufgrund der höheren Reaktionsgeschwindigkeit deutlich schneller wieder an. Bei den Reaktionsharzen zeigt vor allem die Gruppe der Epoxidharze eine stark exotherme Vernetzungsreaktion [11].

## 2.2 Permeabilität

Die Permeabilitätskonstante wird als dreidimensionaler Tensor mit der Einheit  $[m^2]$  angegeben und beschreibt im Wesentlichen den Fließwiderstand eines porösen Mediums [12]. Dieser ist bei Faserkunststoffverbunden abhängig von:

- Art und Konstruktion der Textilien
- Garn
- Schlichte, Haftvermittler
- Faserwerkstoff
- Lagenaufbau
- Oberflächenspannung der Faser
- Viskosität der Matrix
- Oberflächenspannung der Matrix
- Porosität
- Kontaktwinkel (Faser/Matrix)

### 2.3 Faserimprägnierung

Unter Imprägnieren versteht man den Fluss einer viskosen Flüssigkeit (Matrixwerkstoff) durch ein poröses Medium (Verstärkungsstruktur) [12]. Die Qualität der Faserimprägnierung beeinflusst wesentlich die resultierenden Bauteileigenschaften. Die Imprägnierungsgeschwindigkeit kann dabei mit dem empirischen Gesetz von Darcy beschrieben werden.

$$v = \frac{K \cdot dP}{\eta \cdot dZ} \quad (2)$$

Dabei ist  $v$  die Fließgeschwindigkeit,  $K$  die Permeabilität der Verstärkungsstruktur,  $\eta$  die Viskosität des Matrixwerkstoffes und  $dP/dZ$  der Druckgradient als treibende Kraft für den Fließprozess [13].

### 2.4 Vernetzungsreaktion

Duroplastische Makromoleküle bestehen in der Regel aus tri- oder multifunktionellen Monomeren. Ihre endgültige feste Form erhalten sie durch eine Vernetzungsreaktion der sogenannten „Härtung“. Um die Vernetzungsreaktion zu starten, wird ein Härter dem duroplastischen Reaktionsharz beigemischt. Die Reaktion kann durch zusätzliches Einwirken von Wärme (vgl. Abb. 2.2) oder UV-Strahlung beschleunigt werden [14]. Der Vernetzungsprozess kann dabei abhängig vom Harzsystem sowohl als Polyaddition (standartmäßig bei Epoxidharzen), als auch als radikalische

oder ionische Polymerisation (Vinylester oder ungesättigten Polyesterharze) von statten gehen [15].

Abb. 2.4 zeigt die prinzipielle Einteilung der Verfahrensschritte bei der Verarbeitung von Reaktionsharzen. Je nach Verarbeitungsschritt spricht man von Reaktionsharzen, Reaktionsharzmassen und von Reaktionsharzformstoffen. Unter Zusatzstoffe versteht man Additive, Füllstoffe oder Verstärkungswerkstoffe. Bei der Verarbeitung von kontinuierlich verstärkten Faserkunststoffverbunden erfolgt das Zusammenführen von Verstärkungsstrukturen mit Matrixwerkstoff jedoch nach dem Mischprozess also mit der Reaktionsharzmasse.



Abb. 2.4: Verfahrensschritte in der Reaktionsharztechnologie [14].

Prinzipiell unterscheidet man bei den Härtersystemen zwischen Kalt- und Warm-Aushärtenden Systemen. Bei Kalt-Aushärtenden startet die Vernetzungsreaktion durch Beimengen des Härter auch unter Raumtemperatur. Bei Warm-Aushärtenden Harzsystemen wird die Reaktion erst bei Überschreiten einer Initiierungstemperatur gestartet. Dadurch ergeben sich weitere Verarbeitungszeiträume [16]. Der Nachteil ist, dass die Aushärtungsreaktion bspw. in einem Ofen durchgeführt werden muss.

Ein weiterer Nebeneffekt der Vernetzungsreaktion ist die Schwindung durch Abnahme des freien Volumens im Material. Abb. 2.5 zeigt den Verlauf des Harzvolumens bei einem Vernetzungsprozess mit höheren Temperaturen.

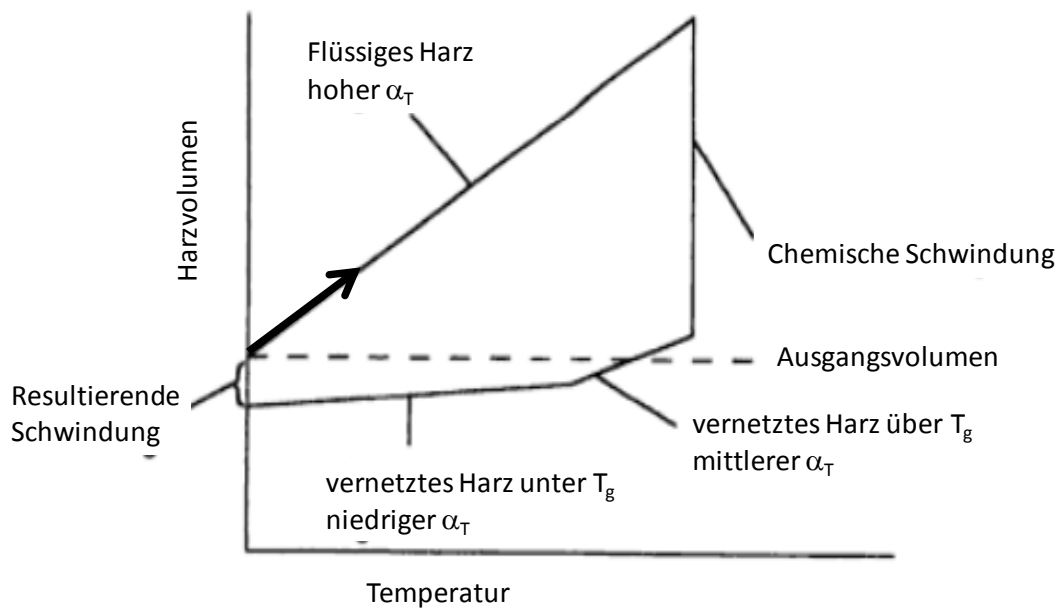


Abb. 2.5: Schwindungsverhalten bei erhöhten Prozesstemperaturen [17].

Am Beginn des Verarbeitungsprozess steigt das Volumen der flüssigen Reaktionsharzmasse mit hohem Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  stark an. Die Vernetzungsreaktion verursacht in weiterer Folge eine starke chemische Schwindung des Materials. Das Material wird nun weiter abgekühlt, wobei der Werkstoff oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$  aufgrund des höheren  $\alpha_T$  pro  $^{\circ}\text{K}$  stärker schwindet. Unterhalb von  $T_g$  schwindet das Material weiter, bis es die Ausgangstemperatur erreicht hat. Die Differenz zwischen Ausgangsvolumen und resultierendem Volumen wird als Schwindung bezeichnet.

## 2.5 Verarbeitungsverfahren

### 2.5.1 Prepreg/Autoklav Technologie

#### Verarbeitungsprozess

Beim Prepreg/Autoklav Verarbeitungsverfahren werden mit duroplastischer oder thermoplastischer Matrix vorimprägnierte Halbzeuge mittels Autoklavtechnik zu Bauteilen verarbeitet. Die Bezeichnung Prepreg ist die Kurzform für „preimpregnated fiber“ [11]. Prepregs sind mit Endlosfasern verstärkt, die als Gewebe, Gelege oder unidirektionale Schichten im Halbzeug vorliegen können. Charakteristisch für die duroplastischen

Prepregs sind das schon vorvernetzte Matrixsystem und die daraus resultierende hohe Viskosität.

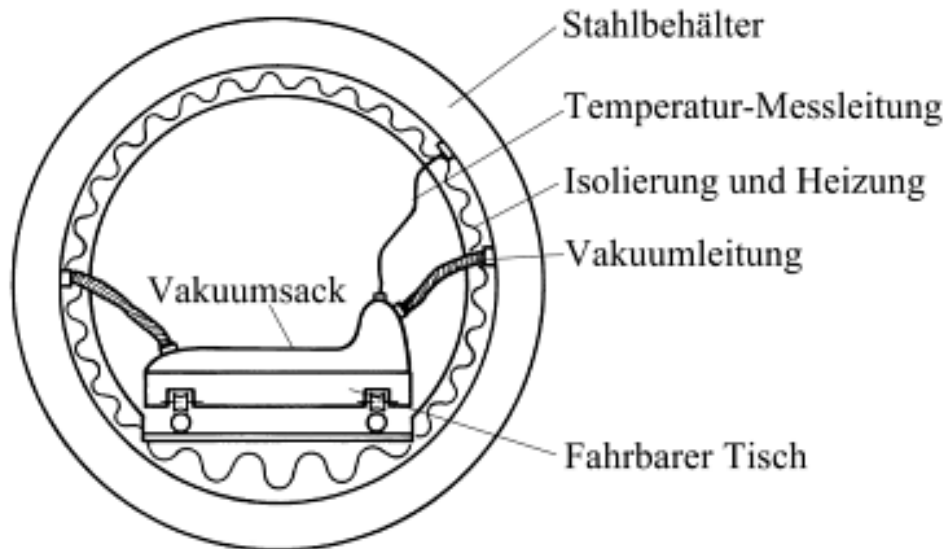


Abb. 2.6: Aufbau einer Autoklavanlage [7].

Abb. 2.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Autoklavanlage. Ein Autoklav ist mit einem temperierbaren Druckbehälter vergleichbar. Beim Verarbeitungsprozess wird die Werkzeugform mit den Halbzeugen in gewünschter Dicke bzw. Schichtanzahl und mit der gewünschten Faserorientierung belegt. Dieser Prozessschritt wird üblicherweise manuell durchgeführt, da sich eine Automatisierung dieses Arbeitsschrittes mittels Roboter als äußerst komplex herausstellen kann. Die Bauteilkontur wird dabei nur auf einer Seite geometrisch genau abgebildet. Die freie Oberfläche des Bauteils ergibt sich aus der Werkzeugform und der Schichtdicke des Bauteils. Abb. 2.7 zeigt den prinzipiellen Laminataufbau eines mittels Prepreg/Autoklav-Technologie hergestellten Bauteils. Die dabei verwendeten Hilfsmaterialien dienen zur gleichmäßigen Druckverteilung, zur Abdichtung des Vakuumbereiches, zur Entlüftung des Bauteils während der Aushärtung bzw. als Trennschicht zwischen Werkzeug und Bauteil.

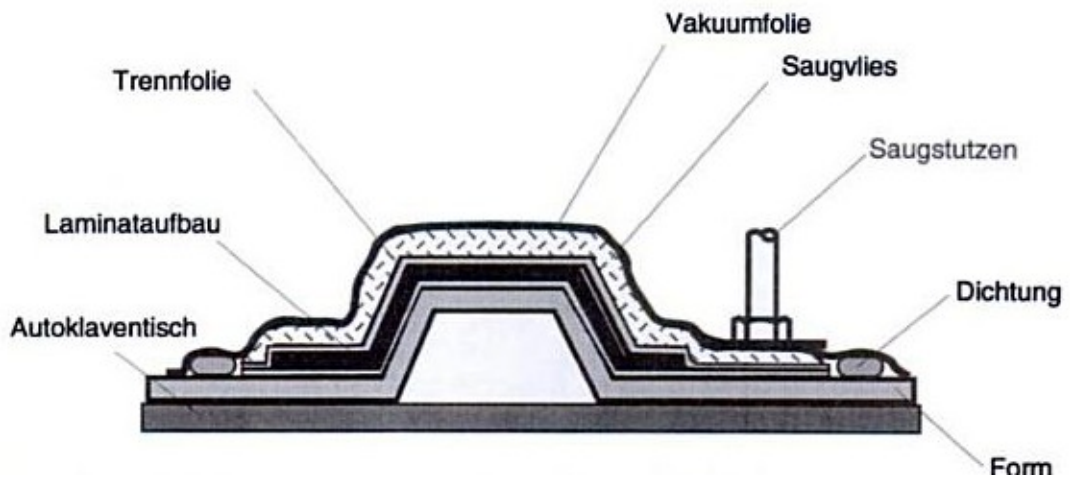


Abb. 2.7: Verarbeitungsaufbau zur Herstellung von Prepreg Bauteilen [18].

Durch die hohe Viskosität der einzelnen Prepregschichten kommt es bei der Herstellung des Schichtaufbaus unweigerlich zu Lufteinschlüssen zwischen den einzelnen Schichten. Durch den auf das Bauteil aufgetragenen Relativdruck, resultierend aus dem angelegten Vakuum und Überdruckruck, wird der Schichtaufbau sowohl kompaktiert, als auch ein Teil der Lufteinschlüsse aus dem Bauteil verdrängt.

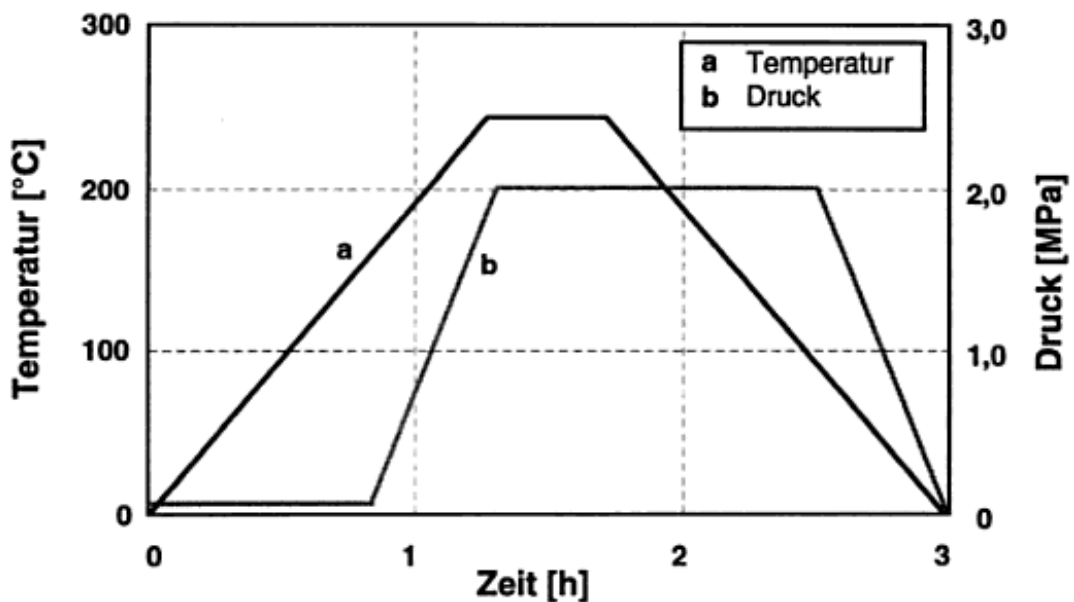


Abb. 2.8: Autoklavprozess: Temperatur und Druckprofil [18].

Abb. 2.8 zeigt ein übliches Temperatur und Druckprofil während eines Autoklavprozesses. Das zusätzlich wirkende Vakuum wird während der gesamten Prozessdauer konstant gehalten, um den Schichtaufbau an der

Werkzeugoberfläche zu fixieren. Um eine gute Kompaktierung der Schichten gewährleisten zu können, wird die Temperatur deutlich unter der Aushärtetemperatur des Harzsystems eine Zeit lang konstant gehalten. In diesem Zeitraum sinkt die Viskosität des Harzes ab und der Schichtaufbau kann durch den zusätzlich aufgebrachten Überdruck optimal an das Werkzeug angeformt werden. Die Dauer der Haltezeit ist von der Komplexität der Bauteilgeometrie, der Werkzeugdicke und der Gesamtdicke des Schichtaufbaus abhängig. Im Anschluss an die Haltezeit erfolgt eine weitere Erhöhung der Temperatur um das Bauteil vollständig auszuhärten. Die dabei erforderliche Aushärtetemperatur und -zeit wird vom verwendeten Harzsystem bestimmt. Nach der Aushärtephase wird das fertige Bauteil abgekühlt und entformt.

#### Vor- und Nachteile der Prepreg/Autoklav Technologie

Das Prepreg/Autoklav Verarbeitungsverfahren wird aufgrund der realisierbaren hohen mechanischen Performance (höchste erzielbare Faservolumenprozent (<70 %) und beinahe beliebige Faserorientierung) und der relativ einfachen Verarbeitungsmöglichkeiten in vielen Bereichen eingesetzt. Bei der Realisierung von Bauteilen aus vielen Einzelschichten (<10) entsteht ein größerer Herstellungsaufwand durch Zwischenkompaktierungsschritte während der Herstellung des Schichtaufbaus. Im Vergleich zum Vakuumpressverfahren (Pressdruck ~0.1 MPa) können mittels Autoklavtechnologie deutlich höhere Presskräfte erzielt werden, was geringere Porenanteile und höhere Faservolumenanteile im Bauteil zur Folge hat. Ein weiterer Vorteil der Autoklavtechnologie ist der konstante Konsolidierungsdruck über der gesamten Bauteiloberfläche. Aus diesem Grund sind Bauteile mit extremen Winkeln bzw. Hinterschneidungen herstellbar.

Durch die Verarbeitung von Prepreg Halbzeugen sind die Kosten des Materialeinsatzes deutlich höher, als bei Verarbeitungsverfahren bei denen von Faserrovings und Matrixwerkstoffen ausgegangen wird. Weiterer Kostentreiber sind der hohe Anteil an manueller Arbeit und die notwendigen Verbrauchsmaterialien, wie Vakuumfolien oder Dichtbänder, sowie die



Lagerung der Prepregs bei einer Temperatur von  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aus diesem Grund wird das Verfahren meist im Bereich von Kleinserien und Prototypenbau eingesetzt. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens sind die langen Rüst-, bzw. Zykluszeiten (3-12 h) und die geringe Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Verbrauchsmaterialien bei Hochtemperaturanwendungen [11].

## **2.5.2 Wickeltechnik**

### Verarbeitungsprozess

Bei der Wickeltechnologie werden mit Matrix imprägnierte Endlosfasern auf einem meist rotationssymmetrischen Kernwerkzeug unter Faservorspannkraft ( $\ll$ Faserfestigkeit) abgelegt. Aufgrund des verwendeten Matrixwerkstoffes unterscheidet man prinzipiell zwischen der Duroplast- und Thermoplast-Wickeltechnologie. Während beim Duroplast - Wickelprozess noch ein nachfolgender Aushärteprozess mittels Autoklavtechnologie oder Ofen nachgeschaltet werden muss, erhält man aus dem Thermoplast-Wickelprozess direkt ein fertiges Bauteil. Die Imprägnierung der Faserrovings kann dabei sowohl „in Line“, als auch als separater Verarbeitungsschritt [7] implementiert werden.

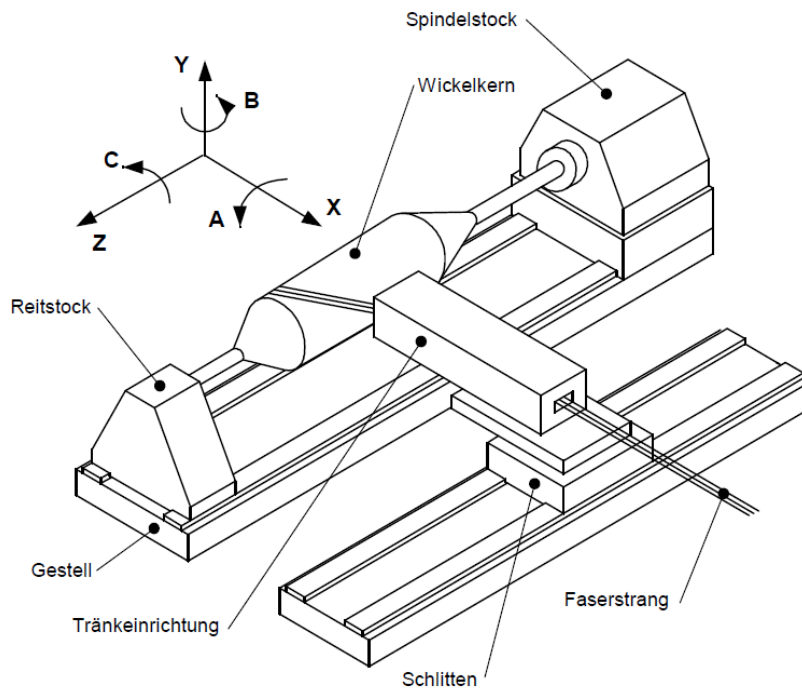


Abb. 2.9: Prinzipieller Aufbau und Bewegungsachsen einer Wickelmaschine [19].

Abb. 2.9 veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau einer Wickelmaschine. Die Abbildung zeigt den rotierenden Wickelkern und den vom Fadenableger bzw. von der Tränkeinrichtung abgelegten Faserstrang. Vereinfachungen im Faseroving-Handling und bei der Imprägnierung der Fasern können durch ein feststehendes Ringfadenauge getroffen werden. Dabei ist die Faserablegeeinheit ringförmig und stillstehend um den Wickelkern angeordnet. Der Wickelkern führt hierbei sowohl die rotatorische, wie auch die translatorischen Bewegungen aus. Die Anlage wird dabei jedoch auf 2 Bewegungs-Freiheitsgrade eingeschränkt und eignet sich grundsätzlich für die Fertigung von rotationssymmetrischen Bauteilen [11], [15].

Eine weitere Art verschiedene Wickeltechniken voneinander unterscheiden zu können, ist die Art des Wickelkerns. Hier unterscheidet man zwischen wiederverwendbaren und verlorenen Kernen. Wiederverwendbare Kerne können dann eingesetzt werden, wenn die herzustellende Bauteilgeometrie eine Entformung des Wickelkerns nach dem Aushärteprozess zulässt. Typische Geometrien wären etwa kegelartige Hohlkörper. Ein verllorener Kern wird bspw. bei Druckbehältern eingesetzt. In diesem Fall besteht der

Kern meist aus einem dünnen Stahlkörper, dem sogenannten Liner, der zum einen die Diffusionseigenschaften des Bauteils erheblich verbessert und zum anderen als Wickelkern dient. Soll der Wickelkern nicht im Bauteil verbleiben, so wird meist ein chemisch auflösbarer Wickelkern eingesetzt [11]. Somit kann der Kern nach dem Aushärtvorgang, bspw. mittels Wasser aus dem Bauteil gelöst werden.

Sowohl die mechanischen Eigenschaften, wie auch die wirtschaftlichen Aspekte der Wickeltechnik werden von den prozesstechnischen Parametern wie Verarbeitungsgeschwindigkeit, Fadenspannung, Wickelwinkel, Wickelmuster, Breite des/der Rovings und Anzahl der Rovings [12] stark beeinflusst. Der Durchsatz einer Wickelanlage ist prinzipiell von der Rotationsgeschwindigkeit und dem Durchmesser des Wickelkerns und der Anzahl an gleichzeitig abgelegten Faserrovings abhängig. Typische Abzugsgeschwindigkeiten bewegen sich zwischen 0 und 100 m/min [20]. Die Fadenspannung ist neben dem Harzgehalt des Rovings nach der Imprägnierung eine wesentliche Größe zur Realisierung des gewünschten Faservolumengehalts im Bauteil. Die Größe der Spannung darf dabei die Faserfestigkeit nicht übersteigen und wird bspw. von den Abstreifeinheiten in der Imprägniereinheit beeinflusst. Mittels duroplastischer Nass-Wickeltechnik kann ein Faservolumenanteil von bis zu 65 % realisiert werden [21]. Der Wickelwinkel ist ein weiterer wesentlicher Beitrag für die mechanische Performance des Bauteils. Dieser kann durch die Rotationsgeschwindigkeit des Wickelkerns und die translatorische Geschwindigkeit des Fadenablegers kontrolliert werden. Typische Wickelwinkel liegen zwischen  $10^\circ$  und  $90^\circ$ , wobei  $90^\circ$  Wicklungen als Umfangswicklungen bezeichnet werden. Wie Abb. 2.10 zeigt, sind mit der Wickeltechnik verschiedene Wickelmuster realisierbar. Die Art des Wickelmusters ist vom Faserwinkel, der Breite des/der abgelegten Rovings, dem Durchmesser/Längen-Verhältnis und dem Wickelmuster des Bauteils abhängig.

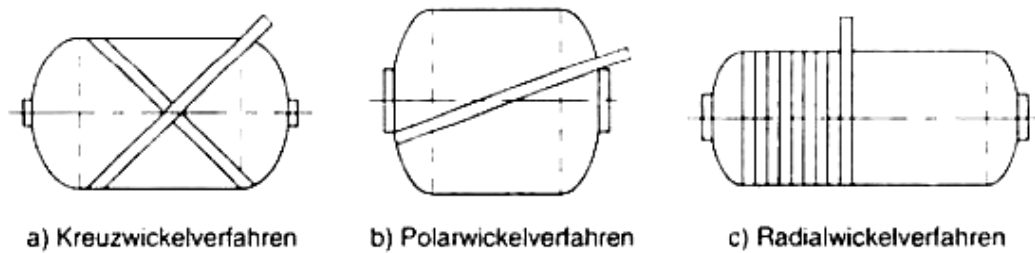


Abb. 2.10: Wickelmuster [12].

Das Kreuzwickelverfahren bietet den Vorteil in seiner großen Fertigungsvielseitigkeit. Dabei kann für fast jedes Durchmesser/Längen-Verhältnis unter Berücksichtigung von Wickelwinkel, Musterkennzahl und der Anzahl an Durchläufen eine flächendeckende Bewicklung des Wickelkerns gefunden werden. Nachteil des Kreuzwickelverfahrens ist die Aufdickung des Bauteils im Bereich der Wendepunkte. Werden konstante Wandstärken im Bauteil benötigt, so sollten die Wendebereiche auf den Rand des Bauteils verschoben werden, um in einem Nachbearbeitungsschritt abgetrennt werden zu können [12].

Werden die Faserrovings tangential zur Polöffnung an jedem Dorn des Wickelkerns abgelegt, so spricht man vom Polarwickelverfahren. Dabei beschreibt die Ablagespur nach jedem Durchlauf etwa eine Ebene. Beim jeweilig nächsten Durchlauf wird die Wickelspur um eine Bandbreite (Breite des abgelegten Rovings) verdreht. Nach flächendeckender Bewicklung erhält man ein Wickelmuster ohne Kreuzungspunkte. Die Faserorientierung wird jedoch von der Bauteilgeometrie bestimmt [12].

Im Radialwickelverfahren werden die Faserrovings in  $\sim 90^\circ$  Lagen auf dem Wickelkern abgelegt. Pro Umdrehung führt der Fadenableger eine Translationsbewegung in Achsrichtung in der Größe der Bandbreite durch. Es entsteht ein Wickelmuster ohne Kreuzungspunkte. Die Anwendbarkeit des Radialwickelverfahrens beschränkt sich jedoch auf Bauteile mit konstanten Querschnitten [12].

Während bei der thermoplastischen Wickeltechnik aufgrund der in Situ Konsolidierung auch negative Krümmungen am Bauteil realisiert werden können, können mit der duroplastischen Wickeltechnik nur konvexe

Strukturen gewickelt werden. Veränderungen des Querschnitts entlang der Bauteillänge führen, wie schon im Bereich der Wickelmuster ausgeführt, zu einer Änderung des Wickelwinkels bzw. -musters. Abb. 2.11 veranschaulicht mittels Wickeltechnik realisierbare Grundformen von Bauteilen. Hergestellte Standarddimensionen weisen einen Durchmesser von bis zu 1 m und eine Länge von bis zu 5 m auf. Für Spezialanwendungen werden jedoch auch Bauteile wie etwa Waschtürme mit einem Durchmesser von 10 m, oder Offshore-Rohre mit einer Länge von 2 km hergestellt [15].

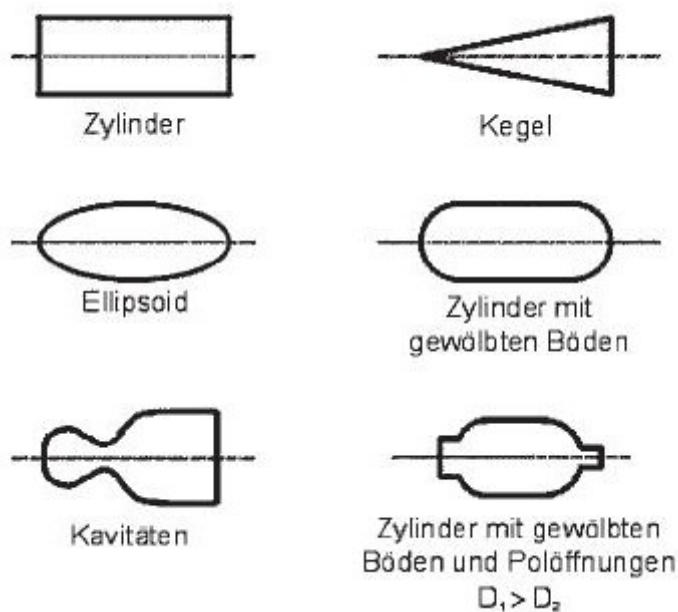


Abb. 2.11: Wickeltechnik: Realisierbare Grundformen [11].

Im Gegensatz zur Prepreg-Wickeltechnik müssen die eingesetzten Faserrovings vor dem Wickelprozess noch in der sogenannten Imprägniereinheit mit der duroplastischen Matrix getränkt werden. Unter Imprägnieren versteht man den Fluß eines viskosen Fluids durch ein poröses Medium. Der Imprägnierprozess wird von der Permeabilität der Verstärkungsstruktur, dem Fasertyp, der Harzviskosität, der Geometrie der Imprägniereinheit, der Faserabzugsgeschwindigkeit und der Faserspannung beeinflusst [12]. Grundsätzlich kann zwischen zwei unterschiedlichen Tränkmethode, der Tauchtränkung und Walzentränkung, aufgrund der unterschiedlichen Funktionsprinzipien unterschieden werden. Bei der Tauchtränkung werden die Faserrovings durch ein Harzbad gezogen. Das

überschüssige Harz und die eingeschlossene Luft werden anschließend über sogenannte Harzabstreifer aus den Rovings verdrängt. Diese einfache Tränkmethode eignet sich am besten für Fasern mit niedriger Bruchempfindlichkeit wie Glas- oder Aramidfasern. Zur Imprägnierung von Kohlenstofffasern ist die Imprägnierung mittels Walzentränkung zu bevorzugen. Dabei nimmt eine rotierende Walze über ein Harzbad einen Harzfilm auf, dessen Dicke durch einen Harzabstreifer kontrolliert werden kann. Die zugeführten Faserrovings werden nun der Rolle zugeführt und das Harz wird in den Faserroving gedrückt. Die Imprägnierung mittels Walzentränkung kann besser gesteuert werden und ist für den Faserwerkstoff schonender. Im Vergleich zur Tauchtränkung kann mittels Walzentränkung zwar ein geringerer Harzanteil realisiert werden, der Anteil an Lufteinschlüssen im Faserroving ist jedoch auch geringer. Abb. 2.12 stellt den prinzipiellen Aufbau einer Tauchtränkung der einen Walzentränkung gegenüber.

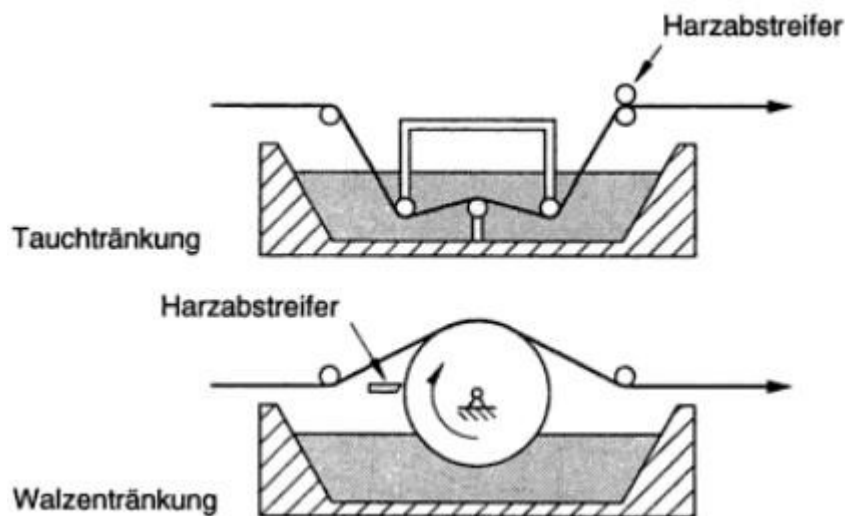


Abb. 2.12: Imprägniereinheit: Tauchtränkung vs. Walzentränkung [12].

Ein weiterer wichtiger Prozessparameter für die Tränkungsqualität ist die Viskosität des Harzsystems. Grundsätzlich gilt: je geringer die Viskosität des Harzsystems, umso besser die Tränkungsqualität der Imprägniereinheit. Die Viskosität des Harzsystems sollte dabei unter 2000 mPas liegen, die Topfzeit über 6 Stunden. Um die Viskosität der Matrix zu senken, empfiehlt sich eine Temperierung des Harzbades [15].

Die Anforderungen an den Aushärteprozess hängen von der Art der eingesetzten Werkstoffe, bzw. Halbzeuge ab. Bei Bauteilen die mittels Prepreg-Wickeltechnik hergestellt werden, muss der Aushärtevorgang wie bei der Prepreg/Autoklav Technologie mit einer Autoklavanlage realisiert werden. Die Randbedingungen können aus Kapitel „Prepreg/Autoklav Technologie“ entnommen werden. Wird das Bauteil „nass“ gewickelt, so reicht ein Aushärteprozess mittels Ofen. Das Bauteil muss während der Aushärtephase nicht weiter kompaktiert oder in Form gehalten werden, da sich die einzelnen Rovingschichten gegenseitig in Form halten (Selbsthemmung). Im Gegensatz zu einem mittels Prepreg-Wickeltechnik gefertigten Bauteil muss ein „nass“ gewickeltes Bauteil jedoch während des gesamten Aushärtevorgangs rotiert werden um ein abtropfen der Matrix zu verhindern [12].

Die Breite der eingesetzten Prepreg-Halbzeuge bzw. die Anzahl der Faserrovings die von einer Wickelanlage gleichzeitig am Bauteil abgelegt werden, können die Komplexität des Herstellungsprozess stark beeinflussen. Vor allem bei der Prepreg Wickeltechnik werden Fertigungsparameter wie Faserwinkel oder Fasermuster stark von der Breite des abgelegten Halbzeuges beeinflusst. Die realisierbaren Wickelwinkel liegen aus diesem Grund zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ .

#### Vor- und Nachteile der Wickeltechnik

Mit modernen Wickelanlagen können bis zu 300.000 Druckbehälter pro Jahr hergestellt werden [12]. Wie Abb. 2.13 zeigt, können mittels Wickeltechnik im Vergleich zum Tapelegeprozess, als auch zu den beiden angeführten Handlegeverfahren, wie zu erwarten, sowohl höhere Durchsätze, wie auch geringe Herstellungskosten erzielt werden.

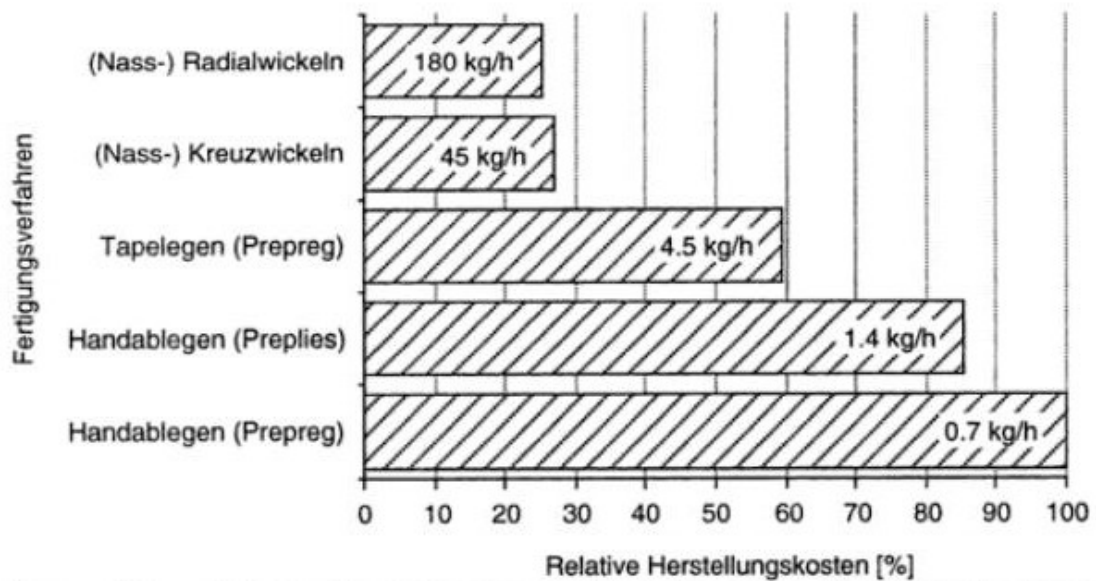


Abb. 2.13: Relative Herstellkosten und Faserablegeraten für einen CF/EP Laminataufbau [12].

In Tabelle 2.1 zeigt sich jedoch, dass mit anderen Fertigungsverfahren bei der Herstellung von Faserkunststoffverbunden wie bspw. der Presstechnik noch weitaus geringere Zykluszeiten bzw. höhere Durchsätze erreicht werden können, als mit der Wickeltechnik.

Tabelle 2.1: Vergleich von Kosten und Prozesseffizienz verschiedener Fertigungsverfahren im Bereich Faserkunststoffverbunde [22].

Process	Typical cycle time	Equipment capital [£1000]	Mould capital [£]	Product value per cycle [£]	Product value per hour [£]	Process efficiency
Compression	3 min	50	5000-20000	1-5	20-100	365-1428
Autoclave	8 h	150	1000	10-100	1.25-12	8.3-79
Filament Winding	4 h	20-100	1000	10-100	2.5-25	119-250
Injection (VARI)	10-60 min	5-10	300-1000	1-10	6-10	1000-1200
Pressure bag	1 h	5	100-500	1-4	1-4	200-800
Spray	3 h	5	100-500	5-25	2-8	400-1600
Hand lay-up	5 h	0	100-500	5-25	1.5	10000
Pultrusion	0.5-3 m/min	50-100	2000-10000	3/m	90-540	2884-5400

Die angegebene „Process efficiency“ errechnet sich dabei als Kennzahl nach

$$Process\ efficiency = \frac{Product\ value\ per\ hour \cdot 10^6}{total\ capital} \quad (3)$$

und stellt den Durchsatz eines Fertigungsverfahrens im Verhältnis zum erforderlichen Gesamtinvest dar.

Ein weiterer Vorteil dieses Herstellungsprozesses ist die hohen Reproduzierbarkeit der Faserorientierung und der Einsatz von



kontinuierlichen Fasern im ganzen Bauteil was eine hohe Festigkeit und eine geringe Bauteilmasse zur Folge hat. Nachteilig ist die Einschränkung, dass der Wickelpfad nur auf geodätischen Bahnen einer Bauteilgeometrie definiert werden kann. Durch die Realisierbarkeit von hohen Faservolumenanteilen im Bauteil, können Bauteile mit hohen Steifigkeiten hergestellt werden.

Die Herstellbarkeit von großen Strukturen und die Integration von funktionellen Kernen oder Anbindungselementen, wie bspw. metallische Endhülsen oder das Bewickeln von Linern führt zu vielseitigen Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Gewährleistung der Entformbarkeit des Wickelkerns. Anderenfalls muss auf verlorene oder chemisch auflösbare Kerne gewickelt werden. Des Weiteren können keine Bauteile mit negativen Krümmungen gewickelt werden. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens ist die undefinierte Oberflächenqualität des Bauteils auf der Außenseite [12].

### **2.5.3 Pultrusion**

Grundsätzlich findet die Pultrusionstechnik ihre Anwendung in der Herstellung von Endlosprofilen mit konstantem Querschnitt. Dabei werden mit Harz getränkte bzw. mit thermoplastischer Matrix imprägnierte Faserrovings bzw. -matten durch ein Ziehwerkzeug gezogen. Im Werkzeug findet durch Erwärmung bzw. Kühlung die Formgebung des Faserverbundes statt. Die Abzugskraft wird von einer Abzugseinheit auf den Faserstrang aufgebracht, welche das Profil nach Verlassen des Werkzeugs erfasst. Am Ende der Fertigungsanlage werden die Profile durch eine Abtrennvorrichtung abgelängt und an eine Entnahme- oder Ablagestation weitergegeben (Abb. 2.14).

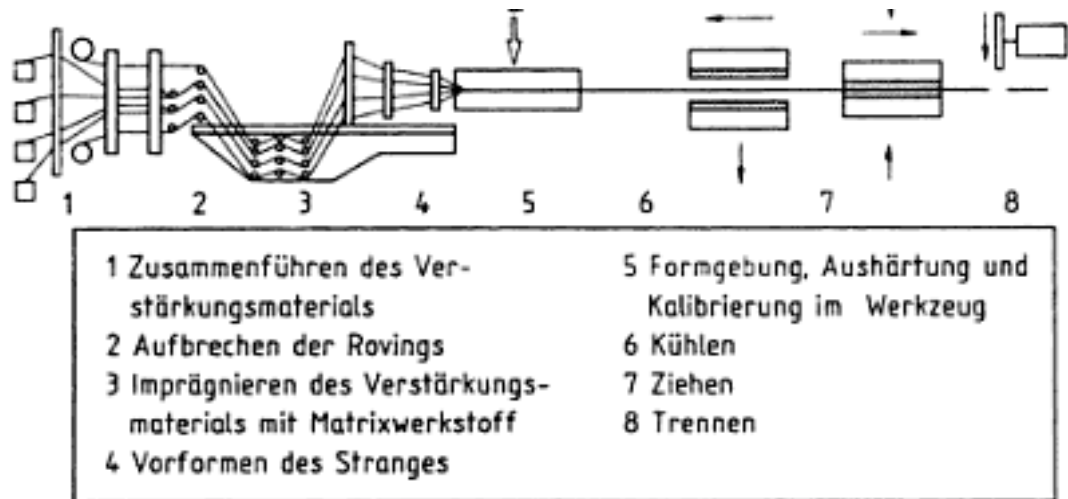
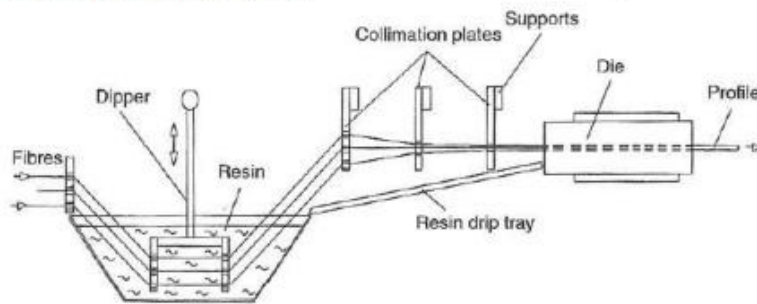


Abb. 2.14: Prozessschritte der Pultrusionsanlage [23].

### Verarbeitungsprozess

Der Pultrusionsprozess zählt zu den kontinuierlichen Verarbeitungsverfahren bei der Herstellung von Faserkunststoffverbunden. Wie bei der Wickeltechnik gibt es auch bei der Pultrusion zwei grundsätzliche Arten von Imprägniereinheiten. Dabei wird zwischen der offenen und der geschlossenen Imprägnierung unterschieden. Abb. 2.15 zeigt den unterschiedlichen Aufbau der beiden Methoden zur Faserimprägnierung.

## Offenes Harzbad



## Geschlossene Imprägnierung

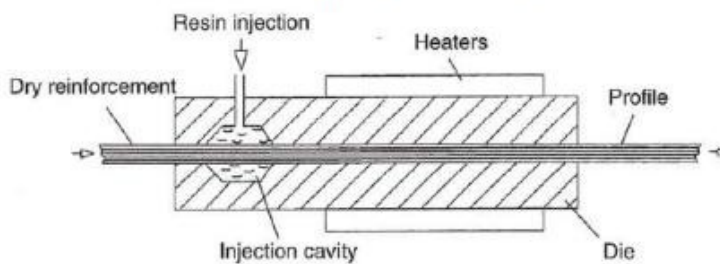


Abb. 2.15: Pultrusion: offene vs. geschlossene Imprägnierung [24].

Die Imprägnierung mittels offenen Harzbad stellt dabei die prozesstechnisch wesentlich einfachere Lösung dar. Grund für den Einsatz des geschlossenen Systems ist jedoch die geringere Emissionsbelastung bspw. durch im Matrixwerkstoffe enthaltene Lösungsmittel. Der Einsatz erfordert jedoch einen höheren prozesstechnischen Aufwand um eine gute Faserimprägnierung ohne Luft einschüsse realisieren zu können. Beim offenen System werden die eingesetzten Rovings nach dem Tränkbad über Harzabstreifer geführt, die einerseits die Luft einschüsse aus dem Verstärkungsmaterial drücken und andererseits das überschüssige Harz abstreifen. Vor Eintritt in das beheizte Formwerkzeug können noch zusätzliche Verstärkungsmaterialien, wie Fasermatten, -gewebe oder -gelege, den imprägnierten Rovings zugeführt werden, um die Querfestigkeiten bzw. -steifigkeiten im Randbereich des Bauteils zu erhöhen [11].

Am Werkzeugeingang wird der Verbund komprimiert und in Form gebracht. Die Komplexität eines Pultrusionswerkzeug hängt von der Querschnittsgeometrie ab. Mittels Pultrusionstechnik können wie Abb. 2.16 zeigt eine Vielzahl von Querschnittsgeometrien hergestellt werden. Die

angegebenen Querschnittsabmessungen dienen dabei lediglich als typische Standartabmessungen.




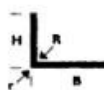



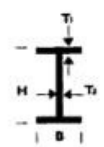

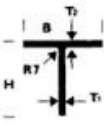

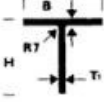
 D 2-48	 B=H 20-200 T 2-12 R 2&7 r 4
 d 5-107 D 8-114	 B 25-200 H 20-200 T 2-12 R 2&7 r 4
 H 30-50 B 30-50 d 16-30	 B 20-108 H 25-360 T <sub>1</sub> 2.5-18 T <sub>2</sub> 2.5-18
 B 8-65 H 8-51	 B 8-180 H 20-300 T <sub>1</sub> 2.5-18 T <sub>2</sub> 2.5-18
 T 8-65 B 20-300	 B 25-100 H 30-100 T <sub>1</sub> 3-8 T <sub>2</sub> 2-8
 B 25-100 H 30-100 T <sub>1</sub> 3-8 T <sub>2</sub> 2-8	 B 60-90 H 60-72 T <sub>1</sub> 6-11 T <sub>2</sub> 6-10

Abb. 2.16: Pultrusionsprofile, Grundformen [mm] [24].

Bei der Ausführung des Werkzeugs kann zwischen kernlosen Werkzeugen und Werkzeugen mit Kern zur Herstellung von Hohlprofilen unterschieden werden. Der Kern ragt dabei schwebend in das Profil des Werkzeuges und wird von den Verstärkungsstrukturen vollständig umschlossen. Die Werkzeuge sind meist mehrteilig ausgeführt um eine Reinigung der Innenflächen zu gewährleisten. Um eine hohe Endkonturgenauigkeit der hergestellten Profile über eine lange Produktionsdauer gewährleisten zu können, müssen die Werkzeugoberflächen eine hohe Abriebfestigkeit aufweisen. Die eingesetzten Materialien sind dabei meist oberflächengehärtete hochlegierte Stähle bzw. wird hartverchromt. Durch die Form und Beschaffenheit des Werkzeuges wird auch die benötigte Abzugskraft für die Herstellung der Profile bestimmt. Die Konturoberflächen sollten aus diesem Grund poliert sein, um die Reibung zwischen Verbundmaterial und Werkzeugkontur zu minimieren. Um duroplastische Matrixwerkstoffe während des Ziehvorgangs aushärten zu können, wird das

Werkzeug auf bis zu 160 ° erhitzt. Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Matrixwerkstoffen muss das Werkzeug im ersten Teilbereich beheizt werden, um eine gute Imprägnierung zu gewährleisten. Im weiteren Bereich des Werkzeugs muss der Verbund jedoch gekühlt werden, um die thermoplastische Matrix zum Erstarren zu bringen. Die Länge eines Standardziehwerkzeuges liegt zwischen 0.75 und 1.5 m Länge und wird von der resultierenden Abzugskraft, der notwendigen Verarbeitungsgeschwindigkeit und dem eingesetzten Matrixsystem bestimmt. Um die notwendigen Abzugskräfte auf den gesamten Verarbeitungsstrang aufbringen zu können, ist ein hoher Anteil an unidirektional ausgerichteter Faserrovings notwendig [15]. Die Hauptverstärkungsrichtung von Pultrusionsprofilen ist somit die Profilrichtung. Der realisierbare Faservolumenanteil beim Pultrusionsverfahren liegt bei 72 % [25]. Nach Verlassen des Ziehwerkzeuges wird das formstabile Profil der Abzugseinheit zugeführt.

Die Funktion der Abzugseinheiten ist das kontinuierliche Ziehen an dem ausgehärteten Profils um es durch das Ziehwerkzeug zu bewegen. Die typische maximale Abzugskraft einer Abzugseinheit liegt bei 6000 kg und mehr. Je nach benötigter Größe der Abzugskraft und Profilquerschnitt kann zwischen Raupenabzug, Bandabzug und Tandemabzug unterschieden werden. Um die benötigte Abzugskraft auf ein Profil aufbringen zu können, ist eine Mindestformstabilität des Profilquerschnitts erforderlich. Das muss schon in der Konstruktion des Profils berücksichtigt werden. Des Weiteren empfiehlt sich bei komplexen Querschnittsgeometrien eine Adaptierung der berührenden Abzugsflächen an der Abzugseinheit um eine möglichst große Fläche des Profils erfassen zu können. Diese Adaptierung kann beim Raupen- und Tandemabzug durchgeführt werden. Mittels Tandemabzug können die höchsten Abzugskräfte aufgebracht werden. Die Kraftübertragung erfolgt im Gegensatz zu den beiden anderen Abzugseinheiten lokaler und somit ist eine erhöhte Formstabilität des Profils erforderlich. Während beim Band- und Raupenabzug eine stationäre Einheit die Abzugskraft auf das Profil aufbringt, sind beim Tandemabzug zwei asynchron arbeitende Einheiten notwendig, um eine kontinuierliche

Abzugsgeschwindigkeit gewährleisten zu können. Bei der Verwendung von duroplastischer Matrix bewegen sich die standartmäßigen Abzugsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,02 - 3 m/min. bei Verwendung von thermoplastischer Matrix können Geschwindigkeiten von bis zu 20 m/min realisiert werden. Die Prozessgeschwindigkeiten sind dabei von der Aushärtezeit des Matrixsystems, der maximalen Wandstärken des Profils (vollständige Temperierung) der Komplexität des Querschnitts, dem Verstärkungsaufbau und der Werkzeuglänge abhängig [15].

Um die hergestellten Endlosprofile in den gewünschten Längen zu erhalten werden die Profile von der Abzugseinheit einer Schneidanlage zugeführt. In diesem Bereich werden die Profile abgelängt und an die Entnahme- bzw. Ablageeinheit weitergeführt.

#### Vor- bzw. Nachteile der Pultrusionstechnik

Pultrusionsprofile weisen aufgrund des hohen realisierbaren Faservolumenanteils (<72 %) und der prozessbedingten Hauptverstärkungsrichtung (Profilrichtung) sehr gute mechanische Eigenschaften in Profilrichtung auf. Querfestigkeiten bzw. –steifigkeiten werden von den Matriceigenschaften dominiert, da nur ein geringer Anteil an Querverstärkungsmaterialien wie Matten, Vliese, etc. im Profil verarbeitet werden können.

Durch den im Ziehwerkzeug stattfindenden Formgebungsprozess können Pultrusionsprofile mit sehr hoher Endkonturgenauigkeit und geringen Toleranzbereichen hergestellt werden.

Durch den kontinuierlichen Fertigungsprozess von Endlosprofilen zählt die Pultrusion zu den wirtschaftlichsten Verarbeitungsprozessen in der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen.

### 3 Technologiescreening und Bewertung

Der Bereich Technologiescreening und Bewertung befasst sich grundsätzlich mit den in Frage kommenden Verarbeitungsverfahren mit denen eine Herstellung der zugrundeliegenden GFK-Schlaufe prinzipiell möglich ist. Dabei werden aufgrund einer ersten Prozesssichtung nur Möglichkeiten im Bereich der Wickeltechnik näher untersucht. Diese unterscheiden sich aufgrund von den verwendeten Ausgangsmaterialien und der Prozessgestaltung. Grundlage für die Bewertung des jeweiligen Verfahrens ist dabei eine Erläuterung der realisierbaren Bauteileigenschaften und der dazu erforderlichen Prozessbedingungen. Für das Bauteil GFK-Schlaufe ergeben sich aus den Bauteilanforderungen folgende Bewertungskriterien:

Tabelle 3.1: Bewertungskriterien für die Wahl des optimalen Herstellungsprozesses

	Beschreibung	Kriterium/Sollwert
Faserorientierung	Anteil an Fasern mit Orientierung in Umfangsrichtung	>98 %
Faservolumenanteil	minimal erforderlicher Faservolumenanteil	>56 %
Gerichtete Fasern	definiert abgelegte Fasern, keine Faserondulationen	>98 %
Prozesskomplexität	niedrig - hoch	möglichst gering
Automatisierungspotential	niedrig - hoch	möglichst hoch
Produktionsvolumen	Realisierbarkeit des Produktionsvolumen	>300.000 Stk/Jahr
Materialkostenanteil	niedrig-hoch	möglichst gering

- **Faserorientierung**: Die Faserorientierung ist ausschlaggebend für das Bauteilverhalten. Da die GFK-Schlaufe ausschließlich mit einer Zugbeanspruchung belastet wird, müssen die Fasern am Bauteil in Umfangsrichtung orientiert sein.
- **Faservolumenanteil**: Wie die Faserorientierung, ist auch der Faservolumenanteil ausschlaggebend für die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Da die Zugeigenschaften der GFK-Schlaufe hauptsächlich von den Fasern bestimmt werden, ist ein möglichst hoher Faservolumenanteil anzustreben. Resultat ist ein beinahe gleichbleibendes Bauteilverhalten bei geringerem Harzbedarf.
- **Gerichtete Fasern**: Gerichtete Fasern im Bauteil bewirken eine gleichmäßige Belastung aller Filamente und somit eine optimale mechanische Performance.

- Prozesskomplexität: Die Prozesskomplexität beschreibt den erforderlichen Aufwand zur Abarbeitung eines Prozesses. Diese ist abhängig von verschiedenen Variablen wie bspw. der Anzahl an Prozessschritten [26].
- Automatisierungspotential: Bei der Herstellung von Faserkunststoffverbunden ist abhängig vom angewendeten Herstellungsprozess ein teilweise sehr hoher manueller Arbeitsaufwand notwendig. Prozesse mit einem hohen Automatisierungspotential bieten die Möglichkeit die Fertigungskosten in Form von Personalkosten zu senken.
- Produktionsvolumen: Das erforderliche Produktionsvolumen definiert den Mindestdurchsatz des Fertigungsprozesses.
- Materialkostenanteil: Die Materialkosten ergeben sich zum einen durch das eingesetzte Material (Faser und Matrix) aber auch durch die Lieferform. Dabei können etwas teurere Halbzeuge wie vorimprägnierten Fasern oder die Ausgangswerkstoffe selbst (Faser und Matrix) für die Verarbeitung herangezogen werden.

### **3.1 Übersicht über in Frage kommende Herstellungsprozesse**

Die im folgenden Teil näher ausgeführten Verarbeitungsprozesse eignen sich prinzipiell für die Herstellung von endlos-faserverstärkten Schlaufen. Kriterien für die Wahl des geeignetsten Prozesses sind dabei die Bauteilanforderungen und die Werkstoffauswahl.

#### **3.1.1 Prepreg/Autoklav Technologie**

##### Herstellbarkeit der GFK-Schlaufe

Die Herstellung der GFK-Schlaufe mittels Prepreg/Autoklav Verfahren ist prinzipiell möglich. Um die Bauteilkontur im Verarbeitungsprozess abbilden zu können, ist ein Kernwerkzeug notwendig, das die Innenkontur der Schlaufe abbildet und auf welchem die unidirektional verstärkten Prepreglagen abgelegt werden können. Um einen Selbsthemmungseffekt der Fasern im fertigen Bauteil erzielen zu können, sollten die Lagen nach



Möglichkeit endlos um das Werkzeug gewickelt werden, bis die geforderte Bauteildicke erreicht ist. Bei einer üblichen Prepreg-Schichtdicke von 0.4 mm wären 13 Wicklungen notwendig, um die Bauteildicke von 10 mm zu erhalten. Um den hohen mechanischen Anforderungen gerecht zu werden, sollten möglichst alle Fasern im fertigen Bauteil ideal in Umfangsrichtung mit gleicher Vorspannung ausgerichtet sein. Da die Viskosität des Matrixwerkstoffes während des Autoklavprozesses abnimmt, kann es durch den einwirkenden Druck und die daraus resultierende Kompaktierung der Schichten zur Faserondulationen am Bauteil (Abb. 1.4) kommen. Da dieser Kompaktierungseffekt beim manuellen Ablegen der Fasern nur sehr schwer zu vermeiden ist, wäre eine Adaptierung des Werkzeuges notwendig, um diesem Effekt entgegen zu wirken. Die Werkzeuggeometrie müsste sich demnach während dem Aushärteprozess bzw. Kompaktierung ausdehnen, um eine nachgeschaltete Ausrichtung der Fasern zu vollführen. Durch den Selbsthemmungseffekt würde eine solche Ausdehnung jedoch stark behindert werden, was Spannungsüberhöhungen in den inneren Schichten zur Folge hätte. Das Ziel der gleichmäßigen Faserspannung in der GFK-Schlaufe ist mit dem Prepreg/Autoklav Verfahren demnach nicht realisierbar.

### **3.1.2 Wickeltechnik**

#### Herstellbarkeit der GFK-Schlaufe

Grundsätzlich kann das Bauteil GFK-Schlaufe sowohl mit der Prepreg - wie auch mit der „nass“ Wickeltechnik gefertigt werden. Die Realisierung einer konstanten Faserspannung über der Bauteildicke ist mit der „nass“ Wickeltechnik besser zu realisieren, da beim Prepreg-Wickeln durch den erforderlichen Autoklavprozess und die damit verbundene Kompaktierung der Schichten ähnliche Probleme wie bei der Prepreg/Autoklav Technik zu erwarten sind. Um den notwendigen Faservolumenanteil im Bauteil gewährleisten zu können, werden die Fasern, wie schon erwähnt, unter einer bestimmten Vorspannkraft auf dem Werkzeug abgelegt. Die sich daraus ergebenden Normalkräfte, welche auf die schon abgelegten Schichten wirken, sind von der Krümmung des Bauteils am Ablegepunkt abhängig. Da die Schlaufe zwei gerade Bereiche aufweist, an denen keine resultierenden

Normalkräfte auftreten können, ist mit einem lokalen „Aufdicken“ des Bauteils in diesen Bereichen zu rechnen. Dieser Effekt könnte durch Abänderung der Werkzeuggeometrie verringert bzw. verhindert werden. Die Herstellung der GFK-Schlaufen kann dabei sowohl einzeln, wie auch durch Fertigung und Ablängen eines längeren Schlaufenbauteils gewährleistet werden. Höhere Bauteilfestigkeiten sind jedoch bei der Einzelfertigung zu erwarten.

### 3.1.3 Pultrusion

#### Herstellbarkeit der GFK-Schlaufe

Mittels Pultrusion könnte man sehr einfach und kostengünstig die Geometrie der GFK-Schlaufe abbilden. Probleme ergeben sich jedoch bei der notwendigen Faserorientierung im Bauteil. Dazu müsste das Ziehwerkzeug die gewünschte Form der Schlaufe haben und eine nachgeschaltete Schneideinheit würde die einzelnen Schlaufen mit der gewünschten Breite ablängen. Die Hauptverstärkungsrichtung wäre in diesem Fall jedoch genau um  $90^\circ$  verdreht und das Bauteil würde nur über einen Bruchteil der benötigten mechanischen Bauteileigenschaften verfügen.

Durch Änderung des Bauteilkonzeptes hin zu einer mehrschichtigen Schlaufe [7] kann das Bauteil jedoch zum einen mittels Pultrusionstechnik hergestellt werden, und weist zum anderen einige Vorteile im Bezug auf die mechanischen Eigenschaften auf.

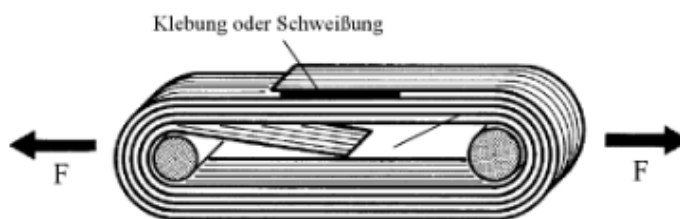


Abb. 3.1: Mehrschichtige Schlaufe [7].

Wie Abb. 3.1 zeigt, besteht die mehrschichtige Schlaufe aus vielen Einzelschichten, die im Bauteil nicht miteinander verbunden vorliegen. Der große Vorteil dieses Bauteilkonzeptes liegt in der Verringerung der Spannungsüberhöhungen bei dickwandigen Schlaufen. Voraussetzung dafür ist eine geringe Reibung zwischen den Einzelschichten um eine

gleichmäßige Lastverteilung auf alle Einzelschichten zu gewährleisten. Unter dieser Bedingung kann auch die Bauteilfestigkeit proportional mit der Anzahl der Schichten gesteigert werden, was bei einteiligen Schlaufen aufgrund der zunehmenden Spannungsüberhöhungen mit steigenden Bauteildicken nicht möglich ist. Da die Formstabilität des Bauteils nur unter Last gegeben ist und sich das mehrschichtige Bauteil „entschlaufen“ kann, muss das äußere Ende der Schlaufe mit der darunterliegenden Schicht verklebt werden.

Bei der Fertigung mittels Pultrusionstechnik wird im ersten Schritt ein unidirektional verstärktes Band mit rechteckigem Querschnitt durch ein Ziehwerkzeug gezogen. Die Abzugseinheit kann durch eine Rolle realisiert werden, auf die das fertige Halbzeug aufgewickelt wird. Für die Fertigung der mehrschichtigen Schlaufe wird nun das Halbzeug auf ein Schlaufenwerkzeug bis zum Erreichen der gewünschten Gesamtdicke aufgewickelt, abgeschnitten und das äußere Ende mit der darunter befindlichen Schicht verklebt. Eine Kombination beider Anlagen würde zum einen die Fertigungslinie verkleinern, zum anderen aber auch die Anforderungen an die Anlagensteuerung deutlich erhöhen. Das rotierende Schlaufenwerkzeug könnte dabei direkt als Abzugseinheit für den Pultrusionsprozess genutzt werden. Durch den kontinuierlichen Fertigungsprozess werden auch an die Schneid- und den Verklebungsanlage höhere Anforderungen im Bezug auf den Automatisierungsgrad gestellt. Zusätzlich müsste die Abzugseinheit ähnlich dem Tandemabzug in doppelter Ausführung vorhanden sein, durch abwechselndes Abziehen eine kontinuierliche Fertigung zu gewährleisten.

### **3.2 Bewertung der aufgelisteten Verfahren und Auswahl des geeigneten Herstellungsprozesses**

Wie aus Tabelle 3.2 zu entnehmen, weist die Nass-Wickeltechnik in einigen Bereichen klare Vorteile gegenüber den anderen Fertigungsverfahren auf.

Tabelle 3.2: Bewertung der Fertigungsprozesse

		Prepreg/Autoklav	Wickeltechnik	mehrschichtige Schlaufe
Faserorientierung	Fasern in Umfangsrichtung	100%	100%	100%
Faservolumenanteil	>56 %	✓	✓	✓
gerichtete Fasern	>98 %	X	✓	X
Prozesskomplexität	niedrig - hoch	niedrig	mittel	mittel-hoch
Automatisierungspotential	niedrig - hoch	niedrig	hoch	hoch
Produktionsvolumen	300.000 Stk/Jahr	erreichbar	erreichbar	erreichbar
Materialkostenanteil	niedrig - hoch	hoch	mittel	mittel

Bewertungskriterien der einzelnen Kategorien:

- Faserorientierung: im Bereich der Faserorientierung kann mit allen drei Varianten eine optimale Ausnützung des Materials erfolgen. Demnach können 100 % der Fasern in Umfangsrichtung abgelegt werden.
- Faservolumenanteil: Der erforderliche Faservolumenanteil ist mit den angeführten Prozessen realisierbar.
- Gerichtete Fasern: Durch den Kompaktierungseffekt beim Aushärten eines Prepreg-Bauteils kann es wie erwähnt zu Faserondulationen im Bauteil kommen. Beim Konzept der mehrschichtigen Schlaufe sind die Fasern im Band zwar stark orientiert und gerichtet, eine gleichmäßige Lastaufnahme der einzelnen Schichten erfolgt jedoch erst unter Last. Dieser Vorgang bewirkt Setzungen, die nur sehr schwierig kontrolliert werden können. Mit der Wickeltechnik werden die Fasern unter definierter Fadenspannung auf dem Bauteil abgelegt. Daraus ergibt sich ein sehr hoher Anteil an gerichteten Fasern und somit eine optimale Ausnützung des Bauteilquerschnittes.
- Prozesskomplexität: Der Prepreg/Autoklav Prozess weist aufgrund des verwendeten Ausgangsmaterials und der einfachen Prozessführung eine sehr geringe Komplexität auf. Die Nass-Wickeltechnik weist aufgrund der Faserimprägnierung und der erforderlichen Kompaktierung im parallelen Bereich der Schlaufe schon einen höheren Komplexitätsgrad auf. Der Pultrusionsprozess ist im Bezug auf die Prozesskomplexität vergleichbar mit der Wickeltechnik. Durch den erforderlichen zusätzlichen Konfektionierungsschritt zum Erstellen der mehrschichtigen Schlaufe steigt der Komplexitätsgrad weiter an.

- Automatisierungspotential: Durch den hohen Anteil an manueller Arbeit beim Legeprozess ist das Automatisierungspotential bei der Prepreg/Autoklav Technik im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren deutlich niedriger. Die Wickeltechnik wie auch die Pultrusionstechnik weisen generell einen hohen Automatisierungsgrad auf [27].
- Produktionsvolumen: Das erforderliche Produktionsvolumen von 300.000 Stk/Jahr kann mit allen 3 Varianten realisiert werden.
- Materialkostenanteil: Aufgrund des hohen manuellen Fertigungsanteils und dem hohen Verbrauch an Hilfsmaterialien weist der Prepreg/Autoklavprozess gegenüber den andern beiden Prozessen in den geforderten Stückzahlen klare Nachteile auf.

Mit der Prepreg/Autoklav Technik ist aufgrund der hohen Material- und Personalkosten bezogen auf die hohen Stückzahlen das Kostenziel von 4-8 € nicht erreichbar. Die mehrschichtige Schlaufe weist aufgrund ihres hohen Setzungspotentials gegenüber den anderen Varianten ein erhöhtes Risiko in der Umsetzung auf. Des Weiteren ist die Montage der mehrschichtigen Schlaufe sehr komplex. Mit der Wickeltechnik können die erforderlichen Stückzahlen relativ einfach bewältigt werden. Zudem weist der Prozess auch ein hohes Automatisierungs- und Optimierungspotential auf.

## 4 Herstellung eines seriennah gefertigten Prototypen

Wie unter Kapitel 2 gezeigt, eignet sich die Nass-Wickeltechnik am besten für die Serienfertigung der GFK-Schlaufe. Die Nass-Wickeltechnik hat aufgrund der geringeren Materialaufwände im Bereich großer Stückzahlen wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Prepreg-Wickelverfahren. Der Nachteil dieser Technik ist jedoch der zusätzliche Verarbeitungsschritt der Faserimprägnierung und das Manipulieren des imprägnierten und noch nicht ausgehärteten Bauteils. Im folgenden Kapitel werden wichtige Anlagenbestandteile einer Wickelmaschine näher beschrieben.

### 4.1 Maschinenbestandteile einer Wickelanlage und deren Aufgaben

Zur Herstellung der GFK-Schlaufe ist die einfachste Form einer Wickelmaschine mit nur einem Rotationsfreiheitsgrad, der Wickelachse, ausreichend. Voraussetzung dafür ist eine der Bauteilbreite entsprechende Ablegebreite. Eine Wickelanlage besteht im Wesentlichen aus den folgenden Bestandteilen:

- Spulenzlager: Bereich in dem die Rovingspulen gelagert werden.
- Brems- und Zugspannungsmesseinheit: Aufbringen und Messen der Fadenspannung.
- Führungen und Aufspreitzer: Einheiten zur Führung und zum Aufspreitzen des Rovings um ein definiertes Ablegen und eine gute Imprägnierung zu gewährleisten.
- Imprägniereinheit: Tauch- oder Walzenimprägnierung
- Harzabstreifer: Teil der Imprägniereinheit der überschüssiges Harz und Lufteinschlüsse aus dem Roving drückt.
- Wickeldorn: Werkzeug auf dem der Faserkunststoffverbund aufgewickelt wird. Nach dem Aushärteprozess muss das Bauteil entformt werden können. Voraussetzung dafür ist ein eingetrenntes oder selbsttrennendes Werkzeug.

- Antrieb: Rotation des Wickelwerkzeuges mit definierter Geschwindigkeit.
- Aushärteeinheit: Je nach Härtersystem findet der Aushärteprozess unter Raumtemperatur oder unter höheren Temperaturen statt. In beiden Fällen muss das Bauteil jedoch mit geringer Geschwindigkeit rotiert werden, um eine Verlagerung des Harzes aufgrund der wirkenden Schwerkraft zu vermeiden.

Bei Faserkunststoffverbunden werden die mechanischen Eigenschaften neben der Zusammensetzung des Verbundwerkstoffes (Faserwerkstoff, Matrixwerkstoff) hauptsächlich von Faservolumenanteil, der Faserorientierung und vom Porositätsanteil im Bauteil definiert. Für den Herstellungsprozess der GFK-Schlaufe sind sowohl Faservolumenanteil, als auch Faserorientierung aufgrund der vorliegenden Bauteilanforderungen definiert. Um die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften auch im fertigen Bauteil vorzufinden, ist ein möglichst geringer Anteil an Lufteinschlüssen im Bauteil notwendig. Grundlage für die Minimierung dieser Fehlstellen ist eine funktionierende Imprägnierung der Verstärkungsstruktur. Dadurch wird der in das Bauteil eingebrachte Porositätsanteil schon beim Ablegen der Fasern auf dem Wickeldorn sehr gering gehalten. Sowohl bei der Tauchtränkung als auch bei der Walzentränkung kann durch Aufspreizen des Rovings vor der Imprägniereinheit, sowie durch die Harzabstreifereinheit gezielt die Imprägnierungsqualität beeinflusst werden.

Um den Anteil an Lufteinschlüssen zwischen den einzelnen abgelegten Schichten verringern zu können, ist eine definierte Fadenspannung bzw. Kompaktierungskraft notwendig. In den parallelen Bereichen der GFK-Schlaufe kann durch die Fadenspannung keine Kompaktierungswirkung erzielt werden. Aus diesem Grund ist in diesem Bereich mit einem sehr hohen Anteil an Lufteinschlüssen zu rechnen. Um diesen Anteil verringern zu können, muss das abgelegte Fasersubstrat in diesem Bereich mit einer Kompaktierungseinheit zusätzlich verdichtet werden. Die Kompaktierungseinheit kann bspw. mit einer Anpressrolle realisiert werden.

## 4.2 Konstruktion und Anlagenbau

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1 angeführten Anlagenbestandteile und deren Aufgaben und in Anlehnung an bestehende Wickelmaschinen wird eine Prototypenanlage entwickelt. Zur Herstellung der Bauteile wird ein S2-Glasfaser-Roving der Firma AGY mit 2033 tex und einer Faserfestigkeit von 4,8 GPa verwendet. Faserfestigkeit und Rovingquerschnitt definieren das erforderliche Motordrehmoment des Antriebes. Während des Wickelprozesses sollte die Faserspannung im Roving 20-25 % der Faserfestigkeit nicht überschreiten, da ansonsten mit Schädigungen bis hin zum Rovingversagen zu rechnen ist. Grund für diese Festigkeitsreduktion sind Fehlstellen in den einzelnen Filamenten. Jedes Filament weist dabei eine Vielzahl an Fehlstellen auf, die zu einer Reduktion der Faserfestigkeit und somit Abweichung von der theoretischen Festigkeit führt. Die Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen steigt mit der Größe des belasteten Volumens bzw. der Einklemmlänge. Der Zusammenhang zwischen Faserfestigkeit und Einklemmlänge wird mit der Weibull-Statistik beschrieben [11].

Der Rovingquerschnitt errechnet sich nach:

$$A_{Roving} = \frac{Rovingmasse}{Dichte} \quad (4)$$

wobei die Rovingmasse in tex oder g/m und die Dichte in g/m<sup>3</sup> angegeben wird. Der angeführte S2-Glas-Roving weist eine Querschnittsfläche von 0,782 mm<sup>2</sup> auf. Mittels angegebenen Faserfestigkeit und der maximal erlaubten Faserbelastung lässt sich die maximale Fadenspannung und mittels Werkzeuggeometrie das erforderliche Motordrehmoment errechnen.

$$M = \sigma_{red} \cdot A_{Roving} \cdot l \quad (5)$$

Dabei ist  $\sigma_{red}$  20 % der reduzierte Faserfestigkeit,  $l$  der am Wickelwerkzeug auftretende maximale Hebelarm zur Rotationsachse und  $M$  das erforderliche Motordrehmoment. Bei der synchronen Wicklung von zwei Rovingsträngen muss daher die Motorleistung mindestens 213 Nm betragen. Der erforderliche Drehzahlbereich wird maßgeblich durch die Imprägniereinheit bestimmt. Für die Prototypenanlage soll mit dem Antrieb ein Drehzahlbereich



von 10-60 U/min abgedeckt werden. Der ausgewählte Asynchronmotor verfügt über eine Nenndrehzahl von 1400 U/min und eine Leistung von 0,75 kW. Das angebaute Getriebe weist ein Übersetzungsverhältnis von 1:31,5 auf. Die daraus resultierende Nenndrehzahl des Wickeldorns beträgt 44 U/min bei einer Versorgungsfrequenz von 50 Hz. Durch Ansteuerung des Motors über einen Frequenzumformer ist eine stufenlose Regelung der Drehzahl auch bei niedrigeren Motordrehzahlen möglich. Dabei muss lediglich auf eine Überhitzung des Motors geachtet werden. Bei sehr niedrigen Drehzahlen sollte der Motor aus diesem Grund extern gekühlt werden.

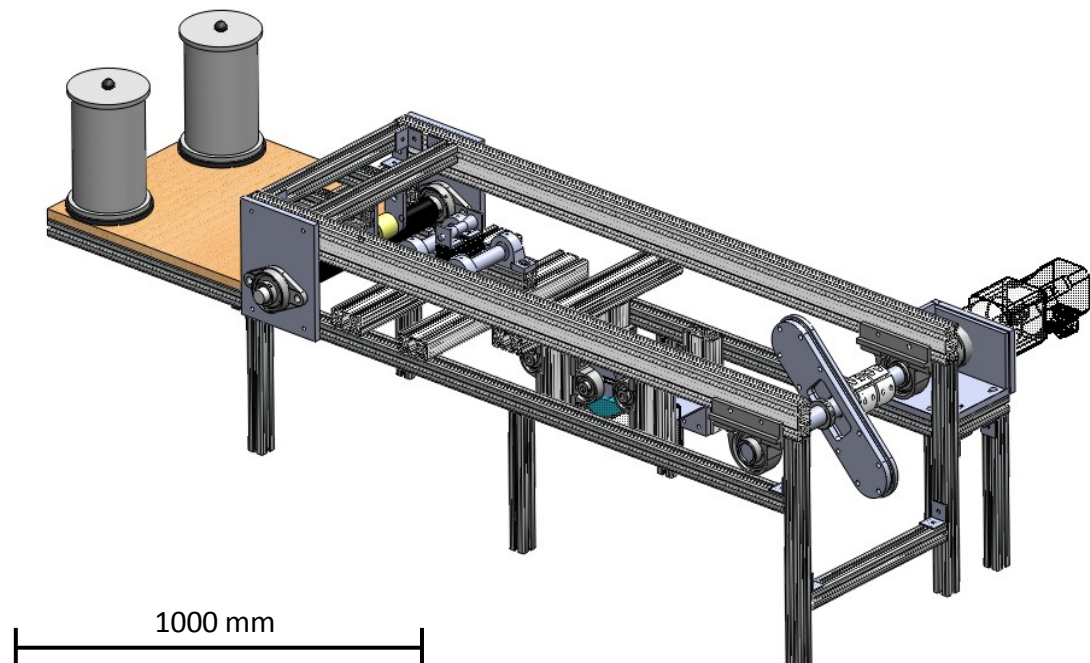


Abb. 4.1: Konstruktion der gesamten Prototypenanlage.

Abb. 4.1 zeigt die Konstruktion der Prototypenanlage zur Herstellung der GFK-Schleife. Die Anlage verfügt über ein Spulenlager, das in dieser Darstellung noch mit vertikal gelagerten Spulen versehen ist, einer Bremseinrichtung zur Erhöhung der Fadenspannung, eine Zugspannungsmesseinheit, eine Imprägnierungseinheit, Harzabstreifer, ein Wickelwerkzeug und ein Antriebssystem. Abb. 4.2 zeigt im Detail den Aufbau der Bremseinheit (links) und der Zugspannungsmesseinheit (rechts).

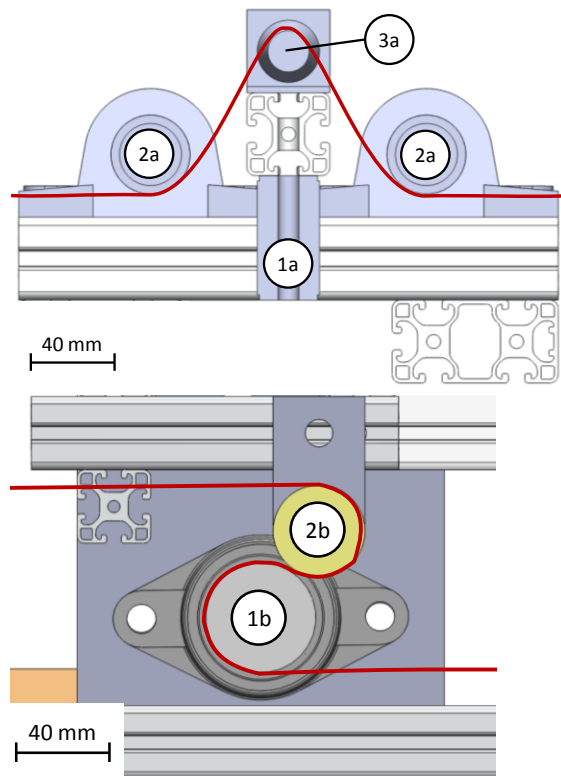


Abb. 4.2: Detail Prototypenanlage: Querschnitt Zugspannungsmesseinheit (links), Querschnitt Bremseinheit (rechts).

Die Zugspannungsmessung erfolgt über drei Rollen, wobei die mittlere Rolle (3a) auf einer 500 N Kraftmessdose (1a) befestigt ist. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse kann die Zugspannung im Roving (rot) durch die gemessene Normalkraftkomponente  $F_{KMD}$  bestimmt werden [15].

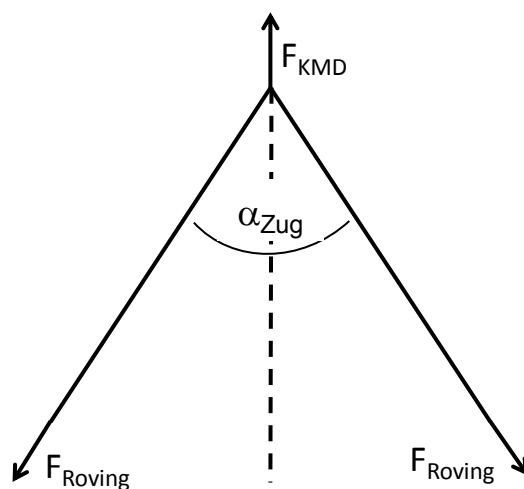


Abb. 4.3: Darstellung der wirkenden Kräfte in der Zugspannungsmesseinheit.

Die Zugspannung im Roving  $F_{\text{Roving}}$  errechnet sich nach

$$F_{\text{Roving}} = \frac{\frac{F_{\text{KMD}}}{2}}{\cos\left(\frac{\alpha_{\text{Zug}}}{2}\right)}, \quad (6)$$

wobei  $F_{\text{KMD}}$  die gemessene Kraft an der Kraftmessdose in vertikaler Richtung ist und  $\alpha$  der Winkel im dargestellten Kräftedreieck, der vom Rovingstrang aufgespannt wird.

Um die Bremskraft durch Reibung auf den Roving übertragen zu können, wird dieser über eine Kunststoffrolle (2b) so umgelenkt, dass die Berührungslänge zwischen gebremster gummibeschichteter Rolle (1b) und dem Roving (rot) möglichst lange ist. Mit der Bremseinheit kann die Bremskraft in 6 Stufen zwischen 80 und 170 N eingestellt werden. Dies wird mit einem durch eine Feder vorgespannten Reibpartner aus Kunststoff gewährleistet. Die 6 Stufen können dabei über die Vorspannung der Feder aufgebracht werden. Um die verschiedenen Bremsstufen charakterisieren zu können, werden Referenzmessungen durchgeführt. Dabei werden die Faserstränge über eine Kraftmessdose gleichmäßig durch die Wickelanlage gezogen. Abb. 4.4 zeigt die gemessenen Kraftniveaus an der Zugspannungsmesseinheit und an der Abzugskraftmessdose.

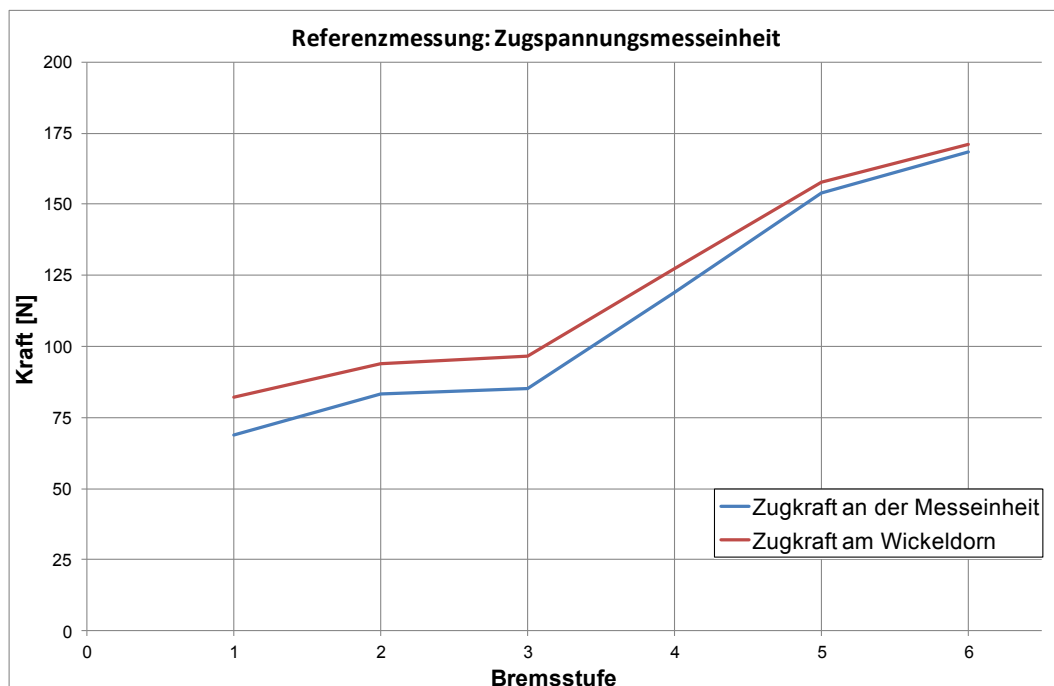


Abb. 4.4: Referenzmessung: Zugspannungsmesseinheit.

Da der Roving nach der Zugspannungsmesseinheit durch die Imprägnierstrecke und die Harzabstreifer geführt wird, ergeben sich die dargestellten Unterschiede in den Messsignalen. Des Weiteren zeigt die Referenzmessung, dass aufgrund der über Reibung eingebrachten Bremskraft kein linearer Zusammenhang zwischen Bremsstufe und resultierender Bremskraft erzielt werden kann. Eine Veränderung der Bremskraft konnte auch nach der Produktion von 15 Schlaufen nicht festgestellt werden. Regelmäßige Aufzeichnungen des Kraftverlaufes während der Schlaufenproduktion zeigen mögliche Verschleißerscheinungen an der Bremseinheit und daraus resultierende Bremskraftveränderungen.

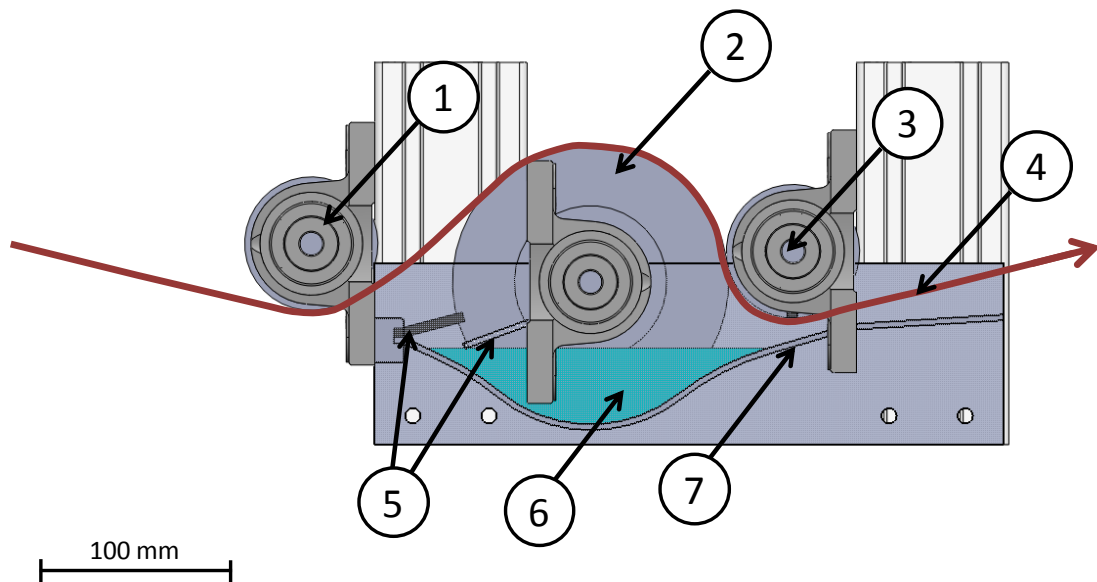


Abb. 4.5: Schnittansicht durch die Konstruktion der Imprägniereinheit (1 Umlenkwalze, 2 Imprägnierwalze, 3 Kompaktierwalze, 4 Roving, 5 Harzabstreifer, 6 Harzbad, 7 Bodenplatte des Harzbades).

Abb. 4.5 zeigt die Konstruktion der Walzenimprägnierung. Dabei nimmt die Imprägnierwalze mit einem Durchmesser von 150 mm einen Harzfilm aus dem Harzbad auf. Der Roving wird nun in radialer Richtung auf einer Länge von rund 120 mm mit dem Harz von unten durchtränkt. Bevor der Faserstrang von der Imprägnierwalze wieder frei gegeben wird, wird das überschüssige Harz mit einer zweiten anliegenden Kompaktierungswalze von der Oberseite isochor in den Roving gepresst. Das überschüssige Harz wird an den Flanken der Imprägnierwalze mittels elastischer Abstreiferplatten

wieder an das Harzbad zurückgeführt. Um das Entfernen von vernetzten Harzresten von der Imprägniereinheit zu erleichtern, werden sowohl das Harzbad wie auch die Walzen aus Polypropylen hergestellt. Um den Harzbedarf bei der Herstellung von geringen Stückzahlen zu verringern, wird die Geometrie der Harzbadbodenplatte an die Geometrie der Imprägnierwalze mit einem Offset von 3 mm angepasst. Dadurch muss nur eine geringe Harzmenge nach der Fertigung entsorgt werden.

Zum Abstreifen des am Roving verbleibenden überschüssigen Harzes wird der Roving nach der Imprägniereinheit über eine Abstreifereinheit gezogen. Abb. 4.6 zeigt die Konstruktion der Abstreifereinheit.

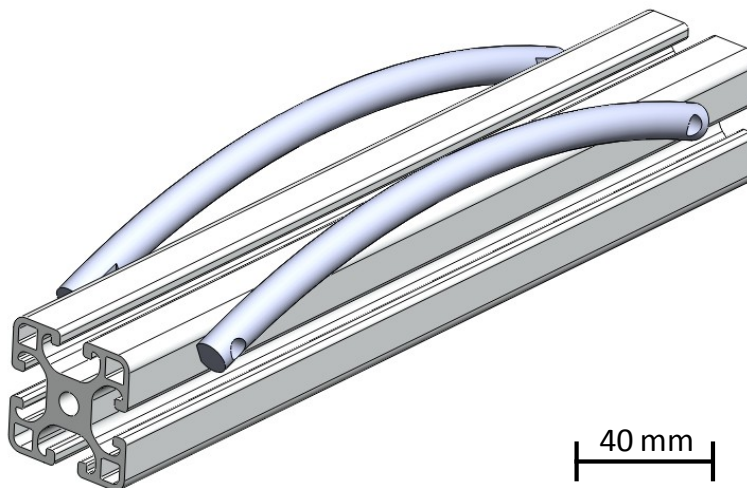


Abb. 4.6: Konstruktion: Abstreifer.

Das durch den Abstreifer abtropfende überschüssige Harz wird in einem Behälter gesammelt und kann anschließend der Imprägniereinheit wieder zugeführt werden. Bei einem kontinuierlichen Fertigungsprozess kann das abtropfende Harz auch über eine Rutsche dem Harzbad wieder automatisch zugeführt werden. Der getränkte Rovingstrang wird im ersten Schritt an der konvexen Seite der ersten gekrümmten Welle vorbeigeführt. In diesem Bereich wird der Roving durch die Krümmung weiter aufgespreizt. Dies führt zu einer Erhöhung der Rovingbreite und zu einer Verbesserung der Imprägnierung. An der zweiten gekrümmten Welle wird das Rovingband an der konkaven Seite vorbeigeführt, was wiederum zu einer Verringerung der

Bandbreite führt. Durch Änderung der Position der gesamten Abstreifereinheit kann die durch den Rovingstrang wirkende Normalkraft auf die einzelnen Wellen variiert werden. Dadurch kann die Rovingbreite noch geringfügig beeinflusst werden. Die Imprägnierungsqualität bzw. –geschwindigkeit kann durch eine weitere Abstreifereinheit vor der Imprägniereinheit noch weiter erhöht werden. Dabei werden die Rovingstränge nur auf den konvexen Seiten der beiden Wellen vorbeigeführt, was eine Verbreiterung der Stränge schon vor der Imprägniereinheit zur Folge hat.

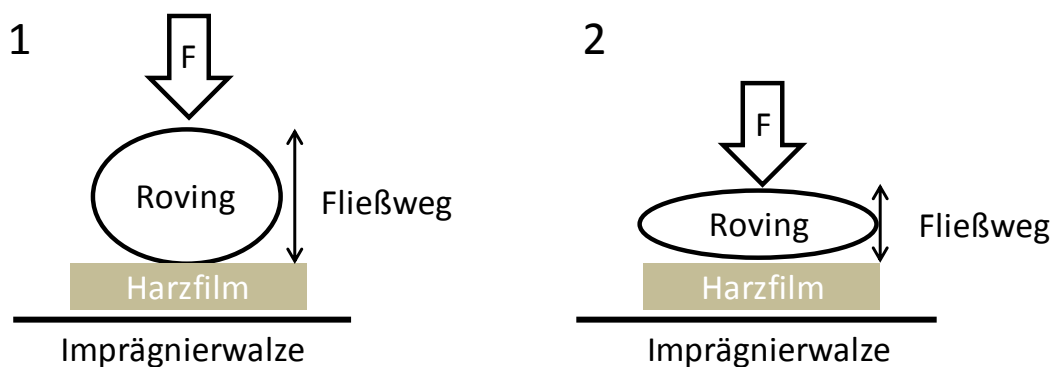


Abb. 4.7: Einfluss der Rovingbreite auf die Faserimprägnierung (1 nicht aufgespreizter Rovingquerschnitt, 2 aufgespreizter Rovingquerschnitt).

Die dadurch bedingten verringerten Fließwege bewirken eine schnellere Imprägnierung des Rovings. Abb. 4.7 veranschaulicht diesen Effekt. Die treibende Kraft für die Faserimprägnierung ist neben der Kapillarwirkung die durch die Fadenspannung wirkende Normalkraft  $F$  auf den Harzfilm (vgl. [28]).

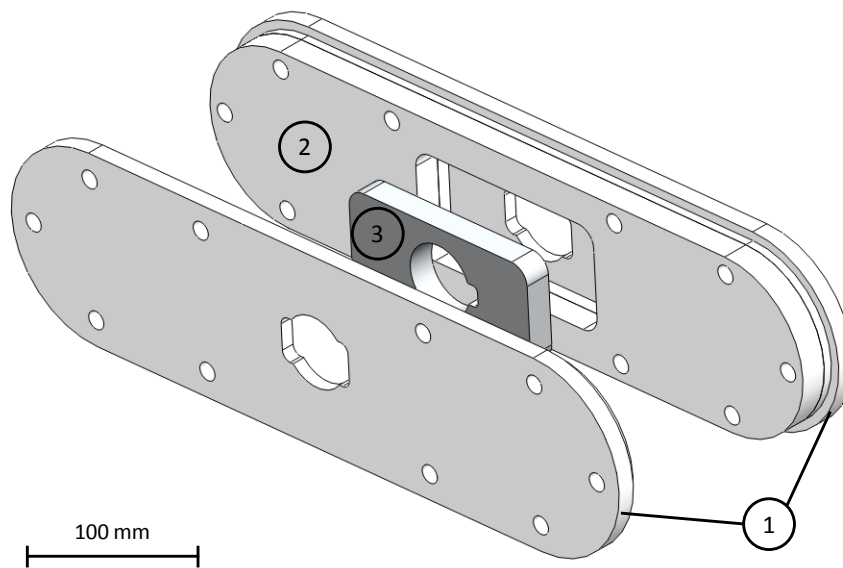


Abb. 4.8: Konstruktion des Wickelwerkzeuges (1 Außenteil des Werkzeuges, 2 Mittelteil des Werkzeuges, 3 Insert für die Kraffteinleitung).

Aufgrund der guten selbsttrennenden Eigenschaften wird auch das Wickelwerkzeug aus Polypropylen hergestellt. Die Kraffteinleitung an der Antriebswelle, die mittels Passfeder realisiert wird, muss jedoch mittels Insert aus Aluminium realisiert werden, um lokale plastische Verformungen und somit eine lokale Beschädigung des Werkzeuges zu vermeiden. Der Zusammenbau funktioniert über 10 Durchgangsschrauben, die im Umfangsbereich des Werkzeuges gleichmäßig verteilt sind. Für die Entformung werden im ersten Schritt die Durchgangsschrauben gelöst und die beiden Außenteile des Werkzeuges entformt. Der Mittelteil des Werkzeuges kann nun mit geringem Kraftaufwand gleichmäßig aus der Schlaufe gedrückt werden.

Abb. 4.9 zeigt die Antriebseinheit und den Bereich des Wickelwerkzeuges. Dabei wird das Wickelwerkzeug im ersten Schritt auf den Wickeldorn gesteckt. Die Kraftübertragung funktioniert wie schon erwähnt über eine Passfederverbindung zwischen Wickeldorn und –werkzeug.

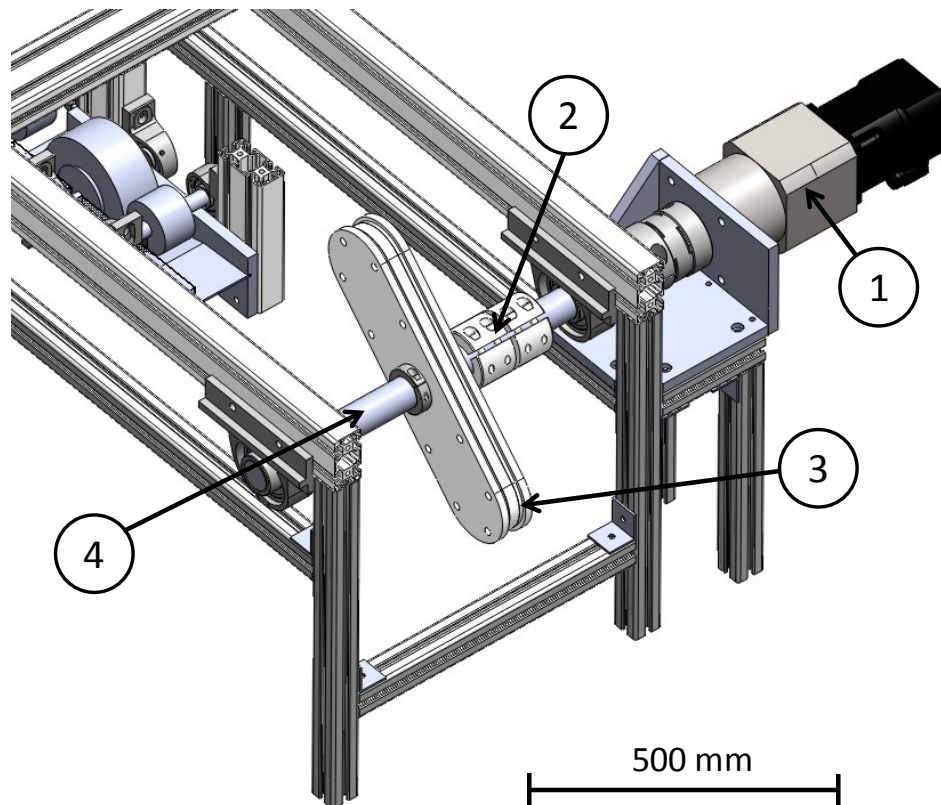


Abb. 4.9: Kraftübertragung und Montage des Wickeldorns (1 Getriebemotor, 2 Starrkupplung, 3 Wickelwerkzeug, 4 Wickeldorn).

Die Kraftübertragung auf den Wickeldorn wird über eine Starrkupplung mittels Reibschluss realisiert. Die Starrkupplung überträgt dabei sowohl die auftretenden Drehmomente, als auch das resultierende Biegemoment aufgrund der Fadenspannung.



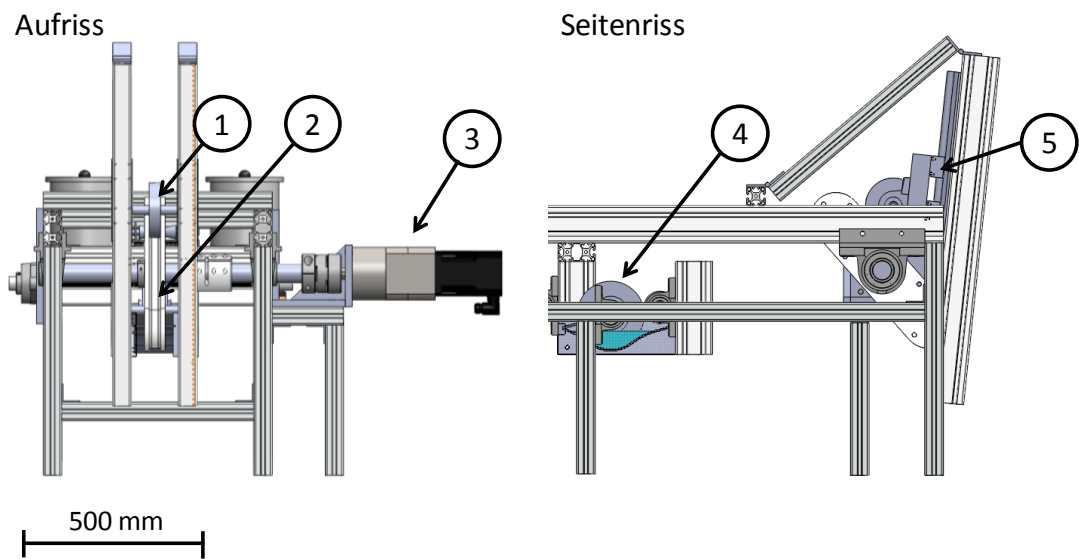


Abb. 4.10: Anpressrolle zur Substratverdichtung am Werkzeug (1 Anpressrolle, 2 Wickelwerkzeug, 3 Antriebseinheit, 4 Imprägniereinheit, 5 Linearführung).

Um eine bessere Verdichtung der einzelnen Schichten vor allem im parallelen Bereich der Schlaufe zu gewährleisten, muss das abgelegte Fasersubstrat mit einer Anpressrolle zusätzlich kompaktiert werden. Die Anpresskraft resultiert dabei aus der Gewichtskraft des Anpresssystems (Anpressrolle, Lager, Anbauplatte und Linearschlitten). Die Linearbewegung des Systems wird durch die Rotation des Wickelwerkzeuges induziert und muss somit nicht separat gesteuert werden. Nachteil des Systems ist die Massenträgheit bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten und die Abhängigkeit der Anpresskraft von der Lage des Wickelwerkzeuges. Abb. 4.11 zeigt diese Abhängigkeit, wobei sich die Anpresskraft im parallelen Bereich der Schlaufe nach

$$N = \frac{m_{Anpress} \cdot g}{\sin(\beta)} \quad (7)$$

errechnet. Dabei ist  $m$  die Masse des Anpresssystems,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $\beta$  der Rotationswinkel des Wickelwerkzeuges. Im Radienbereich der Schlaufe wird der für die Berechnung der Anpresskraft benötigte Rotationswinkel  $\beta_1$  nach

$$\beta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{\frac{lL}{2} \cdot \sin(90 - \beta)}{R} \right) \quad (8)$$

berechnet. Dabei ist  $L_{II}$  die Länge des parallelen Bereiches der Schlaufe (300 mm) und  $R$  der Schlaufenradius (50 mm).

Für die Berechnung werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- keine Reibungsverluste
- Anpressrolle als Punktmasse
- keine dynamischen Effekte

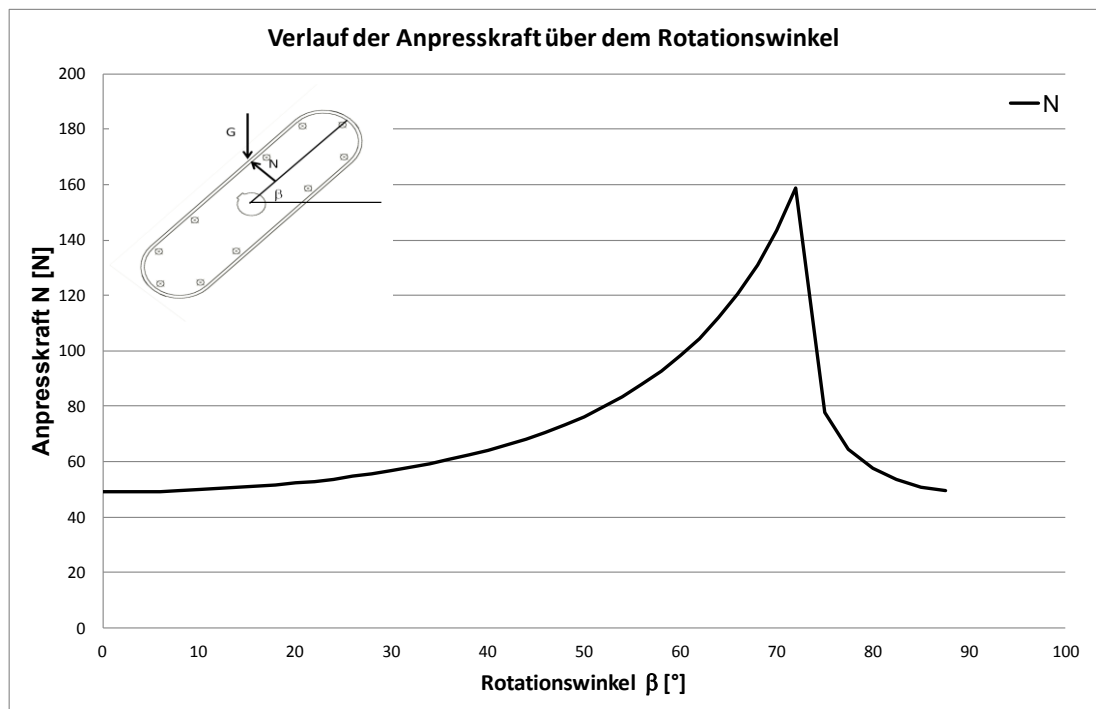


Abb. 4.11: Verlauf der Anpresskraft über dem Rotationswinkel ( $0^\circ < \beta < 71,57^\circ$ ;  $71,57^\circ < \beta < 90^\circ$ ).

Das Kraftmaximum liegt wie zu erwarten am Beginn des Schlaufenradius bei einem Winkel von  $71,57^\circ$ . Bei weiterer Erhöhung des Rotationswinkels fällt die resultierende Anpresskraft wieder ab.

### 4.3 Prototypenproduktion

Die Prototypen werden im ersten Schritt mit einer Wickelgeschwindigkeit von 7,3 U/min mit den oben genannten beiden 2033 tex Rovingsträngen ohne Anpressrolle gewickelt. Dadurch sind 90 Wicklungen erforderlich um den erforderlichen Anteil an Glasfasern im Bauteil zu realisieren. Das entspricht einer reinen Faserquerschnittsfläche von  $140 \text{ mm}^2$ . Durch die geringe

Kompaktierung im parallelen Bereich der Schlaufe ist ein Aufdicken des Bauteils in diesem Bereich zu beobachten.

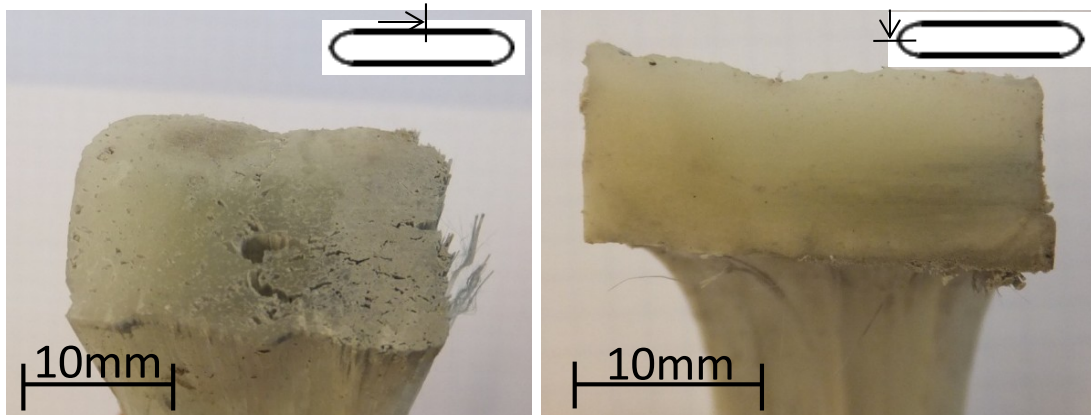


Abb. 4.12: Schlaufenquerschnitt.

Abb. 4.12 zeigt die Querschnittsflächen einer fertig ausgehärteten GFK-Schlaufe. Die linke Abbildung zeigt den Querschnitt in der Mitte des parallelen Bereiches der Schlaufe mit einer Vielzahl an Luftporenschlüssen. Im Gegensatz dazu zeigt die rechte Abbildung den Querschnitt in der Mitte des Schlaufenradius. In diesem Bereich sind aufgrund der hohen Kompaktierungskräfte optisch keine Lunker erkennbar. Um die Auswirkungen der Anpressrolle auf den Lunkeranteil darstellen zu können, werden weitere Prototypen unter Einsatz der Anpressrolle gefertigt.



Abb. 4.13: Prototypenanlage: Bereich Anpressrolle.

Abb. 4.13 zeigt die Realisierung dieser Kompaktierung an der Prototypenanlage mittels Anpressrolle. Für die zerstörungsfreie Überprüfung des Faservolumenanteils (FVA) entlang der Schlaufenlänge werden sämtliche Prototypen an den in Abb. 4.14 markierten Messpositionen geometrisch vermessen. Die Positionen werden dabei fortlaufend von links nach rechts beginnend von 1 bis 11 nummeriert.

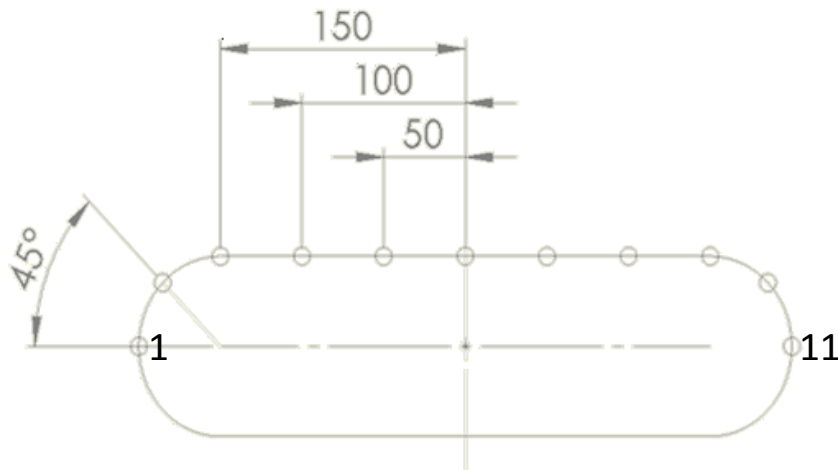


Abb. 4.14: Messpositionen an der Schlaufe.

Abb. 4.15 zeigt den Einfluss der Kompaktierungsrolle (KR) auf den Verlauf des lokalen Faservolumenanteils (FVA) entlang des Bauteils. Wie zu erwarten ändert sich der FVA im Bereich der Radien durch den Einsatz der Kompaktierungsrolle kaum. Im parallelen Bereich der Schlaufe ist jedoch eine deutliche Erhöhung des FVA von ~12 % und mehr zu bemerken.

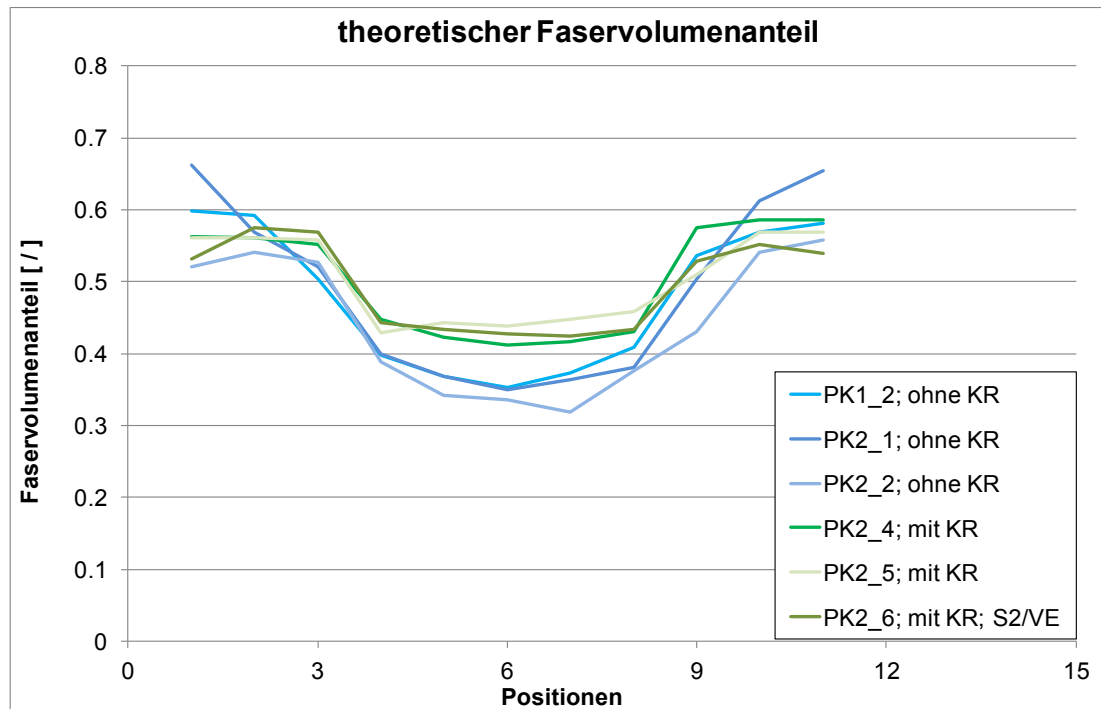


Abb. 4.15: Verlauf des Faservolumenanteils.

Abb. 4.16 (links) zeigt die deutliche Verringerung des Porenanteils im parallelen Bereich der GFK-Schlaufe durch den Einsatz der Kompaktierungsrolle.

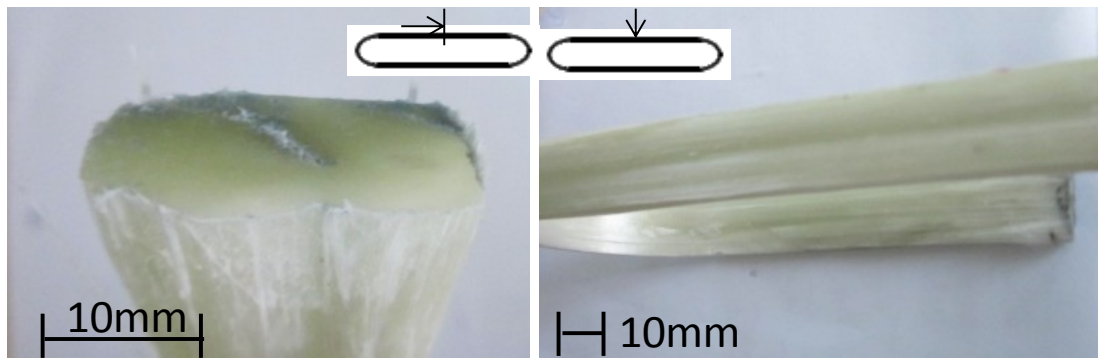


Abb. 4.16: Prototypenschlaufe hergestellt mit Kompaktierungsrolle.

Durch den geringeren Porenanteil reduziert sich die durchschnittliche Bauteildicke in der Schlaufenmitte von durchschnittlich 15 mm auf 12 mm. Abb. 4.16 (rechts) zeigt die Außenfläche einer aufgestellten durchtrennten GFK-Schlaufe im parallelen Bereich. Da die abgelegten beiden Rovingstränge nicht exakt auf die Bauteilbreite aufgespreizt werden können, bildet sich in der Mitte des Bauteils eine harzreiche Zone. Diese zeichnet sich

als dunkle Rille entlang der Bauteilmitte ab. Die im Querschnitt verbleibenden Lufteinschlüsse sind in diesem Bereich zu finden, da die Kompaktierungsrolle hier aufgrund der geringeren lokalen Bauteildicke die Luft nicht aus dem Substrat verdrängen kann. Durch die Verwendung von mehreren Rovingsträngen mit einer geringeren Filamentanzahl können die Faserstränge leichter auf die gewünschte Bauteilbreite angepasst werden. Ein weiterer Grund für den verbleibenden Lunkeranteil ist das Anpressen der Rolle mittels Schwerkraft. Dadurch ergibt sich eine inhomogene Kompaktierung des abgelegten Fasersubstrates entlang des Schlaufenumfanges aufgrund von dynamischen Effekten. Eine kraftgesteuerte Kompaktierung könnte den Lunkeranteil entlang des Bauteilumfanges noch weiter verringern und die Bauteilqualität somit weiter steigern.

#### **4.4 Maximale Prozessgeschwindigkeit und Beschreibung der Auswirkungen auf die Qualität des Bauteils**

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, bewegt sich der Bereich typischer Wickelgeschwindigkeiten bis zu einer Abzugsgeschwindigkeit von 100 m/min [20]. Die Wickelgeschwindigkeit wird hauptsächlich von der Imprägnierleistung der Anlage bestimmt. Bei der Herstellung der GFK-Schlaufe werden die Rovingstränge bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit des Wickeldorns aufgrund der Schlaufengeometrie mit stark variierenden Abzugsgeschwindigkeiten durch die Imprägnierung gezogen. Resultat ist eine variierende Imprägnierungsqualität entlang des Rovings. Um eine gleichmäßige Imprägnierleistung der Anlage zu erhalten, sollte die Wickelanlage in der Serienfertigung mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit betrieben werden. Des Weiteren kann somit eine gleichbleibende Faserspannung realisiert werden. Das Verstärkungsmaterial kann dadurch schonender auf dem Wickeldorn abgelegt werden.

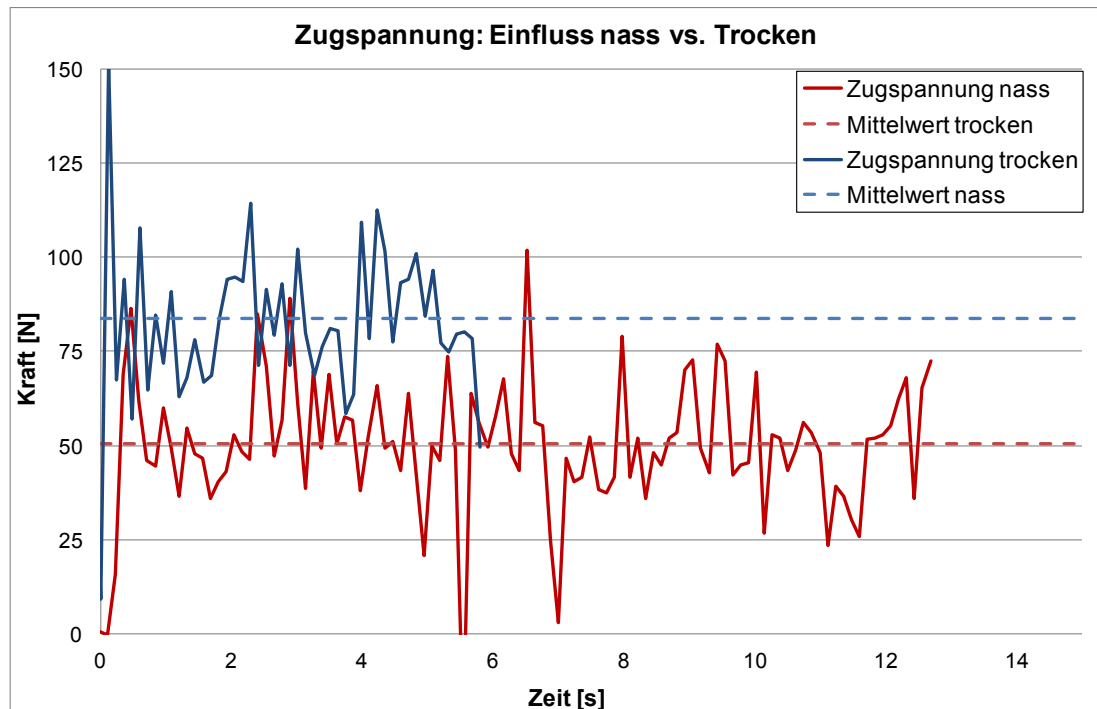


Abb. 4.17: Zugspannung: Einfluss nass vs. trocken.

Abb. 4.17 zeigt die mit der Zugspannungsmesseinheit aufgezeichnete Abzugskraft mit einer Drehzahl von 0,22 Hz beim Wickeln von zwei 12 k S-Glas Rovings. Der Unterschied in den Kraftniveaus resultiert aus der geringeren Reibung an den Harzabstreifern bedingt durch den Matrixwerkstoff. Die mittlere Abzugskraft beträgt beim trockenen Fasermaterial 83,7 N, beim getränkten 50,4 N. Das entspricht einer Verringerung der Zugspannung von 40 % durch die Imprägnierung. Werden die beiden Kraftsignale auf den Rovingquerschnitt bezogen, so ergeben sich Zugspannungen im Roving von 53,5 bzw. 32,2 MPa. Die Rovingfestigkeit von 4890 MPa wird demnach zu 1,11 bzw. 0,67 % ausgenützt. Aufgrund dieser geringen Belastung ist demnach mit keiner Faserschädigung zu rechnen.

Des Weiteren weisen beide Kraftsignale starke Schwankungen auf. Diese sind zum einen auf die Geometrie des Wickelwerkzeuges zurückzuführen und zum anderen auf die Variation der Reibungskräfte an den Harzabstreifern durch die räumliche Veränderung des Ablegepunktes am Wickelwerkzeug. In Abb. 4.18 sind schematisch zwei Positionen des Wickelwerkzeuges, sowie der Faserstrang und der Harzabstreifer dargestellt.

Je nach Position verändert sich der Umschlingungswinkel  $\alpha$  und somit die resultierende Reibkraft am Harzabstreifer.

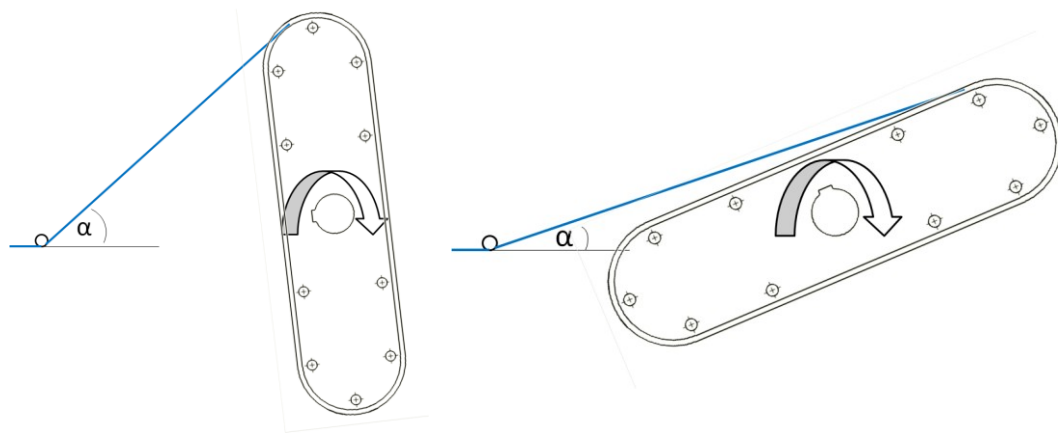


Abb. 4.18: Variation des Ablegewinkels.

Zur Bestimmung der maximalen Wickelgeschwindigkeit werden jeweils 2 Bauteile pro Geschwindigkeitsstufe hergestellt. Die eingestellte Wickelgeschwindigkeit wird beginnend mit einer Drehzahl von 9 U/min jeweils um 1.8 U/min gesteigert bis die Imprägnierungsqualität deutlich abfällt. Das verwendete Vinylesterharz weist laut Hersteller eine Viskosität von 200-350 mPas unter 25 °C auf. Das Harzsystem wird peroxidisch unter Raumtemperatur vernetzt und weist unter der Zugabe von 2 % Härter und einer Temperatur von 25 °C eine Topfzeit von 33-55 min auf. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, sind bei der Verwendung von zwei 2033 tex Rovingsträngen 90 Wicklungen notwendig, um den erforderlichen Faserquerschnitt von 140 mm<sup>2</sup> im Bauteil zu realisieren. Der Gesamt-Soll-Querschnitt des porenfreien Bauteils beträgt 250 mm<sup>2</sup>. Über die Dichte der Fasern (2600 kg/m<sup>3</sup>) und die Dichte des Vinylesterharzes (1050 kg/m<sup>3</sup>) errechnet sich eine theoretische Bauteilmasse von 454 g.



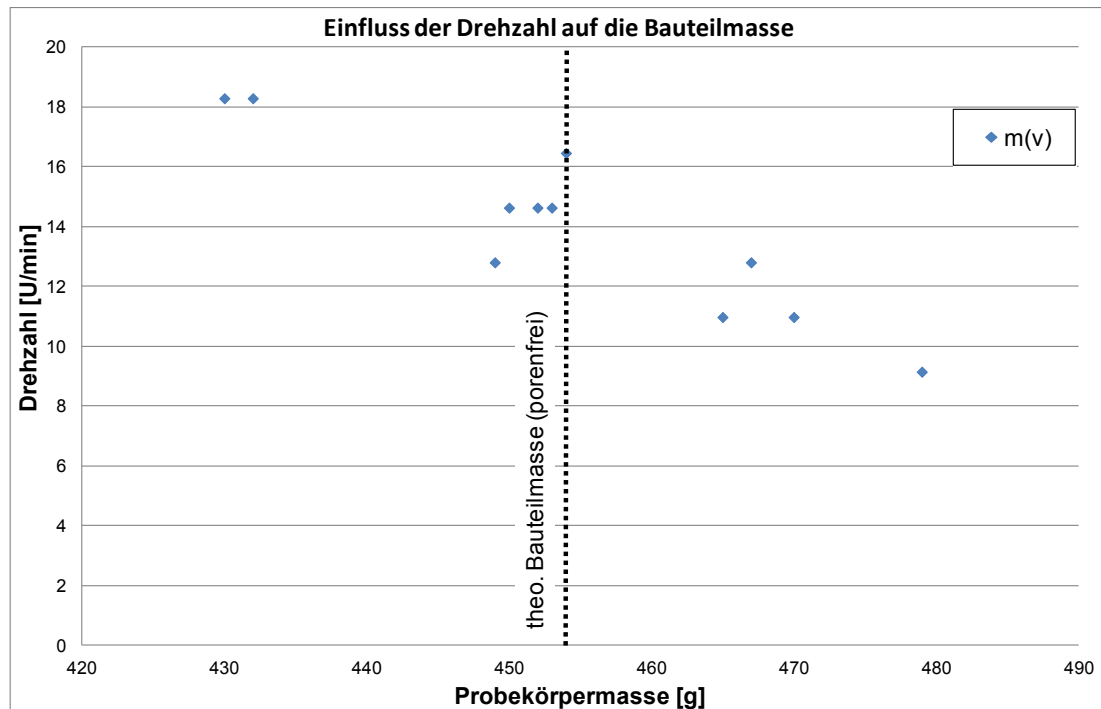


Abb. 4.19: Einfluss der Drehzahl auf die Bauteilmasse.

Abb. 4.19 zeigt den Einfluss der Wickelgeschwindigkeit auf die Bauteilmasse. Die dargestellten Messpunkte zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Bauteilmasse und Wickelgeschwindigkeit. Erwartungsgemäß sollte die Kurve nach dem Erreichen der theoretischen Bauteilmasse nach rechts hin steiler abfallen und eine konstante Bauteilmasse sollte sich einstellen. Die eingezeichnete Massengrenze zeigt, dass sich eine Verarbeitungsgeschwindigkeit  $>12-14$  U/min schon als kritisch erweist. Das entspricht einem Abzugsgeschwindigkeitsbereich von  $2-8$  m/min. Grund für die sehr niedrige maximale Abzugsgeschwindigkeit sind die tiefen Umgebungstemperaturen von  $0-5$  °C während dem Verarbeitungsprozess. Die dadurch deutlich erhöhte Viskosität des Harzsystems verhindert eine hohe Imprägnierungsqualität auch bei höheren Abzugsgeschwindigkeiten. Folge daraus ist eine geringere Harzaufnahme der Faserstränge und eine daraus resultierende Verringerung der Bauteilmasse.

## 5 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird beruhend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den Kapiteln 3 und 4 ein Serienfertigungskonzept erarbeitet. Die mechanischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Bauteil stellen dabei die Grundlage der Überlegungen dar. Das Konzept zeigt eine prinzipielle Herangehensweise zur Erarbeitung eines Serienfertigungskonzeptes, zeigt mögliche Engpässe in der Fertigungslinie und bietet somit die Grundlage für eine Abschätzung der Zykluszeiten sowie des notwendigen Multiplikationsgrades.

### 5.1 Serienfertigungskonzept und Abschätzung der Zykluszeit

Der Wickelprozess eignet sich grundsätzlich aufgrund des hohen Automatisierungspotentials sehr gut als Serienfertigungsprozess. Einige Bauteile wie bspw. Druckbehälter werden mit diesem Fertigungsprozess schon heute in sehr hohen Stückzahlen produziert. Das hier dargestellte Serienfertigungskonzept beruht wie schon erwähnt auf den unter Kapitel 1.1 angegebenen Bauteilanforderungen und zeigt einen möglichen Aufbau einer automatisierten Fertigungslinie zur Herstellung von GFK-Schlaufen.

Aufgrund der geringen Bauteilkomplexität und der darauf beruhenden geringen Wickelzeit, liegt das Optimierungspotential des gesamten Fertigungsprozesses hauptsächlich im Rüsten, Handling, Aushärten und Entformen des Bauteils. Da die Bauteile mit einem semi-kontinuierlichen Fertigungsprozess hergestellt werden, muss die Topfzeit des Harzsystems so weit wie möglich erhöht werden um ein Gelieren des Harzes in der Imprägniereinheit zu vermeiden. Aus diesem Grund sollte ein Serienfertigungsprozess entweder auf Basis eines heiß aushärtenden Harzsystems oder mit einer geschlossenen Imprägniereinheit der sogenannten „Siphon Imprägniereinheit“ durchgeführt werden. Abb. 5.1 zeigt eine Prinzipdarstellung dieser geschlossenen Imprägniereinheit. Die Imprägnierung erfolgt dabei in einem engen Kanal durch den der Rovingstrang gezogen wird. Das Harz wird am Beginn des Kanals injiziert

und der Rovingstrang wird, bedingt durch die Geometrie des Kanals, mit dem Harz durchtränkt. Vorteil dieser Imprägnierung ist, dass jeweils nur die Menge an Harz gemischt und injiziert wird, die tatsächlich benötigt wird. Des Weiteren wird ein Gelieren des Harzsystems in der Imprägniereinheit verhindert. Das System ermöglicht demnach eine kontinuierliche Fertigung, auch mit kalt aushärtenden Harzsystemen.

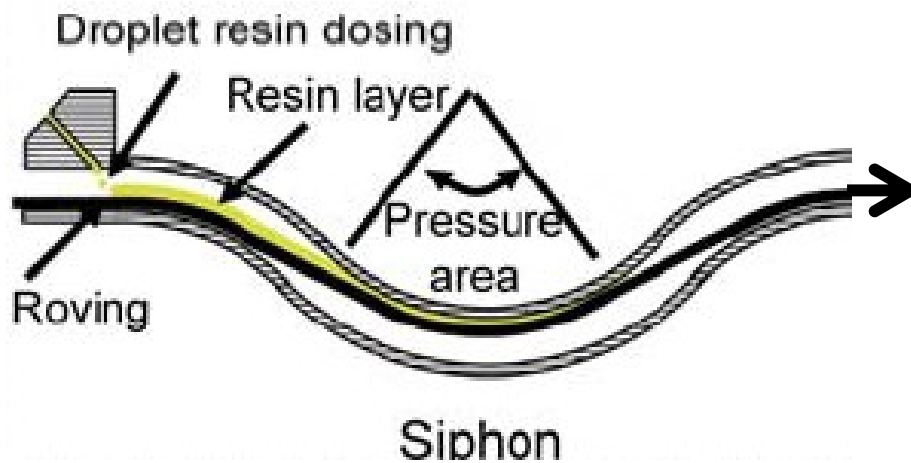


Abb. 5.1: Siphon Imprägnierung [28].

Die Harzinjizierung wird dabei auf die Abzugsgeschwindigkeit des Rovingstrangs angepasst, um eine konstante Imprägnierungsqualität zu gewähren [28].

Aus der erforderlichen Jahresproduktionsmenge von 300.000 Stück kann auf den notwendigen Ausstoß der Anlage pro Zeiteinheit zurückgerechnet werden. Dabei wird von einem dreischichtigen Produktionsbetrieb an fünf Tagen in der Woche und 48 Wochen im Jahr ausgegangen. Der daraus resultierende erforderliche Durchsatz  $\lambda$  der Anlage beträgt 52 Stk/Stunde und errechnet sich nach:

$$\lambda = \frac{N_{ges}}{t} \quad (9)$$

$N_{ges}$  entspricht der erforderlichen Jahresproduktionsmenge und  $t$  gibt die Summe an Produktionsstunden in einem Jahr wieder. Zur Abschätzung der Zykluszeit werden die Zeitaufwände der einzelnen Produktionsabschnitte im ersten Schritt unter entsprechenden Annahmen abgeschätzt. Als Grundlage dafür werden nachfolgend die einzelnen Fertigungsbereiche dargestellt und

deren Funktionsweise erläutert. Das Ergebnis beeinflusst den erforderlichen Multiplikationsgrad in der parallelen Bewicklung der Werkzeuge und die Auslegung der gesamten Anlagekomponenten.

Um die Produktionskosten zu reduzieren, werden ein hoher Automatisierungsgrad und ein geringer Personalaufwand angestrebt. Abb. 5.2 zeigt den Materialfluss im Serienfertigungsprozess und die einzelnen Fertigungsschritte des gesamten Herstellungsprozesses. Mit Ausnahme von Bereich 2 und 8 ist im ersten Schritt ein vollkommen automatisierter Betrieb der Anlage angestrebt.

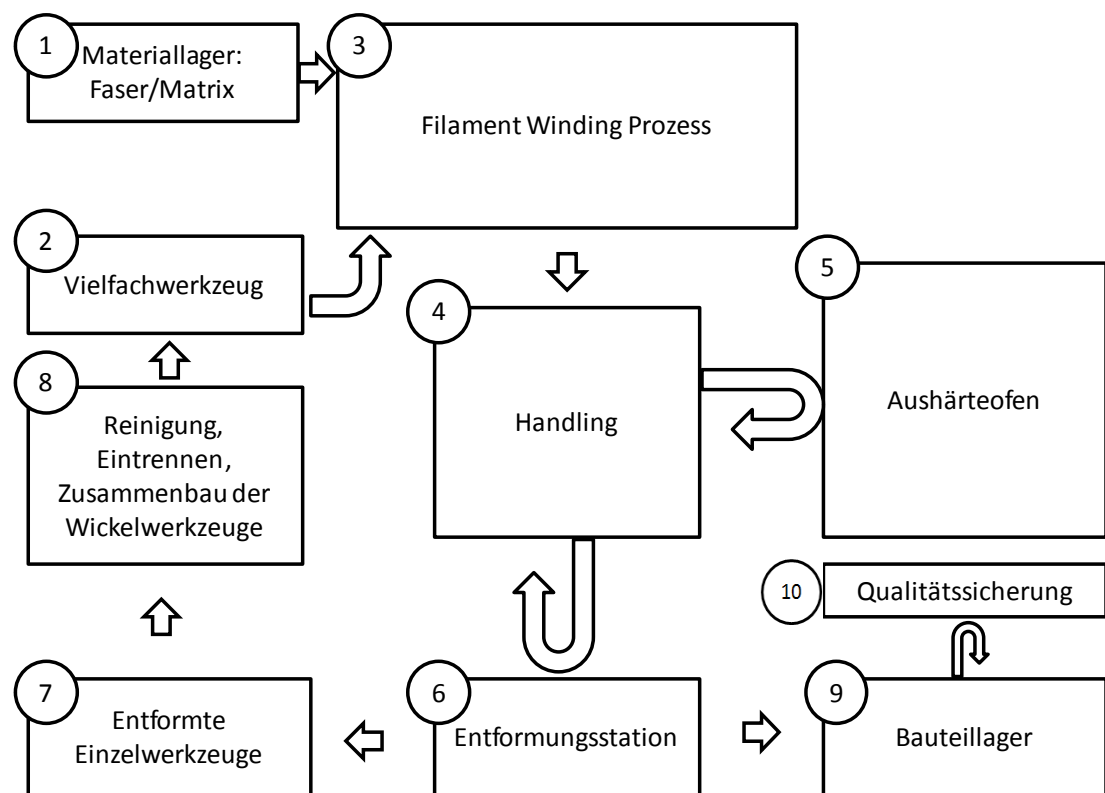


Abb. 5.2: Materialfluss in der Serienfertigung.

Bereich 1 „Materiallager: Faser/Matrix“ und 2 „Vielfachwerkzeug“ stellen den Ausgangspunkt der Produktionsanlage dar. Hier werden die fertig zusammengestellten Werkzeuge (siehe Abb. 5.3) von der Handling-Einheit in der Wickelmaschine arretiert. Die Befestigung funktioniert wie bei einer Drehmaschine über Reitstock und Backenspannfutter. Zusätzlich wird die Wickelmaschine vom Materiallager aus mit Faserrovings und Harz beschickt.

Die Befestigung der einzelnen Rovingstränge wird in Kapitel 5.2 näher erläutert.

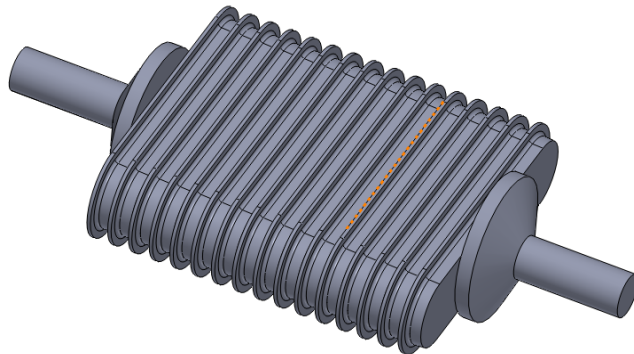


Abb. 5.3: schematische Darstellung des zusammengestellten Vielfachwerkzeuges.

Wie schon in Kapitel 4.1 erwähnt, ist für die Herstellung der GFK-Schlaufe eine sehr einfache Wickelmaschine mit nur einem Bewegungsfreiheitsgrad, der Rotationsachse, notwendig.

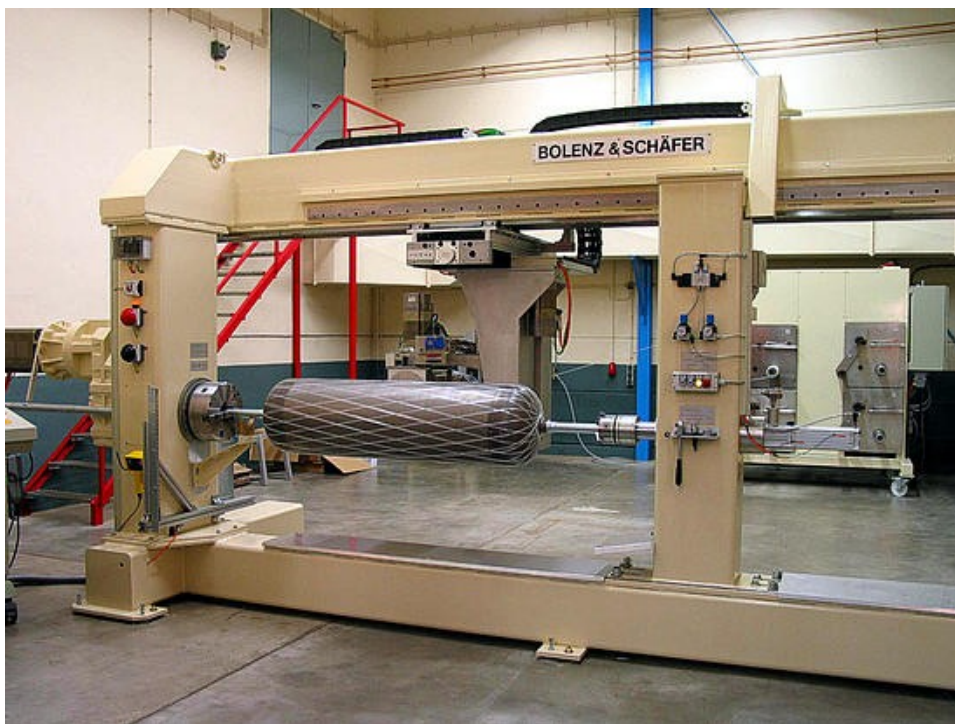


Abb. 5.4: Portalwickelanlage: Filament Winding Machine Typ 1 [29].

Abb. 5.4 zeigt den Aufbau einer Portalwickelmaschine der Firma EHA Composite Machinery GmbH beim Wickeln eines Druckbehälters. Das Portal

bietet die notwendige Stabilität, ist für verschiedene Wickeldornlängen variabel einstellbar und bietet auch für größere Wickeldurchmesser ausreichend Platz.



Abb. 5.5: Spulenlager und Walzenimprägnierung [29], [30].

In Abb. 5.5 ist das Spulenlager und die Walzenimprägnierung nochmals genauer dargestellt. Für das parallele Bewickeln eines 6 fachen Vielfachwerkzeuges müssen bei Verwendung von 3 Rovingsträngen pro GFK-Schlaufe bspw. 18 aktive Spulen im Spulenlager vorhanden sein. Im Vergleich dazu umfasst das in Abb. 5.5 dargestellte Spulenlager 60 Rovingspulen.

Zentraler Punkt der Fertigung ist Bereich 4 „Handling“. Dieser Bereich ist für die Manipulation der Bauteile und Werkzeuge zuständig und wird mit einem Roboterarm realisiert. Nach dem Wickelprozess wird der gesamte Wickeldorn vom Roboter aus der Maschine entnommen und an den Bereich 5 „Aushärteofen“ weitergegeben. Dieser kann als Durchlaufofen oder stationärer Kammerofen konzipiert sein. Der Wickeldorn muss in beiden Fällen während der gesamten Aushärtezeit rotiert werden um ein Abtropfen des Harzes zu vermeiden. Abb. 5.6 zeigt einen Durchlaufofen der Firma EHA Composite Machinery GmbH zum Aushärten von Wickelbauteilen.



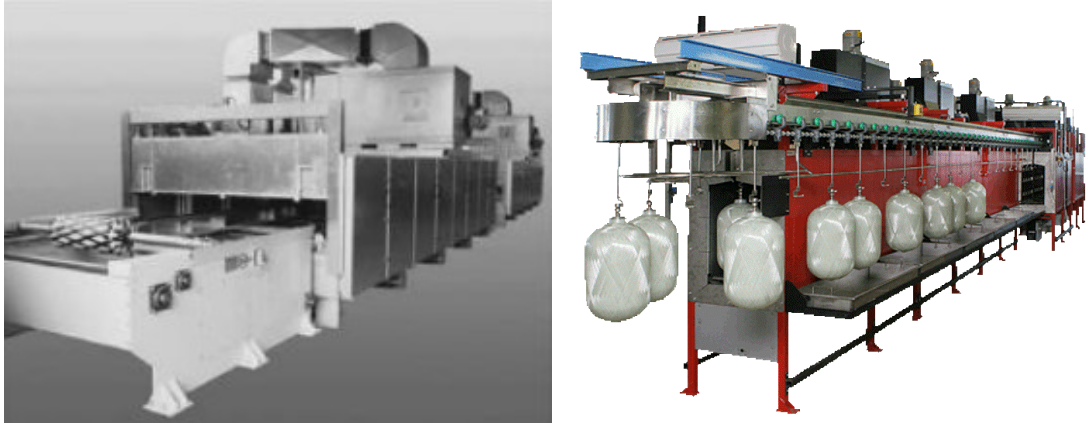


Abb. 5.6: Konzepte für Durchlauföfen für die Aushärtung von Druckbehältern [31], [32].

Nach dem Aushärteprozess wird der Dorn aus dem Ofen entnommen und an den Bereich 6 „Entformungsstation“ weitergegeben. In diesem Bereich werden die Bauteile von den Werkzeugen getrennt und an Bereich 9 „Materiallager“ weitergeleitet. Das Entformungskonzept wird in Kapitel 5.2 näher erläutert. Die einzelnen Werkzeuge und der Dorn werden im Bereich 8 „Reinigung, Eintrennen, Zusammenbau der Wickelwerkzeuge“ wieder für den nachfolgenden Wickelprozess aufbereitet. Dabei werden Harzreste von den Werkzeugen entfernt und die Werkzeuge wieder neu eingetrennt und auf dem Wickeldorn gesteckt.

Im Bereich 10 „Qualitätssicherung“ werden Bauteile aus dem Bauteillager entnommen und der Qualitätsprüfung unterzogen. Die notwendigen Qualitätskriterien, -prüfverfahren und -toleranzen müssen auf den Verwendungszweck und die an das Bauteil gestellten Anforderungen abgestimmt werden. Zur Überprüfung des Herstellprozesses werden Bauteilgeometrie und Bauteilmasse „inline“ bestimmt.

Eine Abschätzung der Zykluszeit kann nun beruhend auf dem ausgeführten Serienfertigungskonzept unter weiteren Annahmen getroffen werden. Das Ergebnis ist die Grundlage für die Berechnung der benötigten Einzelwerkzeugen, der erforderlichen Multiplikation beim Wickelprozess, der Dimension und Leistung des Aushärteofens und dem benötigten Personalaufwand. Die dazu getroffenen Annahmen stammen aus den

Versuchen der Prototypenanlage, Daten aus der Literatur, sowie Abschätzungen für Prozesszeiten.

Im Gegensatz zur Prototypenanlage wird die Serienfertigung ausgehend von mindestens 3 Rovingsträngen pro Bauteil bewickelt. Dadurch ergibt sich eine niedrigere Anzahl an Wicklungen von 60. Eine maximale Wickelgeschwindigkeit von 30 U/min führt zu einer benötigten Wickelzeit von 2 min. Für die gesamte Rüstzeit wird zusätzlich 1 min pro Wickeldorn veranschlagt. Vinylesterharze, die für den Einsatz in der Wickeltechnik konzipiert sind, müssen eine hohe Topfzeit aufweisen. Diese Harzsysteme weisen eine durchschnittliche Aushärtezeit von 45-60 min auf, wobei die Temperatur von 25 °C auf eine Spitzentemperatur von 110-135 ° erhöht wird (Testmethode 2625 der Firma DSM, vgl. Atlac 580). Zur exakten Bestimmung der notwendigen Verweildauer im Aushärteofen müssen die thermischen Eigenschaften des Werkzeuges und des Verbundwerkstoffes, sowie die Geometrie dieser beiden Komponenten und die Art der Wärmeübertragung berücksichtigt werden. Da die Ausführung des Wickeldorns von dieser Berechnung abhängig ist, kann die zusätzlich beanspruchte Zeit, bis Werkzeuge und Verbund die im Ofen vorherrschende Temperatur aufweisen, nur abgeschätzt werden. Es wird angenommen, dass dieser Prozess 10 min beansprucht. Somit ergibt sich eine Aushärtedauer von 55-70 min. Vor der Entformung wird die Temperatur von Werkzeug und Bauteil in einer Kühlstrecke reduziert.

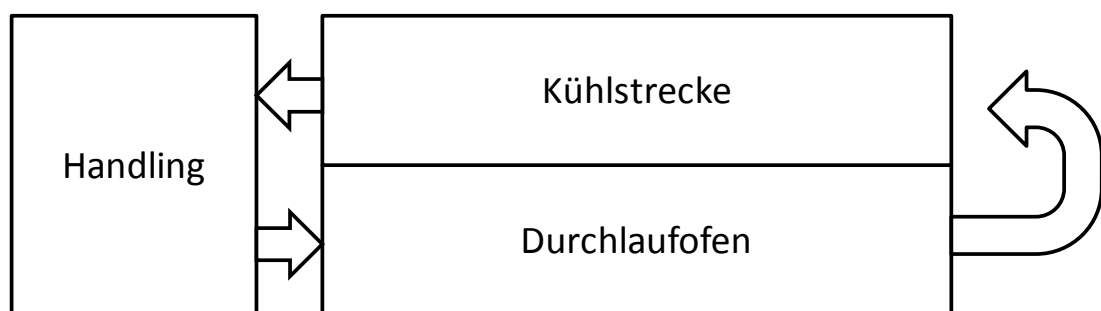


Abb. 5.7: Aushärteeinheit mit integrierter Kühlstrecke (vgl. Abb. 5.6).

In Abb. 5.7 ist schematisch der Aufbau der Aushärteeinheit dargestellt. Dabei entspricht die Länge der Kühlstrecke der Länge des Durchlaufofens. Die Rückführung an die Handling-Einheit wird demnach als Kühlstrecke



verwendet. Während die Durchlaufzeiten für den Aushärteprozess im Durchlaufofen vom verwendeten Material abhängen, kann die Kühlzeit abhängig vom verwendeten Transportsystem variiert werden. Der Durchsatz ist jedoch von der Aushärteeinheit abhängig. Für die Berechnung der Zykluszeiten wird auch die Kühlzeit mit 55-70 min veranschlagt.

In der Entformungseinheit werden die einzelnen Bauteile von den Werkzeugen entfernt. Die Prozessdauer wird auf 10 s pro Entformung eines Bauteils festgelegt. Bereich 8 „Reinigung, Eintrennen, Zusammenbau der Wickelwerkzeuge“ wird manuell durchgeführt. Reinigung und Eintrennen sollten erst nach jeden 5. Zyklus erforderlich sein und einen Zeitaufwand/Person und Werkzeug von etwa 5 min aufweisen. Das Zusammenbauen des Wickeldorns ist abhängig von der Anzahl an Einzelwerkzeugen. Der Prozess sollte jedoch nicht länger als 10 s pro Werkzeug dauern. Der Gesamtanteil des Handlings zwischen den einzelnen Anlagebereichen wird mit 2 min pro Wickeldorn beziffert.

Tabelle 5.1: Zykluszeiten und Durchsatz.

Bereich	Prozessdauer		Durchsatz	
Wickelprozess inkl. Rüsten	3	min/Zyklus	20	Stk/h
Handling	2	min/Zyklus	30	Stk/h
Aushärteprozess	70	min/Zyklus	0.86	Stk/h
Kühlzeit	70	min/Zyklus	0.86	Stk/h
Entformen	0.2	min/Bauteil	300	Stk/h
Reinigen und Eintrennen	1	min/Bauteil	60	Stk/h
Zusammenbau der Wickelwerkzeuge	0.2	min/Bauteil	300	Stk/h

In Tabelle 5.1 sind die benötigten Prozesszeiten und die daraus resultierenden Durchsätze pro Stunde bei der Verwendung von einem Wickelwerkzeug pro Zyklus (Multiplikationsgrad von 1) dargestellt. Wie zu erwarten, limitiert die Aushärtezeit und die Kühlzeit die Gesamtzykluszeit am stärksten. Des Weiteren ist der Bereich Reinigung und Eintrennen kritisch, jedoch mit einer Arbeitskraft noch zu bewältigen. Um die erforderliche Durchsatzmenge von 52 Stück pro Stunde erreichen zu können, muss die Anzahl der Wickelwerkzeuge auf einem Wickeldorn erhöht werden und die synchrone Aushärtung mehrere Wickeldorne im Ofen ermöglicht

werden. Der Gesamtmultiplikationsfaktor  $K_g$  zeigt den notwendigen Multiplikationsgrad des Bereiches „Aushärtung“ und ergibt sich aus

$$K_g = K_{\text{Werkzeug}} \cdot K_{\text{Ofen}}, \quad (10)$$

wobei  $K_{\text{Werkzeug}}$  der Anzahl an Werkzeugen (Wkz) pro Wickeldorn und  $K_{\text{Ofen}}$  der Anzahl an sich gleichzeitig im Ofen befindlichen Wickeldornen entspricht.  $K_g$  kann über

$$K_g = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Aushärteprozess}}} \quad (11)$$

bestimmt werden. Dabei entspricht  $\lambda$  dem erforderlichen minimalen Gesamtdurchsatz der Fertigungslinie und  $\lambda_{\text{Aushärteprozess}}$  dem Durchsatz des Aushärteprozesses. Der daraus berechnete minimale erforderliche Gesamtmultiplikationsfaktor  $K_{\text{ges}}$  ergibt 61. Für die Realisierung der in Kapitel 5.2 nachfolgend beschriebenen Haltereinheit wird die maximale Anzahl an Werkzeugen pro Wickeldorn mit  $K_{\text{Werkzeug}} = 6$  beziffert.

Die Variation der beiden Multiplikationsfaktoren  $K_{\text{Werkzeug}}$  und  $K_{\text{Ofen}}$  wirkt sich dabei sowohl auf die erforderliche Heizstreckenlänge, als auch auf die benötigte Anzahl an Wickeldornen und Einzelwerkzeugen im Prozess aus. Bei der Berechnung der optimalen Multiplikationsfaktoren wird daher mittels Zielwertsuche versucht, sowohl die Heizstreckenlänge, als auch die Anzahl an benötigten Werkzeugen im Prozess zu minimieren.

Tabelle 5.2: Ergebnis der Zielwertsuche ( $K_{\text{Werkzeug}}=6$ ;  $K_{\text{Ofen}}=10,11$ ).

Bereich	Prozessdauer		Durchsatz		Dorne/Bereich	Wkz/Bereich
Wickelprozess	6.9	min/Zyklus	52	Stk/h	1	6
Handling	2	min/Zyklus	180	Stk/h	1	6
Aushärteproze	70	min/Zyklus	52	Stk/h	11	66
Kühlzeit	70	min/Zyklus	52	Stk/h	11	66
Entformen	0.2	min/Bauteil	300	Stk/h	1	6
Reinigen und B	1	min/Bauteil	60	Stk/h	1	6
Zusammenbau	0.2	min/Bauteil	300	Stk/h	1	6
			<b>Summe</b>		<b>27</b>	<b>162</b>

In Tabelle 5.2 ist das gefundene Optimum der Zielwertsuche dargestellt. Dabei wird sowohl die geringste Menge an Wickeldornen und Werkzeugen, als auch die geringste Heizstreckenlänge im Prozess erzielt. Die Zykluszeit des Wickelprozesses wird dabei auf den Durchsatz des Aushärteprozesses angepasst. Die resultierende Zykluszeit ist dementsprechend 6,9 min und

kann bspw. durch Verringerung der Wickelgeschwindigkeit realisiert werden. Die erforderliche Heizstreckenlänge errechnet sich nach:

$$s_{erf} = l_{erf} \cdot K_{Ofen} \quad (12)$$

Dabei ist  $l_{erf}$  der erforderliche Platzbedarf eines Wickeldorns im Durchlaufofen und  $s_{erf}$  die daraus resultierende Heizstreckenlänge. Da die Wickeldorne während dem Aushärteprozess rotiert werden, ergibt sich aufgrund der maximalen Werkzeugabmessung von 450 mm und einem angenommenen Mindestabstand zwischen den Dornen von 50 mm ein Mindestplatzbedarf von 500 mm pro Wickeldorn. Mit dem errechneten Multiplikationsfaktor  $K_{Ofen}=10,11$  ergibt sich eine Heizstreckenlänge von 5,1 m und eine Durchlaufgeschwindigkeit von 72 mm/min. Der Durchsatz des gesamten Herstellungsprozesses beträgt somit in dieser Konfiguration 52 Stk/h. Für die Realisierung einer kontinuierlichen Serienfertigung werden 27 Wickeldorne und 162 Einzelwerkzeuge benötigt.

## 5.2 Werkzeugkonzept

Für die Herstellung der GFK-Schlaufe bieten sich für die geforderten hohen Stückzahlen grundsätzlich zwei Werkzeugkonzepte an.

- breites Mehrfachwerkzeug
- viele Einfachwerkzeuge

Die beiden Konzepte unterscheiden sich in der Nachbearbeitung und der resultierenden Bauteilperformance sowie beim Rüsten und Reinigen. Beim Bewickeln eines breiten Mehrfachwerkzeuges ist ein nachfolgender Schnittprozess erforderlich. Mit der dadurch entstehenden Freilegung und teilweisen Durchtrennung der Fasern ist im basischen Milieu mit einer Festigkeitsreduktion zu rechnen. Wie schon in Kapitel 5.1 schematisch dargestellt, wird auch im Werkzeugkonzept aus diesem Grund auf das parallele Bewickeln eines Vielfachwerkzeuges eingegangen, da hier klare Vorteile für die Bauteilqualität zu sehen sind. Abb. 5.8 zeigt einen Entwurf des aufgedornen Vielfachwerkzeuges.

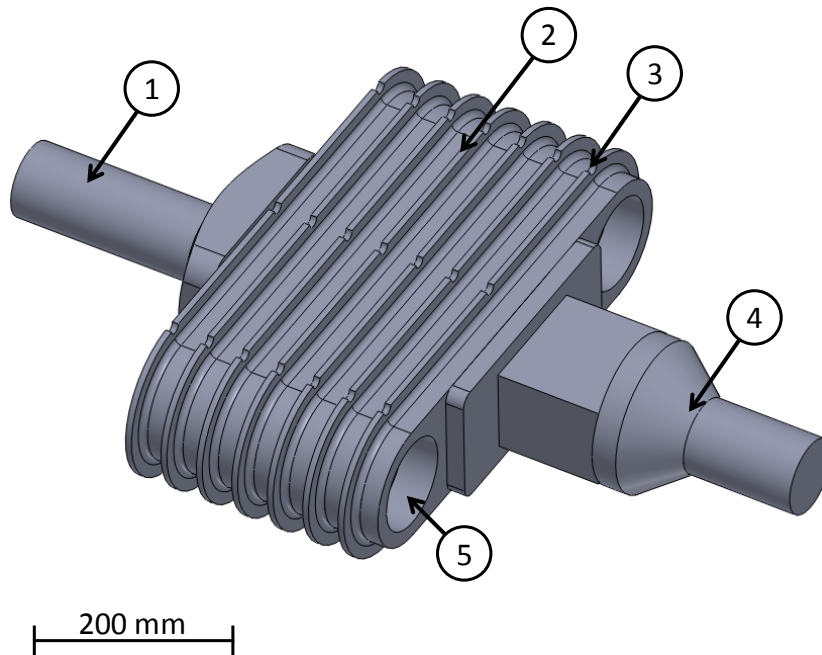


Abb. 5.8: Werkzeugkonzept: Vielfachwerkzeug (1 Wickeldorn, 2 Wickelwerkzeug, 3 Entformungsrillen, 4 Wickeldorn Gegenstück, 5 Ausnehmungen zur Verringerung der Heizzeit).

Die einzelnen Komponenten werden auf einen rechteckigen Wickeldorn aufgespannt der die Rotationsbewegung in die einzelnen Wickelwerkzeuge einleitet. Um eine bessere Entformung zu gewährleisten, weisen die Wickelflächen eine Entformungsschräge von  $3^\circ$  auf. An den Innenkanten sind die Kavitäten mit Radien versehen, um ein besseres Bauteilhandling im ausgehärteten Zustand zu gewährleisten.

Um eine automatisierbare Fixierung der Faserenden am Beginn des Wickelprozesses zu gewährleisten, werden die Faserstränge mit einer an der Wickelmaschine montierten Haltereinheit am Werkzeug geklemmt. Vor Beendigung der ersten Rotation wird der Halter nach außen rotiert und die Faserstränge durch die zweite abgelegte Lage am Werkzeug fixiert.

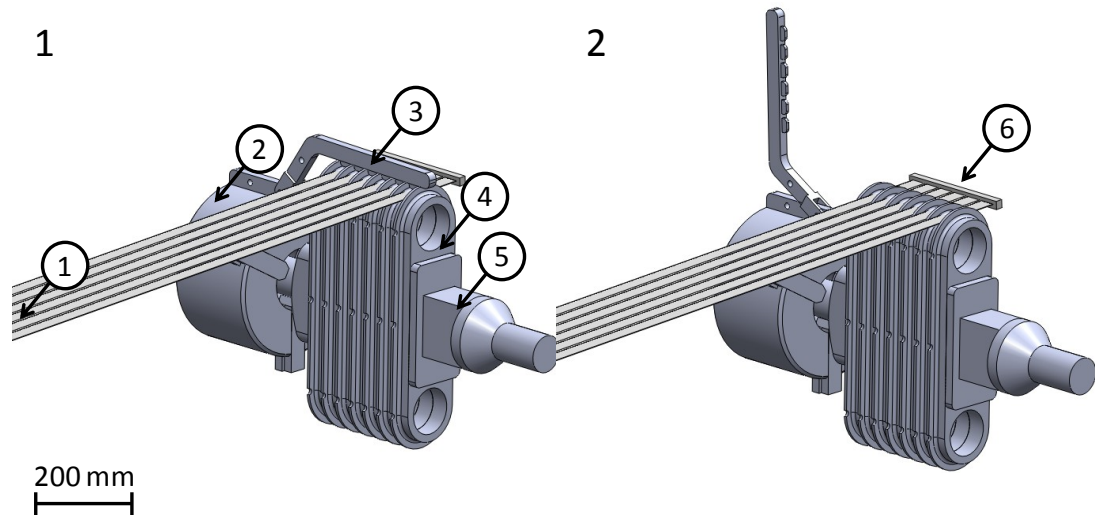


Abb. 5.9: Konzept: Haltereinheit zur Fixierung der ersten Lage (1 Rovingstränge, 2 Backenspannfutter, 3 Haltereinheit, 4 Wickelwerkzeug, 5 Gegenstück des Wickeldorns, 6 Schneid- und Fixierungseinheit).

Eine direkte Montage der Haltereinheit am Backenspannfutter führt zur Unwucht des Wickeldorns. Das kann bei hohen Wickelgeschwindigkeiten zu Schäden an der Wickelmaschine führen. Aus diesem Grund ist eine separate Führung der Haltereinheit an der Wickelmaschine zu bevorzugen. Für die Entformung sind in den Trennstegen Vertiefungen eingearbeitet, um ein Abstreifen des Bauteils von der Form zu ermöglichen. Die zusätzlichen runden Ausnehmungen im Bereich der Radien dienen zur Reduktion der notwendigen Heizzeit während des Aushärteprozesses. Als Werkzeugmaterial sollte aufgrund des geringen Verschleiß und der hohen Wärmeleitfähigkeit Stahl verwendet werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich beschreibt diese Diplomarbeit die Herangehensweise zur Findung und Ausarbeitung eines geeigneten Serienfertigungsprozesses für eine GFK-Schlaufe basierend auf mechanischen und wirtschaftlichen Bauteilanforderungen. Im ersten Teil der Arbeit werden diese Anforderungen grundlegend erklärt und sind die Grundlage aller weiteren Überlegungen. Im zweiten Schritt werden mit einem Technologiescreening mögliche Fertigungsprozesse zur Herstellung des Bauteils aufgelistet und über eine Bewertungsmatrix anschließend der optimale Fertigungsprozess gewählt. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades und der hervorragenden resultierenden Bauteileigenschaften stellt sich der Wickelprozess als geeignetster Prozess dar.

Zur Produktion von seriennah gefertigten Prototypen wird eine Prototypenanlage konstruiert und gefertigt. Die gefertigten Prototypen geben Aufschlüsse über Fehlerquellen in der Produktion und Einflüsse der verschiedenen Prozessparameter auf die Bauteilqualität. Die Untersuchung der maximalen Wickelgeschwindigkeit kann aufgrund der niedrigen Verarbeitungstemperaturen und der daraus resultierenden hohen Viskosität des Harzsystems nicht auf einen Serienfertigungsprozess übertragen werden.

Das Serienfertigungskonzept zeigt Möglichkeiten wie der Herstellungsprozess der GFK-Schlaufe möglichst automatisiert durchgeführt werden kann. Die Darstellung des Materialflusses in der gesamten Anlage und die genaue Beschreibung der einzelnen Anlagebereiche ermöglichen eine Abschätzung der einzelnen Prozesszeiten. Der Aushärte- und Kühlprozess zeigt sich dabei als Engpass des gesamten Herstellungsprozesses. Mit rund 140 min benötigen diese rund 88 % der gesamten Prozessdauer. Hier wird die optimale Auswahl des Harzsystems und ein optimierter Aushärteprozess entscheidend für die Produktivität der Anlage sein. Aufgrund des verwendeten Harzsystems (Vinylester) ist jedoch eine Beschleunigung der Aushärtereaktion bzw. möglicherweise auch eine

In-Line Aushärtung während des Wickelprozesses mittels UV-Strahlung anzudenken. Dieser Prozess würde die gesamte Fertigungsanlage deutlich verkleinern und somit sowohl Platzbedarf, als auch Anschaffungskosten drastisch reduzieren. Die dazu notwendigen Prototypenversuche werden wiederum die Grundlage weiterer Schritte definieren.

## 7 Literatur

- [1] F. Dehn, G. König und G. Marzahn, Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen, Berlin, Deutschland: Ernst & Sohn, 2003.
- [2] K. Walter, Verbundwerkstoffe: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Bayreuth, Deutschland: WILEY-VCH, 2009.
- [3] AVI Alpenländische Veredelungs Industrie, Raaba, Austria.
- [4] Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, Graz, Österreich.
- [5] AGY, South Carolina, USA.
- [6] Ross Fisch Composites, Hude/Altmoorhausen, Deutschland.
- [7] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin, Deutschland: Springer, 2007.
- [8] G. Peter, R. Muntwyler und M. Ladner, Baustofflehre, Bd. 3, Zürich, Schweiz: vdf, 2005.
- [9] F. T. Wallenberg und P. A. Bingham, Fiber Glass and Glass Technology, New York, USA: Springer, 2010.
- [10] W. J. Bartz, Viskosität und Schmierverhalten, Bd. 7, Renningheim-Malmsheim, Deutschland: expert Verlag, 1994.
- [11] M. Neitzel und P. Mitschang, Handbuch: Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, Deutschland: Hanser, 2004.
- [12] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth, Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix, Berlin, Deutschland: Springer, 1999.
- [13] R. Gaymans und E. Wevers, „Impregnation of glass fiber roving with a polypropylene melt in a pin assisted process,“ Twente University of Technology, Enschede, Niederlande, 1997.



- [14] W. Kaiser, Kunststoffchemie für Ingenieure, München, Deutschland: Hanser, 2007.
- [15] AVK Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe, Handbuch Faserverbundkunststoffe, Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner, 2009.
- [16] W. Wobcken, Duroplaste, München, Deutschland: Hanser, 1988.
- [17] K. Potter, „An Introduction To Composite Products,“ Chapman and Hall, London, Großbritannien, 1997.
- [18] H.-P. Zepf und C. Baron, Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix, Renningen-Malmsheim, Deutschland: expert Verlag, 1997.
- [19] M. Puckl, R. Hampel und D. Langer, „Technologieentwicklung für bauteilnahe Fasergelege,“ Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen e.V., Chemnitz, Deutschland, 2002.
- [20] S. M. Lee, Handbook of Composite Reinforcements, Kalifornien, USA: Wiley-VCH, 1993.
- [21] C. Cherif, Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Dresden, Deutschland: Springer, 2011.
- [22] F. L. Matthews und R. D. Rawlings, Composite Materials: Engineering and Science, Cambridge, Großbritannien: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [23] W. Michaeli, Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Aachen, Deutschland: Hanser, 2006.
- [24] T. F. Starr, Pultrusion for Engineers, Cambridge, Großbritannien: Woodhead Publishing Limited, 2000.
- [25] K. Bergmeister, Kohlenstofffasern im konstruktiven Ingenieurbau, Wien, Österreich: Ernst&Sohn, 2003.
- [26] A. Abecker, K. Hinkelmann, H. Maus und H. J. Müller,

Geschäftsprozessorientiertes Wissensmanagement, Berlin, Deutschland: Springer, 2002.

[27] A. B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing*, Michigan, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

[28] A. Miaris, M. Päßler, J. Lichtner und R. Schledjewski, „Siphon impregnation”: The development of a new method,“ in s *ICCM17*, Edinburgh, Großbritannien, 2009.

[29] EHA Composite Machinery GmbH, Steffenberg, Deutschland.

[30] McClean Anderson, Wisconsin, USA.

[31] S. Peters, *Composite Filament Winding*, Ohio, USA: ASM International, 2011.

[32] LAC, s. r. o., Rajhrad, Tschechische Republik.

## 8 Verwendete Symbole und Abkürzungen

### 8.1 Abkürzungen

FVA	Faservolumenanteil
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
VE	Vinylester

### 8.2 Symbole

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$A_F$	Faserquerschnitt	$\text{mm}^2$
$A_{\text{ges}}$	gemessener Gesamtbauteilquerschnitt	$\text{mm}^2$
$A_{\text{Roving}}$	Querschnitt des Rovings	$\text{mm}^2$
D	Durchmesser der Schlaufe	mm
EA	Dehnsteifigkeit	N
$E_{II}$	E-Modul in Faserrichtung	MPa
F	Normalkraft	N
$F_{\text{KMD}}$	Gemessene Kraft an der Kraftmessdose	N
$F_{\text{max}}$	maximale Kraft	N
$F_{\text{Roving}}$		
g	Erdbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
H	Schlaufenbreite	mm
k	Reduktionsfaktor	
$K_g$	Gesamtmultiplikationsgrad	
$K_{\text{ges}}$	erlaubte Stückkosten pro Schlaufe	€/Stk
$K_m$	Fertigungs- und Materialpreis	€/kg

$K_{\text{Ofen}}$	Multiplikation Ofen	
$K_{\text{Werkzeug}}$	Multiplikation Ofen	
$L$	Gesamtlänge der Schlaufe	mm
$l$	Hebelarm	mm
$l_{\text{erf}}$	erforderliche Platzbedarf pro Wickeldorn	m
$L_{\text{ST}}$	steifigkeitsrelevante Länge	mm
$L_t$	thermische Länge	mm
$M$	Drehmoment	Nm
$m_{\text{Anpress}}$	Masse des Anpresssystems	kg
$N$	Anpresskraft	N
$N_{\text{ges}}$	Jahresproduktionsmenge	Stk
$Q$	Wärmeeintrag	W
$R$	Radius der Schlaufe	mm
$s_{\text{erf}}$	erforderliche Heizstreckenlänge	m
$t$	Zeit	h
$t(L)$	Schlaufendicke als Funktion der -länge	mm
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$\alpha$	Ablegewinkel	°
$\alpha_{\text{Zug}}$	Winkel in der Zugspannungsmesseinheit	°
$\beta$	Rotationswinkel des Wickelwerkzeuges	°
$\beta_1$	Anpresswinkel im Schlaufenradius	°
$\rho$	Dichte des Verbundmaterials	kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	Faservolumenanteil	
$\lambda$	erforderlicher Durchsatz	Stk/h

---

$\lambda_{\text{Aushärteprozess}}$	Durchsatz des Aushärteprozesses	Stk/h
$\lambda_t$	Wärmeleitwert	W/mK
$\sigma_{\text{IIZ}}$	Zugfestigkeit in Faserrichtung	MPa
$\sigma_{\text{real}}$	reale Zugfestigkeit	MPa
$\sigma_{\text{red}}$	reduzierte Faserfestigkeit	MPa

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Thermokorb [3]. .....	1
Abb. 1.2: Entwickeltes Konzept für den Thermokorb bestehend aus GFK-Schlaufe (schwarz), Betonkeilen (grau) und Isolation (gelb) [3]. .....	2
Abb. 1.3: Geometrie der GFK-Schlaufe [4]. .....	3
Abb. 1.4: Prinzipdarstellung der Faserondulation (1 Verbundwerkstoff mit gerichteten Fasern, 2 Verbundwerkstoff mit Faserondulation). .....	4
Abb. 1.5: Zugfestigkeitsreduktion aufgrund saurer oder basischer Medien [7]. .....	6
Abb. 1.6: Einfluss längerer Temperatur-Auslagerung (24 h) auf die Festigkeit der wichtigsten Verstärkungsfasern [7], [9]. .....	7
Abb. 2.1: Viskositätsverlauf als Funktion der Verarbeitungstemperatur [11].	9
Abb. 2.2: Zeit-/Temperaturabhängigkeit der Viskosität einer Reaktionsharzmasse [11]. .....	10
Abb. 2.3: Isothermer und nicht isothermer Viskositätsverlauf [11]. .....	11
Abb. 2.4: Verfahrensschritte in der Reaktionsharztechnologie [14]. .....	13
Abb. 2.5: Schwindungsverhalten bei erhöhten Prozesstemperaturen [17]. ..	14
Abb. 2.6: Aufbau einer Autoklavanlage [7]. .....	15
Abb. 2.7: Verarbeitungsaufbau zur Herstellung von Prepreg Bauteilen [18].	16
Abb. 2.8: Autoklavprozess: Temperatur und Druckprofil [18]. .....	16
Abb. 2.9: Prinzipieller Aufbau und Bewegungsachsen einer Wickelmaschine [19]. .....	19
Abb. 2.10: Wickelmuster [12]. .....	21
Abb. 2.11: Wickeltechnik: Realisierbare Grundformen [11]. .....	22
Abb. 2.12: Imprägniereinheit: Tauchtränkung vs. Walzenröschung [12]. .....	23
Abb. 2.13: Relative Herstellkosten und Faserablegeraten für einen CF/EP Laminataufbau [12]. .....	25

---

Abb. 2.14: Prozessschritte der Pultrusionsanlage [23].....	27
Abb. 2.15: Pultrusion: offene vs. geschlossene Imprägnierung [24]. ....	28
Abb. 2.16: Pultrusionsprofile, Grundformen [mm] [24]. ....	29
Abb. 3.1: Mehrschichtige Schlaufe [7].....	35
Abb. 4.1: Konstruktion der gesamten Prototypenanlage.....	42
Abb. 4.2: Detail Prototypenanlage: Querschnitt Zugspannungsmesseinheit (links), Querschnitt Bremseinheit (rechts). ....	43
Abb. 4.3: Darstellung der wirkenden Kräfte in der Zugspannungsmesseinheit. ....	43
Abb. 4.4: Referenzmessung: Zugspannungsmesseinheit.....	44
Abb. 4.5: Schnittansicht durch die Konstruktion der Imprägniereinheit (1 Umlenkwalze, 2 Imprägnierwalze, 3 Kompaktierwalze, 4 Roving, 5 Harzabstreifer, 6 Harzbad, 7 Bodenplatte des Harzbades). ....	45
Abb. 4.6: Konstruktion: Abstreifer. ....	46
Abb. 4.7: Einfluss der Rovingbreite auf die Faserimprägnierung (1 nicht aufgespreizter Rovingquerschnitt, 2 aufgespreizter Rovingquerschnitt). ....	47
Abb. 4.8: Konstruktion des Wickelwerkzeuges (1 Außenteil des Werkzeuges, 2 Mittelteil des Werkzeuges, 3 Insert für die Kraffteinleitung). ....	48
Abb. 4.9: Kraftübertragung und Montage des Wickeldorns (1 Getriebemotor, 2 Starrkupplung, 3 Wickelwerkzeug, 4 Wickeldorn). ....	49
Abb. 4.10: Anpressrolle zur Substratverdichtung am Werkzeug (1 Anpressrolle, 2 Wickelwerkzeug, 3 Antriebseinheit, 4 Imprägniereinheit, 5 Linearführung).....	50
Abb. 4.11: Verlauf der Anpresskraft über dem Rotationswinkel ( $0^\circ < \beta < 71,57^\circ$ ; $71,57^\circ < \beta_1 < 90^\circ$ ). ....	51
Abb. 4.12: Schlaufenquerschnitt. ....	52
Abb. 4.13: Prototypenanlage: Bereich Anpressrolle.....	52
Abb. 4.14: Messpositionen an der Schlaufe.....	53

---

Abb. 4.15: Verlauf des Faservolumenanteils. ....	54
Abb. 4.16: Prototypenschlaufe hergestellt mit Kompaktierungsrolle. ....	54
Abb. 4.17: Zugspannung: Einfluss nass vs. trocken. ....	56
Abb. 4.18: Variation des Ablegewinkels. ....	57
Abb. 4.19: Einfluss der Drehzahl auf die Bauteilmasse. ....	58
Abb. 5.1: Siphon Imprägnierung [28]. ....	60
Abb. 5.2: Materialfluss in der Serienfertigung. ....	61
Abb. 5.3: schematische Darstellung des zusammengestellten Vielfachwerkzeuges. ....	62
Abb. 5.4: Portalwickelanlage: Filament Winding Machine Typ 1 [29]. ....	62
Abb. 5.5: Spulenkammer und Walzenimprägnierung [29], [30]. ....	63
Abb. 5.6: Konzepte für Durchlauföfen für die Aushärtung von Druckbehältern [31], [32]. ....	64
Abb. 5.7: Aushärteeinheit mit integrierter Kühlstrecke (vgl. Abb. 5.6). ....	65
Abb. 5.8: Werkzeugkonzept: Vielfachwerkzeug (1 Wickeldorn, 2 Wickelwerkzeug, 3 Entformungsrillen, 4 Wickeldorn Gegenstück, 5 Ausnehmungen zur Verringerung der Heizzeit). ....	69
Abb. 5.9: Konzept: Haltereinheit zur Fixierung der ersten Lage (1 Rovingstränge, 2 Backenspannfutter, 3 Haltereinheit, 4 Wickelwerkzeug, 5 Gegenstück des Wickeldorns, 6 Schneid- und Fixierungseinheit). ....	70



## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Herangezogene Materialdaten [5] [6]. .....	5
Tabelle 2.1: Vergleich von Kosten und Prozesseffizienz verschiedener Fertigungsverfahren im Bereich Faserkunststoffverbunde [22].....	25
Tabelle 3.1: Bewertungskriterien für die Wahl des optimalen Herstellungsprozesses.....	32
Tabelle 3.2: Bewertung der Fertigungsprozesse.....	37
Tabelle 5.1: Zykluszeiten und Durchsatz. ....	66
Tabelle 5.2: Ergebnis der Zielwertsuche ( $K_{\text{Werkzeug}}=6$ ; $K_{\text{Ofen}}=10,11$ ).....	67