

Aus dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse lässt sich ein Bedarf für eine wirtschaftliche und flexible Fertigung von maßgeschneiderten Faserverbundbauteilen auf Basis von unidirektionalen thermoplastischen Halbzeugen ermitteln. Diese Dissertation leistet dazu einen Beitrag, indem eine additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen erforscht wird.

Die besondere Herausforderung bei der Fertigung von FVK-Bauteilen besteht darin, dass zwei verschiedene Materialphasen verarbeitet werden müssen und sich die Prozessschritte untereinander stark beeinflussen. Im Sinne des Wertschöpfungsmanagements bieten thermoplastische Tapes eine besondere Chance, die Halbzeugproduktion von der diskreten Bauteilfertigung zu entkoppeln und trotzdem eine ausreichend hohe Flexibilität zu erreichen. Aufbauend auf physikalischen Modellen der einzelnen Prozessschritte Imprägnieren, Ablegen und Temperieren wird eine Optimierung der Prozesskette, z. B. hinsichtlich der Tapeabmaße, durchgeführt. Dies beinhaltet ebenso eine Betrachtung der Prozessrobustheit, die anhand eines statistischen Modells der in-situ Konsolidierung bewertet wird, wie auch die Untersuchung verschiedener Möglichkeiten zur Skalierung der Produktivität und deren Auswirkungen auf die Gesamtanlageneffektivität.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung einer Anlagentechnik für die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ein. Das resultierende, hochintegrierte Anlagenkonzept verfügt über ein IR-basiertes Ablegesystem, welches für die Herstellung ebener Laminare durch in-situ Konsolidierung optimiert ist und sich kostengünstig vervielfältigen lässt. Diese prototypische Anlage wird zur Prozessentwicklung und Laminatfertigung herangezogen. Eine ausführliche Charakterisierung der Laminare zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften mit denen aus konventionellen Prozessen vergleichbar sind.

Für die Verarbeitung der hergestellten Laminare zu Thermoplast-Hybridbauteilen wird eine neuartige Verfahrenskombination untersucht. Diese besteht aus einem Thermoformprozess, bei dem das Laminat hauptzeitparallel mit einer Thermoplast-Funktionsstruktur gefügt wird. Eine abschließende Bewertung beantwortet die Forschungsfrage, inwiefern eine wirtschaftliche Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes mittels in-situ Konsolidierung und deren Verarbeitung zu Hybridbauteilen möglich ist.

ISBN 978-3-86359-870-9



9 783863 598709

Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen



Henning Janssen

Henning Janssen

# Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen



# Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen

## Additive Process Chain for the Production of Thermoplastic Fiber Composite Hybrid Components

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Henning Janssen

### **Berichter:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Tag der mündlichen Prüfung: 13. März 2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.



# ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Henning Janssen**

Additive Prozesskette zur Herstellung von  
thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs  
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh  
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher  
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 14/2020



**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Henning Janssen:

Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2020  
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-870-9

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

# Vorwort

Diese Dissertationsschrift entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, Gruppen- und Abteilungsleiter bzw. Oberingenieur am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen. Neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen, die in dieser Arbeit beschrieben sind, durfte ich in einem einmaligen Umfeld der Kreativität und Leistungsbereitschaft ebenso besondere Kollegialität erleben.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher als ersten Berichter für seine Betreuung und für das Setzen der Rahmenbedingungen am Fraunhofer IPT bzw. WZL der RWTH Aachen, die eine erfolgreiche Erstellung der Dissertationsschrift erst ermöglichen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer als zweiten Berichter und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler als Vorsitzenden der Prüfungskommission. Ebenso gilt meinen Vorgängern als Gruppen- und Abteilungsleiter, Dr.-Ing. Joffrey Stimpfl bzw. Dr.-Ing. Michael Emonts, Dank für das geschenkte Vertrauen.

Weiterhin spreche ich den Kollegen, Wissenschaftlern und Technikern, der Abteilung Faserverbund- und Lasersystemtechnik für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung meinen besonderen Dank aus.

Nicht weniger bin ich den ehemaligen studentischen Mitarbeitern zu Dank verpflichtet. Die gemeinsame Erarbeitung von Forschungsergebnissen hat einen wesentlichen Einfluss auf die erfolgreiche Erstellung dieser Dissertation gehabt. Besonders möchte ich namentlich Arne Holkenbrink, Christian Wasiak und Philipp Seinsche nennen.

Weiterer Dank gilt insbesondere Richard Schares für die zahlreichen inhaltlichen Diskussionen und Anregungen sowie die gemeinsame Motivation gegen Ende des Promotionsprozesses.

Zusätzlicher Dank gilt dem BMBF, welches durch die Förderung der Projekte *E-Profit* und *LightFlex* viele der Forschungsergebnisse ermöglicht hat.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die während der gesamten Zeit stets ein starker Rückhalt war. Meine Eltern Lore und Prof. Dr. Arnold Janssen haben mich während meines Studiums und darüber hinaus bestmöglich unterstützt, mein Bruder Dr. Arend Janssen war stets Inspiration. Meiner Frau Katrin bin ich für das große Verständnis und die Unterstützung auch außerhalb der Erstellung der Promotion zu größtem Dank verpflichtet. Unendlich dankbar bin ich, dass meine Tochter Elisa Marie die Zeit vor dem Promotionsvortrag und der Promotionsprüfung so kurzweilig gestaltet hat.

Für meine liebe Familie



# Zusammenfassung

Aus dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse lässt sich ein Bedarf für eine wirtschaftliche und flexible Fertigung von maßgeschneiderten Faserverbundbauteilen auf Basis von unidirektionalen thermoplastischen Halbzeugen ermitteln. Diese Dissertation leistet dazu einen Beitrag, indem eine additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen erforscht wird.

Die besondere Herausforderung bei der Fertigung von FVK-Bauteilen besteht darin, dass zwei verschiedene Materialphasen verarbeitet werden müssen und sich die Prozessschritte untereinander stark beeinflussen. Im Sinne des Wertschöpfungsmanagements bieten thermoplastische Tapes eine besondere Chance, die Halbzeugproduktion von der diskreten Bauteilfertigung zu entkoppeln, und trotzdem über eine ausreichend hohe Flexibilität zu verfügen. Aufbauend auf physikalischen Modellen der einzelnen Prozessschritte Imprägnieren, Ablegen und Temperieren wird eine Optimierung der Prozesskette, z. B. hinsichtlich der Tapeabmaße, durchgeführt. Dies beinhaltet ebenso eine Betrachtung der Prozessrobustheit, die anhand eines statistischen Modells der in-situ Konsolidierung bewertet wird, wie auch die Untersuchung verschiedener Möglichkeiten zur Skalierung der Produktivität und deren Auswirkungen auf die Gesamtanlageneffektivität.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung einer Anlagentechnik für die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ein. Das resultierende, hochintegrierte Anlagenkonzept verfügt über ein IR-basiertes Ablegesystem, welches für die Herstellung ebener Lamine durch in-situ Konsolidierung optimiert ist und sich kostengünstig vervielfältigen lässt. Diese prototypische Anlage wird zur Prozessentwicklung und Laminatfertigung herangezogen. Auf Tapeebene kann nachgewiesen werden, dass die IR-unterstützte Tapeablage sowohl einen robusten Konsolidierungsprozess als auch eine verschnittminimierte Verarbeitung von unidirektionalen Tapes ermöglicht. Eine ausführliche Charakterisierung der Lamine, zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften mit Laminaten aus konventionellen Prozessen vergleichbar sind.

Für die Verarbeitung der hergestellten Lamine zu Thermoplast-Hybridbauteilen wird eine neuartige Verfahrenskombination untersucht. Diese besteht aus einem Thermoformprozess, bei dem das Laminat hauptzeitparallel mit einer Thermoplast-Funktionsstruktur gefügt wird. Anhand einer exemplarisch geformten Trägerstruktur in Multimaterialbauweise wird aufgezeigt, dass eine stoffschlüssige Verbindung beider Fügepartner durch eine gezielte Prozessführung ermöglicht werden kann. Eine abschließende Bewertung der Hybridbauteile sowie der erforschten Prozesskette beantwortet die Forschungsfrage, dass eine wirtschaftliche Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes mittels in-situ Konsolidierung und deren Verarbeitung zu Hybridbauteilen möglich ist.

## Summary

According to the current state of art, a strong demand exists for an economic and flexible production of tailor-made fibre composite components based on unidirectional thermoplastic semi-finished products. This thesis contributes to this topic with the research and development of an additive process chain for the production of thermoplastic fiber composite hybrid components.

The main challenge in the production of FRP components is the processing of two different material phases. This yields to a strong influence of the single process steps on each other. In terms of value chain management, thermoplastic tapes offer a special opportunity to decouple the production of semi-finished products and materials from discrete component production and still have a sufficiently high degree of flexibility. Based on the physical models of the individual process steps impregnation, draping and heating, the process chain is optimized. This also includes a consideration of the process robustness, which is evaluated with a statistical model of the in-situ consolidation process, as well as the investigation of various possibilities for upscaling of the productivity and their effects on the overall equipment effectiveness.

The gained knowledge leads to the development of a system technology for the production of load- and waste-optimized laminates. The resulting, highly integrated machine concept consists of an IR-based deposit system, which is optimized for the production of flat laminates by in-situ consolidation. It can be reproduced cost-effectively. This prototype machine system is used for process development and laminate production. On tape level it can be proven that the IR-assisted tape laying enables a robust consolidation process as well as a cut-minimized processing of unidirectional tapes. A detailed characterization of the laminates shows that the mechanical properties are comparable with laminates from conventional processes.

A novel process combination is investigated for the processing of the manufactured laminates into thermoplastic hybrid components. This consists of a thermoforming process in which the laminate is joined with a thermoplastic functional structure in parallel to the main processing time. The additive rib structure also has the function of the forming stamp, so that only a single-sided, cost-effective metal die is required. By using a multi-material reinforced composite structure, it is shown that a fusion-based connection of both joining partners can be achieved. A final evaluation of the hybrid components and the researched process chain answers the research question whether it is possible to manufacture load- and waste-optimized laminates from unidirectional tapes economically using in-situ consolidation. Furthermore, their processing into hybrid components is validated.

# Inhaltsverzeichnis

## Content

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse</b> .....	<b>5</b>
2.1	Einsatz von Faserverbundkunststoffen .....	5
2.2	Grundlagen der Faserverbundkunststoffe .....	8
2.2.1	Werkstoffe .....	8
2.2.2	Lamine .....	12
2.3	Herstellung von Thermoplast-Laminen.....	16
2.3.1	Halbzeugherstellung .....	17
2.3.2	Verarbeitung thermoplastischer Tapes .....	20
2.3.3	Anlagen zur Bandablage .....	23
2.4	Verarbeitung thermoplastischer Lamine.....	29
2.4.1	Umformen von thermoplastischen Laminen .....	30
2.4.2	Herstellen von thermoplastischen Hybridbauteilen .....	33
2.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse .....	37
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>39</b>
3.1	Wissenschaftliche Fragestellungen .....	39
3.2	Vorgehensweise.....	40
<b>4</b>	<b>Technisch-wirtschaftliche Modellierung der FVK-Prozesskette</b> .....	<b>43</b>
4.1	Modellierung der FVK-Prozesskette.....	43
4.1.1	Beurteilung der Prozesskette .....	44
4.1.2	Additive Fertigung im Leichtbau .....	48
4.1.3	Bewertungskriterien für die Leichtbauproduktivität.....	51
4.2	Modellierung der einzelnen Prozessschritte .....	53
4.2.1	Imprägnieren .....	53
4.2.2	Laminatfertigung mittels Tapelegen .....	58
4.2.3	Bauteilfertigung .....	68
4.3	Modellbasierte Optimierung der Prozesskette.....	69
4.3.1	Modellierung der verschiedenen Prozessketten.....	70
4.3.2	Vergleich verschiedener Prozessketten .....	72
4.4	Bewertung von Unsicherheiten und der Prozessfähigkeit .....	74
4.4.1	Verfügbarkeitsgrad der Anlagentechnik zur Tapeablage .....	75
4.4.2	Modellierung der Prozessstabilität der in-situ Konsolidierung .....	77
4.5	Fazit der Modellbildung .....	81
<b>5</b>	<b>Entwicklung einer Produktionsanlage zur Laminatfertigung</b> .....	<b>83</b>
5.1	Konzeption der Anlagentechnik.....	83
5.1.1	Anforderungsdefinition .....	83
5.1.2	Funktionen und Lösungsprinzipien.....	85
5.1.3	Kombination zu Konzepten .....	88

5.2	Methodisches Gestalten und Validierung der Hauptmodule.....	90
5.2.1	Heizmodul .....	90
5.2.2	Schneid- und Vorschubeinheit .....	94
5.2.3	Konsolidierungsmodul.....	97
5.3	Aufbau der Gesamtanlage .....	99
5.3.1	Einzelmodule und Gesamtkonzept.....	99
5.3.2	Gesamtanlage.....	101
5.4	Fazit der Anlagenkonstruktion.....	103
<b>6</b>	<b>Prozessuntersuchung der Laminatfertigung .....</b>	<b>105</b>
6.1	Prozessentwicklung auf Tapeebene .....	105
6.1.1	Aufbau des Schältests .....	106
6.1.2	Prozessuntersuchung .....	109
6.2	Laminatfertigung .....	115
6.2.1	Optimierung der Prozess- und Systemparameter .....	115
6.2.2	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	117
6.2.3	Makroskopische Laminatqualität .....	120
6.3	Fazit der Laminatfertigung.....	125
<b>7</b>	<b>Fertigung der FVK-Hybridbauteile .....</b>	<b>127</b>
7.1	Hybridbauteilfertigung .....	127
7.1.1	Beschreibung des Fügeverfahrens .....	128
7.1.2	Thermoformen mit kombiniertem Fügeprozess.....	129
7.2	Bewertung der Prozesskette .....	131
7.2.1	Technische Bewertung.....	131
7.2.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	136
7.3	Fazit der Bauteilfertigung .....	140
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>141</b>
8.1	Zusammenfassung.....	141
8.2	Ausblick.....	142
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>

## Abkürzungsverzeichnis

### Abbreviations

AFP	Bandablageverfahren (engl.: automated fiber placement)
ATL	Tapelegeverfahren (engl.: automated tape laying)
CF	Kohlenstofffaser (engl.: carbon fiber)
CF-HM	Kohlenstofffaser mit hoher Steifigkeit (engl.: high modulus)
CF-HT	Kohlenstofffaser mit hoher Festigkeit (engl.: high tenacity)
CFK	kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: differential scanning calorimetry)
EP	Epoxidharze
FDM	additives Schmelzverfahren (engl.: fused deposition modelling)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVK	Faserverbundkunststoffe
GF	Glasfaser
GFK	glasfaserverstärkte Kunststoffe
ILSS	interlaminare Scherfestigkeit (engl.: interlaminar shear strength)
OEE	Gesamtanlageneffektivität (engl.: overall equipment effectiveness)
RTM	Harzinjektionsverfahren (engl.: resin transfer molding)
UD	unidirektional
UP	ungesättigte Polyesterharze
PA	Polyamid
PEEK	Polyetheretherketon
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
Prepreg	vorimprägnierte Halbzeuge (engl.: pre-impregnated fiber)
SLM	selektives Laserschmelzen (engl.: selective laser melting)
SLS	selektives Lasersintern
TGA	thermogravimetrische Analyse
VCSEL	Oberflächenemitter (engl.: vertical-cavity surface-emitting laser)



## Formelzeichen

### Formula Symbols

#### Großbuchstaben

$A_L$	$\text{mm}^2$	Fläche des Laminats bzw. einer Lage
$A_Q$	$\text{mm}^2$	Querschnittsfläche eines Bauteils
$B_{\text{lam}}$	$\text{mm}$	Laminatbreite
$B_i$		BIOT-Zahl
$D_b$	$[0 \dots 1]$	Verbindungsgüte (engl.: degree of bonding)
$D_h$	$[0 \dots 1]$	Diffusionsgrad (engl.: degree of healing)
$D_{ic}$	$[0 \dots 1]$	Kontaktanteil (engl.: degree of intimate contact)
$E$	$\text{GPa}$	Elastizitätsmodul
$E_f$	$\text{GPa}$	Biegemodul
$F_K$	$\text{N}$	Konsolidierungskraft
$F_P$	$\text{N}$	gemessene Schälkraft
$F_R$	$\text{N}$	Reibkraft beim Schältest
$F_0$	$\text{N}$	Vorspannkraft beim Schältest
$H_i$	$\text{mm}$	Dicke des Halbzeugs (Schichtdicke)
$H_{\text{lam}}$	$\text{mm}$	Dicke des Laminats
$H_P$	$\mu\text{m}$	Höhe einer Pore
$\Delta H_f$	$\text{J/g}$	Schmelzenthalpie des Verbundmaterials
$\Delta H_{f,100}$	$\text{J/g}$	Schmelzenthalpie des reinen Polymers
$K_P$	$\text{m}^2$	Permeabilität
$L_A$	$\text{mm}$	Auflagerabstand im Biegeversuch
$L_{\text{lam}}$	$\text{mm}$	Laminatlänge
$L_P$	$\mu\text{m}$	Länge einer Pore
$\Delta \bar{L}$	$\text{mm}$	Mittlere Längenabweichung beim Schneiden
$m_L$	$\text{kg}$	Masse des Laminats
$N_F$		Anzahl Filamente
$N_L$		Lagenanzahl im Laminat
$P_{\text{Substrat}}$	$\text{kW}$	Strahlerleistung der Substratzone
$P_{\text{Tape}}$	$\text{kW}$	Strahlerleistung der Tapezone

$P_{\text{Zwickel}}$	kW	Strahlerleistung im Zwickelbereich
$\dot{Q}$	J/s	Wärmestrom
R	MPa	Zugfestigkeit
R	m	Krümmungsradius
T	°C	Ziel- bzw. Prozesstemperatur
$T_{i,j}$		Bezeichnung des Tapes $j$ in Lage $i$
$T_G$	°C	Glasübergangstemperatur
$T_K$	°C	Kristallisationstemperatur
$T_{K0}$	°C	Kontakttemperatur
$T_{\text{Lam}}$	°C	Temperatur des Laminats beim Thermoformen
$T_m$	°C	Schmelztemperatur
$T_{\text{PA12}}$	°C	Vorwärmtemperatur der Rippenstruktur aus PA12
$T_{\text{Rolle}}$	°C	Temperatur des Konsolidierungssystems
$T_W$	°C	Werkzeugtemperatur
$T_0$	°C	Ausgangstemperatur
$T_1$ bzw. $T_2$	°C	Temperatur der Fügepartner
$T_\infty$	°C	Umgebungstemperatur
V	mm <sup>3</sup>	Volumen
$V_A$	[0...1]	Verschnittanteil
$V_{\text{lam}}$	mm <sup>3</sup>	Volumen des Laminats

### Kleinbuchstaben

$b_P$	mm	Breite des Probekörpers
$b_T$	mm	Tapebreite
$b_{T,  }$	mm	Tapebreite, projiziert auf Laminatkante
$c_i$		Konstanter Faktor im vereinfachten Modell zur Berechnung der Zykluszeit
$c_p$	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
d	mm	Abstand zweier Strahler zueinander
$h_P$	mm	Dicke des Probekörpers
$h_T$	mm	Tapedicke
$\Delta h$	mm	Höhendifferenz durch Laminatkrümmung
$k_i$		Anzahl der Wiederholungen des jeweiligen Prozesses

$l_{imp}$	m	Fließweg
$l_i$	mm	Tape- bzw. Halbzeuglänge
$l_P$	mm	Länge des Probekörpers
$l_T$	mm	Länge eines abgelegten Tapes
$\tilde{l}_T$	mm	zusätzliche Verschnittlänge eines abgelegten Tapes
$m_{Ein}$	kg	Masse des Verwendeten Materials inkl. Verschnitt
$m_{Lam}$	kg	Masse des Laminates
$n$		Anzahl der Versuchswiederholungen
$n_{Ab}$		Gesamtanzahl der Ablegevorgänge
$n_T$		Tapeanzahl
$n_T^{Sys}$		Anzahl simultan abgelegter Tapes
$\Delta p$	Pa	Druckgradient beim Imprägnieren
$\bar{p}_{Sys}$		Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems
$\bar{p}_T$		Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bandapplikators
$r_f$	$\mu m$	Faserdurchmesser
$t_{Ausfall}$	s	unproduktive Ausfallzeit
$t_{const}$	s	konstante Prozesszeit, unabhängig von Laminatdicke
$t_{ges}$	s	gesamte Durchlaufzeit der Prozesskette
$t_{imp}$	s	Dauer des Imprägniervorgangs
$t_{lam}$	s	Herstellzeit eines Laminats
$t_{real}$	s	Reale Fertigungszeit eines Laminats
$T_{rep}$	s	Ausfallzeit bei Maschinenstillstand
$t_{rot}$	s	Zeit zum Einstellen der Faserorientierung
$t_T$	s	Dauer der Ablage eines Tapes
$t_{temp}$	s	Dauer des Aufheiz- und Abkühlvorgangs
$t_{T,0}$	s	Nebenzeit bei der Laminatfertigung
$u_z$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
$v_T$	mm/s	Ablegegeschwindigkeit beim Tapelegen
$v_P$	mm/min	Prüfgeschwindigkeit im Biegeversuch
$w$	mm	Stützweite bei der Berechnung der Krümmung
$z$	mm	gemessene Laminathöhe zur Krümmungsmessung
$\Delta z$	mm	Strahlerabstand zur Tape-Oberfläche

**Griechische Buchstaben**

$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha$	%	Kristallisationsgrad
$\beta, \tilde{\beta}$	°	Winkel zwischen Ablegerichtung und Laminatkante
$\kappa$	1/m	Oberflächenkrümmung
$\kappa_x$	1/m	Hauptkrümmung in x-Richtung
$\kappa_y$	1/m	Hauptkrümmung in y-Richtung
$\lambda$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
$\eta$	Pa s	Schmelzviskosität
$\sigma_B$	MPa	Biegefestigkeit
$\sigma_{fM}$	MPa	maximale Biegespannung im Biegeversuch
$\sigma_{45}$	mm	Streuung der Schnittlänge bei $v_T = 45$ mm/s
$\sigma_{240}$	mm	Streuung der Schnittlänge bei $v_T = 240$ mm/s
$\tau$	MPa	scheinbare interlaminiäre Scherfestigkeit
$\varphi_f$	%	Faservolumengehalt
$\varphi_{f,max}$	%	maximal erreichbarer Faservolumengehalt
$\varphi_m$	%	Fasermassenanteil
$\varphi_P$	%	Porenanteil
$\varphi_{P,inter}$	%	Porenanteil in der Fügezone (interlaminiär)
$\varphi_{P,intra}$	%	Porenanteil innerhalb eines Tapes (intralaminiär)
$\Gamma$	N/mm	Energiefreisetzungsrates beim Schältest (auch: kJ/m <sup>2</sup> )
$\Theta$	°	Schälwinkel

# 1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach ressourcen- und energieeffizienten Produkten hat in den letzten Jahren den Bedarf an Leichtbautechnologien erhöht. Dabei werden im Sinne des Materialleichtbaus vermehrt Faserverbundkunststoffe (FVK) eingesetzt [VOGT15, S. 12–15]. Beispielhaft sei hier u. a. die Automobilindustrie zu nennen, in der zunehmend Bestrebungen unternommen wurden, metallische Werkstoffe im Karosseriebau durch kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zu substituieren. Dabei wird jedoch offensichtlich, dass klassische FVK-Verarbeitungsverfahren unter Verwendung duroplastischer Matrixsysteme, wie z. B. Harzinjektionsverfahren (engl.: Resin Transfer Molding, RTM), trotz hohem Entwicklungsaufwand aufgrund der hohen Produktionskosten nur bedingt für die Großserie geeignet sind [FRE114].

Über die reine Substitution von Materialien hinaus erfordern wirtschaftliche Leichtbauansätze vielmehr die interdisziplinäre Betrachtung der Methoden, Werkstoffe und Produktion. Eine systemische Betrachtung ist genauso notwendig wie eine klare Definition der Randbedingungen. Eine wesentliche Herausforderung liegt darin, die Kombination unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe zu optimieren. Dies kann entweder durch produktionsintegrierte Hybridisierung oder durch anschließende Fügeverfahren erreicht werden. [HENN17, S. 127–128]

Endlosfaserverstärkte Faserverbundkunststoffe mit thermoplastischer Matrix bieten bei hohem Leichtbaupotenzial eine Möglichkeit zur großserientauglichen, automatisierten Verarbeitung. Sie lassen sich in verschiedenen Verfahren mit anderen Werkstoffen verbinden und erfreuen sich daher zunehmender Beliebtheit. Vollkonsolidierte flächige Halbzeuge aus endlosfaserverstärktem Thermoplast, sog. Organobleche, finden aufgrund ihrer einfachen und schnellen Weiterverarbeitbarkeit, z. B. in Umformverfahren, vermehrt Einsatz in industriellen Anwendungen. [BONE15]

Die Organobleche sind dabei meist mit Glasfasergeweben verstärkt und besitzen eine konstante Dicke. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Herstellung der Halbzeuge, jedoch wird das Leichtbaupotenzial des anisotropen Faserverbundwerkstoffs nicht optimal ausgeschöpft. Einerseits ist die durch die textilen Halbzeuge vorgegebene Faserorientierung, vornehmlich  $[0^\circ, 90^\circ]$ , nur in den seltensten Fällen lastoptimal in Bezug auf das Bauteil. Andererseits führt die Mikroondulation der Fasern, z. B. in Geweben, zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu unidirektional vorliegenden Fasern. Zusätzlich sind die Halbzeuge nicht an die Bauteilgeometrie angepasst, sodass teils erheblicher Verschnitt entsteht. Dies führt insbesondere bei der Verwendung von Kohlenstofffasern zu deutlichen Mehrkosten in der Bauteilproduktion. Daraus resultieren zahlreiche Bestrebungen, belastungs- und verschnittoptimierte Lamine mit ondulationsfreier Faserverstärkung zu fertigen. [SCHI16; BREC11]

Eine Möglichkeit, belastungsoptimierte Lamine flexibel für den jeweiligen Anwendungsfall herzustellen, liegt in der Verwendung von unidirektional faserverstärkten Bändern, sogenannten UD-Tapes. Sie lassen sich in in-situ Tapelegeverfahren zu

Schalenstrukturen verarbeiten. Bisher wird diese Technologie hauptsächlich in Wickelverfahren eingesetzt. Zur Laminatherstellung ist die Produktivität der bestehenden Verfahrensvarianten im Vergleich zur kontinuierlichen Fertigung von Organoblechen, z. B. mit investitionskostenintensiven Doppelbandpressen, relativ gering. [CHRI14; HOLS14; BREC12; BREC10]

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst lose, belastungsoptimierte Gelege aus UD-Tapes herzustellen und diese in einem nachgeschalteten Pressprozess zu ebenen Laminaten zu verpressen [GRAF16]. Der zusätzliche Prozessschritt ist dabei zeit- und energieintensiv. Zusätzlich lassen sich komplexe Laminataufbauten mit Dicksprüngen nur aufwändig herstellen, da angepasste und dadurch kostenintensive Werkzeuge oder der Einsatz von Autoklaven notwendig sind. Eine Weiterverarbeitung von Organoblechen zu dreidimensionalen Hybridbauteilen erfolgt meistens in Hinterspritzprozessen. Dies erfordert aufwändige Spritzgusswerkzeuge, sodass diese Prozesskette für eine flexible Produktion nur eingeschränkt geeignet ist.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine neuartige, flexible FVK-Prozesskette entwickelt werden, die auf der Verwendung von unidirektionalen Halbzeugen (Tapes) basiert und daraus anwendungsspezifische belastungs- und verschnittoptimierte Laminat erzeugt. Dazu muss eine entsprechende energieeffiziente und investminimierte Anlagentechnologie aufgebaut werden, die die Vorteile der Tapeverarbeitung mit der Wirtschaftlichkeit einer kontinuierlichen Fertigung kombiniert. Insbesondere bei der Verwendung von teuren Kohlenstofffasern sollen damit die Fertigungskosten durch eine erhöhte Materialausnutzung gesteigert werden.

Zusätzlich wird die Herstellung von Hybridbauteilen aus individuell belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten untersucht. Das Umformen von unidirektionalen Laminaten ist dabei weit weniger erforscht als das Umformen von textilen Organoblechen, da sich die Fließ- und Drapiereigenschaften wesentlich unterscheiden. Um die Flexibilität der Prozesskette auch für die Umform- und Fügeprozesse beizubehalten, soll eine neuartige Verfahrenskombination erforscht und demonstriert werden. Diese besteht aus dem hauptzeitparallelen, intrinsischen Fügen einer additiv gefertigten Thermoplast-Rippenstruktur mit dem FVK-Laminat im Thermoformprozess.

Da der Vorteil dieser optimierten Prozesskette besonders in ihrer Wirtschaftlichkeit für flexible, individualisierte Produktionsszenarien bei gleichzeitig guten Leichtbaueigenschaften liegt, werden zunächst die einzelnen Prozessschritte hinsichtlich ihrer wesentlichen Produktionsfaktoren modelliert. Anhand dieser Modellbeschreibung lassen sich technisch-wirtschaftlich optimale Lösungen für die einzelnen Prozessschritte ermitteln. Zur Validierung der Lösungen wird eine entsprechende Prozesskette aufgebaut, welche mit der Herstellung von belastungsoptimierten Thermoplast-Laminaten aus UD-Tapes beginnt und mit der Fertigung von Hybridbauteilen endet. Anhand dieser Kette werden die einzelnen Prozesse untersucht und bewertet.

## Introduction

The increasing demand for resource- and energy-efficient products has fostered the need for lightweight design and corresponding production technologies in recent years. Fiber-reinforced composites (FRP) are more frequently used for lightweight design [VOGT15, p.12-15]. One example is the automotive industry, where efforts are increasingly being made to replace metallic materials in car body construction with carbon fiber reinforced plastics (CFRP). However, it becomes obvious that classical FRP processes using thermoset matrix systems, such as resin transfer molding (RTM), are only partially suitable for mass production due to the high production costs despite the high amount of research activities in this area [FRE14].

Beyond the pure substitution of materials, economical lightweight construction approaches require interdisciplinary consideration of methods, materials and production. A systemic consideration is as necessary as a clear definition of the boundary conditions. An essential challenge is to optimize the combination of different lightweight materials. This can be achieved either by production-integrated hybridization or by subsequent joining processes. [HENN17, P.127–128]

This is why endless fiber-reinforced composites with thermoplastic matrix are gaining popularity. With a high potential for lightweight design, they offer the possibility of automated processing suitable for large-scale production and can be simultaneously combined with other materials in various processes. Fully consolidated flat semi-finished products made of continuous fiber-reinforced thermoplastics, so-called organic sheets, are more often used in industrial applications due to their simple and fast further processing, e.g. in forming processes. [BONE15]

The organic sheets are usually reinforced with glass fiber fabrics and have a constant thickness. This enables continuous production of the semi-finished products. However, the lightweight potential of the anisotropic fiber composite material is not optimally exploited. On the one hand, fiber orientation given by the textile semi-finished products, primarily  $[0^\circ, 90^\circ]$ , is only rarely load-optimal in relation to its final component. On the other hand, the microondulation of fibers, especially in fabrics, leads to a deterioration of the mechanical properties compared to unidirectional fibers. In addition, the semi-finished products are not adapted to the geometry of the component, which results in considerable waste. This leads to significant additional costs in component production, especially when carbon fibers are used. Hence, numerous efforts to produce load- and waste-optimized laminates with ondulation free fiber reinforcement exists. [BREC11; SCHI16]

One possibility to produce load-optimized laminates flexibly for the respective application is the use of unidirectional fiber-reinforced tapes, so-called UD tapes. They can be welded into shell structures in in-situ tape laying processes. So far, this technology is mainly used in winding processes. For the manufacturing of laminates, the productivity of the existing process variants is relatively low compared to the continuous production

of organic sheets, e.g. with investment cost-intensive double belt presses. [BREC10a; BREC12; HOLS14; CHRI14]

A further possibility is to initially produce loose, load-optimised staples from UD tapes and then consolidate them into flat laminates in a downstream pressing process [GRAF16]. The additional process step is intensive in time and energy. In addition, complex laminate structures with thickness changes can only be produced with great effort, since adapted and thus cost-intensive tools or the use of autoclaves are necessary. Further processing of organic sheets into three-dimensional hybrid components is usually carried out in overmolding processes. This requires complex injection molding tools, so that this process chain is only suitable for flexible production to a limited extent.

Therefore, a novel flexible FRP process chain based on the use of unidirectional semi-finished products (Tapes) shall be developed within the scope of this work and used to produce application specific load- and waste-optimized laminates. For this purpose, a corresponding energy-efficient system technology is required, which combines the advantages of tape processing with the economic efficiency of continuous production and requires low investment costs. Especially when expensive carbon fibers are used, production costs are to be increased through increased material utilization.

In addition, the production of hybrid components from individually load- and waste-optimized laminates is investigated. The forming of unidirectional laminates is far less understood in literature than the forming of textile organic sheets, since the flow and draping properties differ considerably. In order to maintain the flexibility of the process chain also for the forming and joining processes a novel process combination shall be researched and demonstrated. It consists of the joining process of an additive manufactured thermoplastic rib structure with the load-optimized laminate, integrated in the thermoforming process.

Since the advantage of this optimized process chain lies particularly in its cost-effectiveness for flexible, individualized production scenarios with simultaneously good lightweight construction properties, the individual process steps are first modelled with regard to their essential production factors. Based on this model description, technically and economically optimal solutions for the individual process steps are determined. To validate the solutions, a corresponding process chain is set up, which begins with the production of load-optimized thermoplastic laminates from UD tapes and ends with the production of hybrid components. The individual processes are examined and evaluated based on this production chain.

## 2 Stand der Erkenntnisse

### *State of the Art*

In den letzten Jahren ist der Leichtbau aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Ressourcen- und Energieeffizienz in konventionellen Industrieanwendungen und im Automobilbau verstärkt in den Fokus gerückt. Vermehrt werden dabei neben Konzepten des Strukturleichtbaus, wie z. B. der Integralbauweise, neue Werkstoffe, insbesondere FVK, eingesetzt [VOGT15, S. 12–15]. Zunächst wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand des Einsatzes von FVK und sein wirtschaftliches Potenzial vorgestellt. Danach werden die werkstofflichen Grundlagen und die sich daraus ergebenden produktionstechnischen Herausforderungen beschrieben. Aktuell verfügbare Prozessketten zur Verarbeitung thermoplastischer FVK und entsprechende Produktionsanlagen werden präsentiert und evaluiert.

Aus dem Stand der Technik lässt sich zusammenfassend ein Bedarf für hochautomatisierte, flexible Prozessketten und Produktionsanlagen ableiten. Dieser bildet die Grundlage für die vorliegende Forschungsfragestellung.

### 2.1 Einsatz von Faserverbundkunststoffen

#### *Application of fiber reinforced composites*

Faserverbundkunststoffe spielen seit langem in einigen Branchen, wie der Luft- und Raumfahrt sowie bei Sportanwendungen, eine Schlüsselrolle zum Erzielen von guten Leichtbaueigenschaften. Zusätzlich werden sie aufgrund ihrer guten chemischen Beständigkeit, z. B. in Rohrleitungen, für die chemische Industrie eingesetzt [WITT14, S. 34–35]. Gleichzeitig sind FVK in den letzten Jahren zunehmend in den Forschungsfokus der Automobilindustrie gerückt. Sie bieten das Potenzial, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren und damit den Kraftstoffverbrauch zu senken bzw. die Reichweite der Fahrzeuge zu erhöhen. [VOGT15, S. 8–15]

Etliche Forschungsvorhaben haben das Ziel, Karosseriebauteile, die herkömmlich aus Stahlblech gefertigt werden, durch FVK-Schalenbauteile zu ersetzen. Die reine Substitution von Metallen durch CFK hat sich aber in vielen Anwendungsfällen als ungeeignet erwiesen. Die durch die materialspezifischen Anforderungen hervorgerufenen Fragestellungen, wie z. B. Berücksichtigung der Anisotropie und automatisierte Verarbeitungsverfahren für Faserhalbzeuge, sind bisher nicht ausreichend beantwortet, was in hohen Bauteilkosten resultiert. [EICK14, S. 50–70]

Das weltweite Marktvolumen des Ausgangsmaterials Kohlenstofffaser betrug im Jahr 2017 2,59 Mrd. \$ und weist eine jährliche Wachstumsrate von 11 % auf. 82,7 % aller Kohlenstofffasern werden zur Herstellung von Bauteilen aus CFK verwendet, die ein Marktvolumen von 14,7 Mrd. \$ umfassen. Dies entspricht einer Materialmenge von 114.000 t. Da vermehrt eine automatisierte Bauteilfertigung in den Vordergrund rückt, werden zunehmend FVK mit thermoplastischer Matrix eingesetzt. So wächst der Markt

der thermoplastischen FVK mit einer jährlichen Wachstumsrate von 16,8 % überdurchschnittlich im Vergleich zu faserverstärkten Duroplasten. Der Marktanteil von Thermoplast-CFK Bauteilen liegt bei 4,75 Mrd. \$, was einem Anteil von 28,8 % entspricht. Bei dem Vergleich verschiedener Branchen fällt jedoch auf, dass es sich um einen sehr heterogenen Markt handelt. Bei einer mengenmäßigen Betrachtung entfallen 36 % Marktanteil auf die Luft- und Raumfahrt und 24 % auf den Automobilbau. Ein monetärer Vergleich führt jedoch zu anderen Ergebnissen: Der CFK-Umsatz in der Luft- und Raumfahrt ist mit 12,91 Mrd. \$ (56 %) weitaus größer als im Fahrzeugbau, der einen Umsatz von 4,17 Mrd. \$ (18 %) vorweisen kann. [WITT18]

Diese Marktverteilung lässt sich durch die verschiedenen Leichtbau- und Qualitätsanforderungen sowie unterschiedlichen Kostenstrukturen der verschiedenen Branchen erklären. Tabelle 2.1 stellt die akzeptierten Leichtbaumehrkosten und geforderten Stückzahlen für verschiedene Anwendungen dar. Es ist ersichtlich, dass im Automobilbau nur geringe Mehrkosten von wenigen Euro pro Kilogramm eingespartem Gewicht akzeptiert werden. Die zuvor beschriebene geringe Verbreitung von CFK im Automobilbau ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die aktuell hohen CFK-Bauteilkosten diese zulässigen Mehrkosten teils deutlich überschreiten.

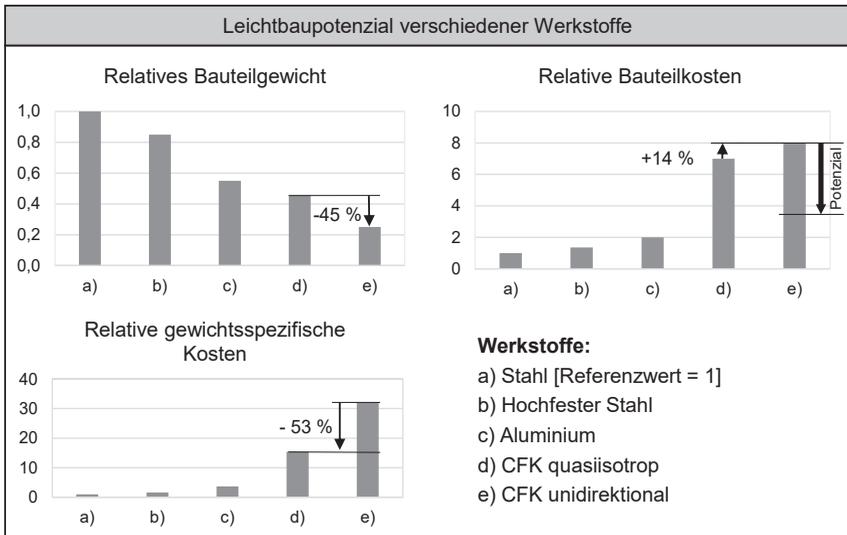
**Tabelle 2.1:** Akzeptierte Leichtbaumehrkosten nach Branchen [HANS16, S. 15]

*Accepted lightweight costs in industrial sectors*

Branche	Mehrkosten [€/kg]	Stückzahl [1/Jahr]
Automobilbau	5	10000 - 1000000
Luftfahrt	500	100
Raumfahrt	5000	10

Der Vergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe zeigt, dass CFK einerseits sehr gute gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften bietet, jedoch andererseits die Materialkosten zurzeit noch sehr hoch sind. Das Bauteilgewicht und die entstehenden Bauteilkosten beim Einsatz verschiedener Materialien werden in Bild 2.1 gegenübergestellt [LÄSS12, S. 14].

Im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbauteilen bietet der Einsatz von quasiisotropem CFK eine Gewichtsreduzierung um mehr als die Hälfte. Wenn der Werkstoff CFK unidirektional im Sinne einer Belastungsoptimierung eingesetzt wird, verringert sich das Bauteilgewicht nochmals. Es beträgt dann ein Viertel des Gewichts des Referenzbauteils aus Stahl. Gleichzeitig wird der Nachteil des Einsatzes von CFK als Konstruktionswerkstoff sichtbar: Die Kosten steigen auf das sieben- bis achtfache im Vergleich zum Stahl-Referenzbauteil. Hervorzuheben ist, dass die Kosten des unidirektionalen CFK-Bauteils nochmals um 14 % über den Kosten eines Bauteils aus quasiisotropem CFK liegen, obwohl 45 % weniger Material benötigt wird.



**Bild 2.1:** Vergleich von Bauteilgewicht und Kosten in Abhängigkeit verschiedener Werkstoffe, in Anlehnung an [LÄSS12, S. 14]

*Comparison of different materials regarding cost and part-weight*

Für quasiisotropes und unidirektionales CFK werden die gleichen Ausgangsmaterialien, d. h. Kohlenstofffaser und Matrix, verwendet. Daher ist dieser Preisunterschied auf die Fertigungsprozessketten bzw. die Verfügbarkeit der Halbzeuge zurückzuführen. Wenn es gelingt, unidirektionales CFK zu gleichen gewichtsspezifischen Produktionskosten wie quasiisotropes CFK zu verarbeiten, lassen sich die relativen Bauteilkosten von CFK auf das 3,8-fache der Kosten des Stahlbauteils reduzieren. Allein durch andere Verarbeitungsverfahren können damit die CFK-Bauteilkosten gegenüber dem Stand der Technik um mehr als 50 % gesenkt werden. Dieses Potenzial nutzbar zu machen, ist Gegenstand dieser Dissertation.

Gemittelt über die verschiedenen Anwendungen liegen die gewichtsspezifischen Kosten für CFK-Bauteile bei 127 \$/kg [KRAU16, S. 12]. LÄSSER selbst geht davon aus, dass sich bis zum Jahr 2020 die Kosten eines Kohlenstofffaser-Referenzbauteils um 30 % reduzieren lassen. Der wesentliche Treiber liegt dabei mehr in effizienteren und automatisierten Prozessen und weniger auf der Reduktion der Rohstoffkosten selbst. [LÄSS12, S. 18]

Es ist somit festzustellen, dass das Potenzial der überlegenen Materialeigenschaften von CFK aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit im Massenmarkt der Automobilindustrie noch nicht ausgeschöpft werden kann. Jedoch wird erwartet, dass ab dem Jahr 2020 eine größere Menge CFK im Automobilbau verarbeitet wird als in der Luftfahrt [KRAU16, S. 21]. Es sei darauf hingewiesen, dass das Marktvolumen der kostengünstigeren glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) alleine in Europa mit einem Absatz von

mehr als 1 Mio. t pro Jahr mehr als zehnmal so groß ist wie der weltweite CFK Markt. [KÜHN15]

Dies zeigt, dass auch in Zukunft CFK ein teurer Werkstoff bleiben wird, der nur für hochbelastete Bauteile bzw. in Kombination mit GFK oder anderen Materialien, bspw. unverstärkten Kunststoffen, selektiv zum Einsatz kommen wird. Daher wird in dieser Dissertation ebenfalls die Herstellung von CFK-Hybridbauteilen betrachtet.

## 2.2 Grundlagen der Faserverbundkunststoffe

### *Basics of fiber-reinforced composites*

Die effiziente Verarbeitung von FVK setzt ein Verständnis für die Besonderheiten des Verbundwerkstoffs voraus. Da die Bauteileigenschaften von zahlreichen werkstofflichen Faktoren beeinflusst werden, wird im Folgenden der Aufbau von FVK, beginnend auf Mikroebene bis hin zum mehrlagigen Laminat, zusammengefasst.

### 2.2.1 Werkstoffe

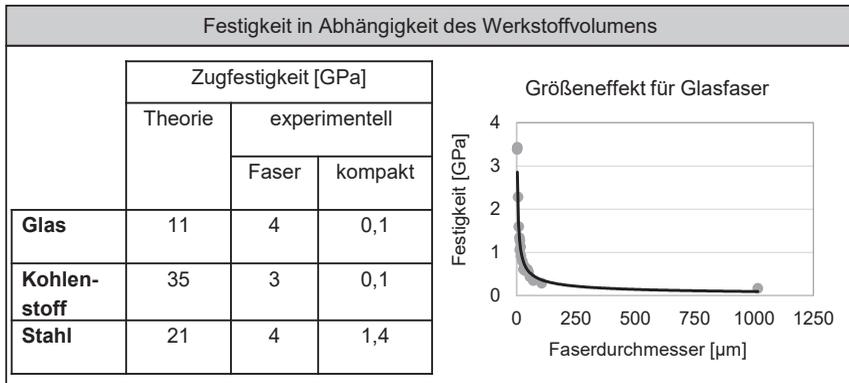
#### *Materials*

FVK sind eine moderne Werkstoffklasse, bei der sich durch die gezielte Kombination zweier Verbundkomponenten maßgeschneiderte Eigenschaften einstellen lassen [WITT14, S. 33]. Die beiden Komponenten sind die Verstärkungsfasern und der Matrixkunststoff. Während die Verstärkungsfasern die Kraftleitung und somit die mechanischen Eigenschaften, insbesondere unter Zugbelastung, bestimmen, kommen der Polymermatrix verschiedene Aufgaben zu. Neben dem Fixieren der geometrischen Lage der Fasern und der Übertragung der Kräfte auf die einzelnen Fasern stützt die Matrix die Fasern bei Druckbeanspruchung ab. Zusätzlich isoliert die Matrix die Fasern vor den Einwirkungen der Umgebungsmedien. [MENG11, S. 258]

#### **Faser**

Ähnlich zu den in der Natur vorkommenden Faserverbundstrukturen, wie z. B. in den Tragstrukturen von Pflanzen, kommen bei modernen künstlichen FVK-Werkstoffen technische Fasern zum Einsatz [SCHÜ05, S. 1–5]. Die guten mechanischen Eigenschaften von FVK sind darauf zurückzuführen, dass ein Material in Faserform deutlich höhere Festigkeitswerte aufweist als derselbe Werkstoff in kompakter Form [EHRE06, S. 2].

Insbesondere bei spröden Werkstoffen wird die Materialfestigkeit wesentlich durch Fehlstellen im Material bestimmt. Mit größerem Werkstoffvolumen steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und die Größe dieser Defekte an. Die statistische Theorie des Sprödbuchs nach WEIBULL bildet dieses Phänomen ab. So liegt die Festigkeit eines kompakten Materials um ein Vielfaches unter der rechnerischen Festigkeit, s. Bild 2.2 links. [SCHÜ05, S. 21–22]

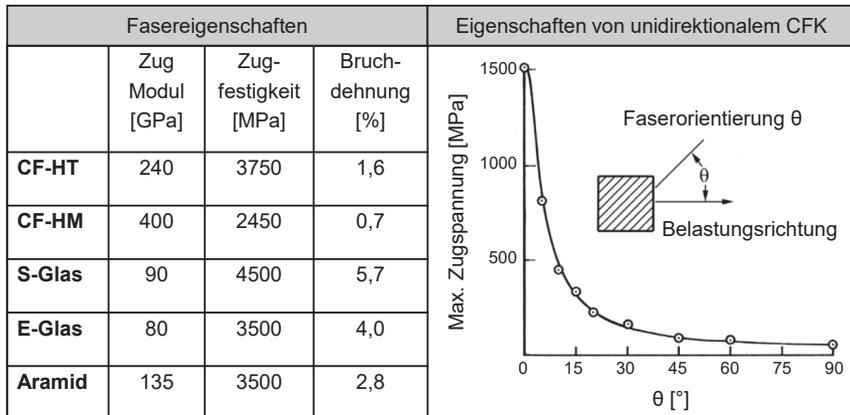


**Bild 2.2:** Größeneinfluss auf die Festigkeit von Glasfasern [EHRE06; FLEM03; GRIF21]  
*Effect of fiber diameter on material strength*

Die Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen bei Werkstoffen in Faserform sinkt ebenfalls, da das vorhandene Werkstoffvolumen im Vergleich zum kompakten Material deutlich geringer ist. Dadurch ergeben sich deutlich höhere Festigkeiten. Dieser statistische Größeneffekt ist in Bild 2.2 rechts dargestellt und wurde erstmals durch GRIFFITH beschrieben. Er lässt sich durch die Variation des Faserdurchmessers nachweisen. Während die untersuchten Glasfasern bei einem Durchmesser von  $100 \mu\text{m}$  lediglich eine Festigkeit von  $0,3 \text{ GPa}$  besitzen, steigt die Festigkeit bei einem Faserdurchmesser von  $3 \mu\text{m}$  auf  $3,4 \text{ GPa}$  an. [GRIF21]

Neben dem Faserdurchmesser beeinflusst der Werkstoff wesentlich die mechanischen Eigenschaften. Es wird zwischen organischen Fasern und anorganischen Fasern unterschieden. Zu den organischen Fasern zählen u. a. die Polymerfasern, wie z. B. Aramid-Fasern und Kohlenstofffasern, die aus organischen Präkursoren hergestellt werden. Die Glasfaser ist das am weitesten verbreitete Beispiel für eine anorganische Faser. [NEIT14, S. 31–33]

In Kombination mit polymeren Matrixsystemen, in denen die Fasern eingebettet werden, ergibt sich der Verbundwerkstoff. Dabei unterscheidet man, ob die Fasern als Kurz- bzw. Langfaser eine maximale Länge von bis zu  $25 \text{ mm}$  aufweisen oder eine kontinuierliche Endlosfaserverstärkung vorliegt [EHRE06]. Letztere bietet die höchsten mechanischen Eigenschaften und ist Gegenstand dieser Arbeit. Die Fasern machen nur einen Teil des Verbundwerkstoffs aus, sodass ein Laminat geringere Zugfestigkeiten als die reinen Verstärkungsfasern aufweist. Zusätzlich sind die Eigenschaften des Laminats richtungsabhängig. Die mechanischen Eigenschaften von endlosfaserverstärkten Laminaten mit häufig verwendeten Faserwerkstoffen sowie ihre Abhängigkeit von der Belastungsrichtung sind in Bild 2.3 dargestellt. [NEIT14, S. 32; S. 285]



**Bild 2.3:** Mechanische Kennwerte von Verstärkungsfasern sowie von unidirektionalem CFK in Abhängigkeit der Belastungsrichtung, nach [NEIT14, S. 32; S. 285]  
*Mechanical properties of technical fibers and unidirectional CFRP depending on the load direction*

Die Berücksichtigung dieser Anisotropie ist eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Verwendung von Faserverbundkunststoffen. Eine belastungsoptimierte Ausrichtung der Verstärkungsfasern ist grundlegend für das Erreichen von optimalen Bauteileigenschaften, s. Kapitel 2.2.2. Zusätzlich ermöglicht dies den ressourcenminimierten Einsatz des Werkstoffes. Dies ist neben ökologischen Gesichtspunkten auch ökonomisch anzustreben, weil insbesondere bei der Verwendung von Kohlenstofffasern erhebliche Materialkosten anfallen. Auch wenn in den letzten Jahren der Preis von Kohlenstofffasern stetig gesunken ist, beträgt der Marktpreis von einfachen Kohlenstofffasern ca. 15 €/kg [HENG16]. Jedoch liegen für weiterverarbeitete textile Halbzeuge, z. B. Gelege oder Gewebe, sowie Kohlenstofffasern mit hohen mechanischen Eigenschaften deutlich höhere Kosten vor. So kosten die nur in Sonderanwendungen eingesetzten ultrahochmoduligen Kohlenstofffasern, die einen E-Modul von über 500 GPa aufweisen, teilweise über 1000 €/kg [LOOS15, S. 222].

### Matrix

Auch wenn die Fasern die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes, insbesondere unter Zugbelastung, maßgeblich beeinflussen, kommt der Matrix ebenfalls eine wesentliche Bedeutung zu. Neben der zuvor genannten Kräfteinleitung und Fixierung der einzelnen Fasern bestimmt der Matrixwerkstoff zusätzlich die thermische und chemische Beständigkeit. Ferner ist ebenfalls die Haftung in der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix entscheidend, die durch entsprechende Haftvermittler, auch Schlichte genannt, modifiziert werden kann. [EHRE06, S. 50; SCHÜ05, S. 83]

Bei FVK werden sowohl Duroplaste als auch Thermoplaste als Matrix eingesetzt. Duroplaste sind chemisch engmaschig vernetzte, in der Regel amorphe Kunststoffe. Fließvorgänge sind nach der Vernetzung nicht mehr möglich, Kriechvorgänge können

nur oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$  und in begrenztem Maße auftreten [DOMI08, S. 8]. Reaktionsharze, wie z. B. Epoxidharze (EP) oder ungesättigte Polyesterharze (UP), sind die am häufigsten eingesetzten Matrixwerkstoffe. Sie sind flüssige oder leicht schmelzbare Harze, die mit Reaktionsmitteln durch Polyaddition bei EP und Polymerisation bei UP aushärten bzw. vernetzen. [EHRE06, S. 52]

Neben den guten mechanischen Eigenschaften spricht insbesondere die geringe Viskosität der Harze vor der Vernetzung für den Einsatz von Duroplasten als Matrixsystem. Diese erlaubt eine einfache Benetzung und Imprägnierung der Faserhalbzeuge, z. B. in manueller, offener Verarbeitung oder im RTM-Verfahren. Nach der Imprägnierung ist der chemische Vernetzungsprozess notwendig, der unter Druck und bei Prozesstemperaturen zwischen 20–130 °C stattfindet. [NEIT14, S. 83; EHRE06, S. 50; SCHÜ05, S. 84]

Thermoplaste bestehen aus Makromolekülen, die nicht chemisch vernetzt sind, sondern über Nebervalenzkräfte zusammenhalten. Bei Temperaturzunahme werden die physikalischen Bindungen überwunden und es liegt eine Schmelze vor. Generell wird zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten, bei denen die Molekülketten teilweise orientiert ausgerichtet sind, unterschieden. Die reversible, physikalische Aufschmelzbarkeit und die dadurch entstehende Formgebungsmöglichkeit erlaubt gegenüber Duroplasten eine schnelle Bauteilherstellung, weil keine chemischen Vernetzungsprozesse notwendig sind. Der Marktanteil der Thermoplaste beträgt weniger als 30 % der polymeren Matrixwerkstoffe bei CFK. Nach KÜHNEL wird jedoch erwartet, dass dieser Anteil zukünftig deutlich steigen wird [KÜHN15, S. 31–32]. Die dafür ursächlichen, wesentlichen Vorteile von Thermoplasten als Matrix sind:

- nahezu unbegrenzte Lagerfähigkeit
- gute Chemikalienbeständigkeit
- nicht toxisch
- hohe Schlagfestigkeit bzw. hoher Delaminationswiderstand
- gute Rezyklierbarkeit

Nachteile von Thermoplasten sind insbesondere die Kriechneigung sowie die hohen Schmelzviskositäten und hohen Verarbeitungstemperaturen. Während Polypropylen (PP) bei 200 °C verarbeitet werden kann, liegt die Verarbeitungstemperatur von Hochleistungspolymeren deutlich darüber, wie z. B. bei 400 °C für Polyetheretherketon (PEEK). Die Gruppe der technischen Kunststoffe, der die häufig eingesetzten Polyamide (PA) zugeordnet werden, ist mit ihrer Verarbeitungstemperatur dazwischen angesiedelt. [NEIT14, S. 55–67; EHRE06, S. 50; SCHÜ05, S. 85–86]

Neue Forschungen zielen darauf ab, die vorteilhaften Eigenschaften von thermoplastischen und duroplastischen Matrixmaterialien miteinander zu verbinden. So hat die *Evonik AG* verschiedene hybride, thermoreversible Polymernetzwerke entwickelt. Zum einen ist es möglich, ein Harzsystem für eine zweistufige Reaktion einzustellen. Nach

einer ersten Reaktionsstufe liegt das Polymer in einem thermoplastischen Zwischenzustand, dem sog. B-stage, vor, der eine hohe Lagerstabilität ermöglicht. In einer zweiten Reaktionsstufe vernetzt das Polymer zu einem Duroplast. Zum anderen gibt es Materialien, bei denen die Vernetzung zu einem Duroplast reversibel durch Temperaturzuführung aufgelöst werden kann. [STRE15]

Ähnliche Matrixsysteme eines anderen Herstellers werden in [WERN16] beschrieben. Diese neuartigen Matrixsysteme konnten sich noch nicht nennenswert im Markt etablieren. Tabelle 2.2 stellt die Eigenschaften der zuvor beschriebenen, häufig verwendeten Matrixwerkstoffe in einer Übersicht dar.

**Tabelle 2.2:** Matrixwerkstoffe und ihre Eigenschaften [NEIT14, S. 42; DOMI08, S. 16]

*Matrix materials and their properties*

Matrixwerkstoff	Zugmodul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung [%]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Preis [€/kg]
UP-Harze	2,8–3,5	40–75	1,3–3,3	1,25–1,30	2,60–5,00
EP-Harze	2,8–3,4	45–85	1,3–5,0	>1,16	4,00–10,00
PP	1,3–1,8	30–40	50	0,9	0,50–2,50
PA6	1,4	70–85	200–300	1,13	2,50–6,00
PPS	3,4	75	3	1,34	3,00–10,50
PEEK	3,65	92	50	1,32	60

## 2.2.2 Laminat

### *Laminates*

Die zuvor vorgestellten Werkstoffe bilden die Grundlage für den Verbundwerkstoff FVK. Durch die Verbundcharakteristik ergeben sich jedoch werkstoffliche Besonderheiten, die im Folgenden vorgestellt werden. Diese Eigenschaften sind sowohl für die Berechnung und Konstruktion als auch für die Fertigung von FVK-Bauteilen zu beachten.

### **Klassische Laminataufbauten**

Endlosfasern werden meistens in Form zweidimensionaler, textiler Halbzeuge, d. h. Gewebe oder Gelege, verarbeitet. Das Einbringen von Verstärkungsfasern in z-Richtung für eine dreidimensionale Verstärkung ist im industriellen Einsatz nicht am Markt etabliert und derzeit noch Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben [DAI15; MATH15; DELL12]. Daher werden meist schalenförmige Bauteile, also Bauteile mit dünnwandigen Strukturen, aus Faserverbundkunststoff gefertigt. Die hier nicht betrachtete Kurz- und Langfaserverstärkung wird hingegen auch für massive Bauteile eingesetzt.

Die aus verschiedenen Einzelschichten aufgebauten FVK-Strukturen werden als Laminat bezeichnet. Bild 2.3 gibt bereits einen Überblick über die anisotropen Lamineigenschaften. Die Eigenschaften der Einzelschichten leiten sich über die Mikromechanik der Einzelkomponenten Faser und Matrix ab. Über makromechanische Betrachtungen lässt sich die Verformung von mehrschichtigen Laminaten unter äußerer Krafteinwirkung berechnen. Eine wesentliche Berechnungsgrundlage für die Bestimmung der Lamineigenschaften ist die klassische Laminattheorie. Dabei wird ein Laminat als ebene Scheibe mit konstanter Dicke, bestehend aus homogenen, dünnen Einzelschichten mit iso- oder orthotropem Materialverhalten, angenommen, was eine Symmetrie des Lagenaufbaus voraussetzt. Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften wird dabei durch die Orientierung der Einzelschichten abgebildet. [MICH89, S. 79–94]

Die Berechnung der Festigkeit eines Laminats ist weitaus komplexer als die Steifigkeits- und Verformungsberechnung, da verschiedene Versagensarten und Belastungskollektive, z. B. statische und dynamische Belastung, sowie die entsprechenden temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte berücksichtigt werden müssen. Obwohl die Grundlagen für die Festigkeitsberechnung lange bekannt sind - hier sei exemplarisch auf weiterführende Literatur von PUCK [PUCK96] und TSAI [TSAI71] verwiesen - ist die Versagensvorhersage, vor allem für dreidimensionale Belastungsfälle, kompliziert und nach wie vor Gegenstand der Forschung [TALR14; KADD13].

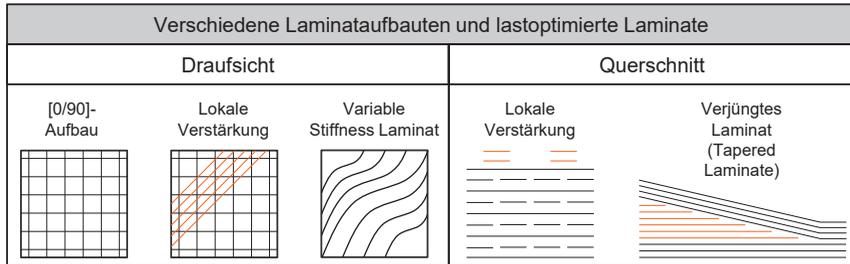
Die schwierige Berechnung von komplexen Laminataufbauten und Fertigungsrestriktionen haben dazu geführt, dass oft nur wenige verschiedene, standardisierte Kombinationen von  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $\pm 45^\circ$  orientierten Einzelschichtenschichten in einem Laminat angewendet werden. Des Weiteren werden vornehmlich symmetrische Laminare mit konstanter Dicke eingesetzt. Dies führt dazu, dass das Potenzial von Faserverbundkunststoffen in den meisten Anwendungsfällen nicht vollständig ausgeschöpft wird. [MELO14]

Eine Möglichkeit, das Potenzial von FVK zu einem größeren Anteil auszuschöpfen, ist die Verwendung von dünneren Einzelschichten, sodass sich das Laminat, insbesondere bei nicht-symmetrischen Laminataufbauten besser homogenisieren lässt [NETT14]. Dadurch reduziert sich der Größeneffekt, der bei dicken Laminaten zu einer Verringerung der Versagensspannung führt [LIU11].

Zusätzlich lassen sich die mechanischen Eigenschaften verbessern, wenn anstelle von textilen Halbzeugen unidirektionale Einzelschichten eingesetzt werden, die keine Faserondulation durch Wirk- oder Schussfäden aufweisen. Untersuchungen zeigen dies am Beispiel von glasfaserverstärktem PP des Herstellers *SABIC*. Für vergleichbare Laminataufbauten liegt die Steifigkeit des aus unidirektionalen Einzelschichten aufgebauten Laminats um 36 % über den Werten der gewebeverstärkten Variante. Unter Druckbeanspruchung ist der Unterschied noch deutlicher: Die Druckfestigkeit liegt beim UD-Laminat bei über 450 MPa und ist damit mehr als dreimal so groß wie die Druckfestigkeit eines 80/20 orientierten Gewebes aus dem gleichen Material. [SCHI16]

## Lastoptimierte Laminate

Im Sinne des Strukturleichtbaus besteht ein Bestreben darin, von den oben beschriebenen symmetrischen, homogenen Laminaten mit konstanten Faserwinkeln in Einzelschichten abzuweichen und vorteilhafte, lastangepasste Laminataufbauten über die zuvor genannten Restriktionen hinaus einzusetzen. Eine Lastoptimierung lässt sich durch verschiedene Laminataufbauten realisieren, vgl. Bild 2.4.



**Bild 2.4:** Verschiedene Arten von lastoptimierten Laminaten, vgl. [FLET15; GUER92]  
*Different types of load-optimized laminates*

Eine Möglichkeit sind Laminate mit lokal unterschiedlichen Faserorientierungen innerhalb von Einzelschichten, was zu optimierten Spannungsverteilungen und gesteigerten mechanischen Eigenschaften führt. Die Faserorientierung ist dabei stetig veränderlich, sodass kurvenförmige Faserverläufe vorliegen. [KERM15; LOPE08; SETO06; GUER92]

Bei diesen sog. *Variable Stiffness* Laminaten ist zwar die Faserorientierung in der Einzelschicht lokal veränderlich, jedoch weist das Laminat eine konstante Dicke auf. In der lokalen Variation der Laminatdicke bzw. Lagenanzahl liegt eine weitere fertigungstechnisch einfacher umzusetzende Möglichkeit, belastungsoptimierte Laminate zu erreichen. Diese werden beim Einsatz von thermoplastischen Matrixmaterialien in Analogie zur Metallverarbeitung *Thermoplastic Tailored Blank* bzw. *Tailored Composite Blanks* genannt [BURK06].

Die Verstärkung kann sowohl außerhalb als auch innerhalb des Laminats, d. h. mit ununterbrochenen Deckschichten, realisiert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, einzelne Laminatschichten auslaufen zu lassen. Man spricht vom sogenannten *Ply drop* bzw. verjüngten Laminaten (engl.: tapered laminates) [HE00]. Die so entstehenden Laminate weisen insbesondere Vorteile unter Druckbelastung auf, da die maximal erreichbare Beullast erhöht wird [DINA89]. BLOM kombiniert die beiden Verfahren der variablen Faserorientierung und der auslaufenden Faserstränge, was zu optimierten Faserverläufen und gesteigerten Festigkeiten bzw. reduzierten Spannungsspitzen führt [BLOM09]. Während zunächst beidseitig symmetrische Verstärkungen untersucht wurden, rücken vermehrt asymmetrische, also einseitige Verstärkungen, ins Interesse [FLET15]. Diese asymmetrischen, inhomogenen Laminate sind nicht für einen Einsatz in der Luftfahrt zugelassen [YORK15].

Eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften bei konstanter Faserorientierung und Laminatdicke lässt sich durch eine spezielle Morphologie erreichen, bei welcher der Faserabstand ungleichmäßig und damit die Einzelschicht inhomogen ist, aber das Material auf Makroebene als orthotrop betrachtet werden kann [LEIS90].

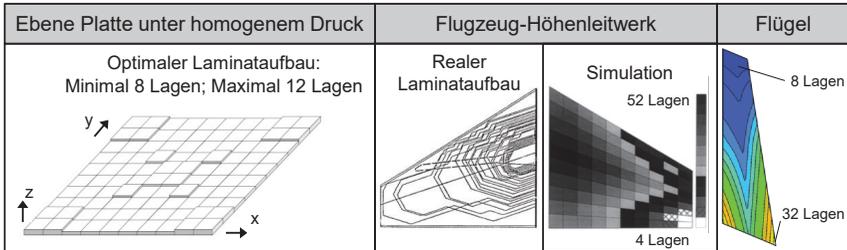
Alle genannten Lastoptimierungen gehen mit einer Steigerung der Komplexität einher und erfordern besondere und aufwändige Herstellungsverfahren, die eine individuelle und flexible Laminatfertigung ermöglichen. Aufgrund der lokal unterschiedlichen Laminataufbauten ist eine Verwendung von großflächigen, breiten Halbzeugen oftmals begrenzt. Schmale UD-Tapes bieten hingegen eine Möglichkeit, die geforderten geometrischen Anforderungen hinsichtlich Faserorientierung und Lagenaufbau flexibel und verschnittminimiert abbilden zu können.

### **Auslegungsalgorithmen**

Obwohl die verschiedenen Möglichkeiten zur Belastungsoptimierung lange bekannt sind, lassen sich entsprechende Laminataufbauten nur mit erheblichem Aufwand auslegen. Zur Berechnung des optimalen Laminataufbaus bzw. der Laminatdicke kommen verschiedene Algorithmen zum Einsatz. Bei der Berechnung führt insbesondere die Beachtung von nichtlinearen Materialeigenschaften zu einer rechenintensiven Auslegung mittels FEM. Zusätzlich sind die Materialkennwerte oft nur unzureichend bekannt und bestimmte Fehlermechanismen, wie z. B. Delamination aufgrund von Spannungsspitzen an auslaufenden Einzelschichten, noch unzureichend verstanden [HE00]. Zu einer Übersicht der am besten geeigneten Algorithmen sei auf GHIA1 verwiesen [GHIA10].

In letzter Zeit sind jedoch diverse neue Verfahren und simulationsbasierte Algorithmen zur Bestimmung eines optimalen Laminataufbaues über die zuvor genannten Restriktionen hinaus entwickelt worden [FARZ19; JING16; TSAI15]. Für das Aufbringen von lokalen Verstärkungen, das für Thermoplast-FVK im Kapitel 2.4.2 näher beschrieben wird, liegen ebenfalls neue Berechnungsverfahren vor [MEJL17].

Neben der reinen mechanischen Optimierung des Laminataufbaus sind Fertigungsrestriktionen zu berücksichtigen. So verwendet KIM einen genetischen Algorithmus zur Berechnung der optimalen Wandstärke und berücksichtigt dabei fertigungstechnische Gesichtspunkte [KIM99]. Die Ergebnisse sind in Bild 2.5 zusammengefasst. Bereits bei einer ebenen Platte, die einem homogenen Druckzustand ausgesetzt ist, sind lokal veränderliche Wandstärken bzw. Lagenanzahlen notwendig, um eine optimale Materialausnutzung zu erreichen. Für reale Bauteile, wie das Höhenleitwerk eines Flugzeugs, ergeben sich wesentlich komplexere Laminataufbauten.



**Bild 2.5:** Berechnung von belastungsoptimierten Laminaten mit unterschiedlichen Laminatdicken am Beispiel einer ebenen Platte und Flugzeugkomponenten [FARZ19; KIM01]

*Simulation of load-optimized laminate thickness for flat plate and tailplane*

### Fertigung lastoptimierter Laminat

Neben der komplizierten Auslegung führen hohe Produktionskosten von belastungsoptimierten Laminaten zu einer zur Zeit geringen Verbreitung dieser Technologie [GHIA10]. Bei der Verwendung von Harzinfiltrationsprozessen zur Bauteilherstellung, wie z. B. dem RTM-Verfahren, lassen sich belastungsoptimierte Bauteile durch die Verwendung von Sub-Preforms realisieren. Als Sub-Preform werden individuelle Halbzeuge, also zugeschnittene textile Flächengebilde, bezeichnet [NEIT14, S. 97]. Diese können zu trockenen Faserstapeln, die die gewünschte Faserorientierung aufweisen, kombiniert werden, bevor sie in Injektionsverfahren mit der Matrix getränkt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von unidirektionalen Faserbändern oder vorimprägnierten Halbzeugen, sogenannten Prepregs (engl.: pre-impregnated fibers), die automatisiert entsprechend ihrer Belastungsrichtung abgelegt werden. Diese Fertigungstechnologien werden hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt zur Verarbeitung von duroplastischen Faserverbundkunststoffen eingesetzt. [KRAU16]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verwendung von lastangepassten Laminaten bereits für einfache Belastungsfälle unabdingbar ist, um eine effiziente Materialausnutzung von FVK zu gewährleisten. Gleichzeitig ergibt sich daraus die Fragestellung einer wirtschaftlichen Fertigung dieser komplexen Laminataufbauten. Im Folgenden werden daher die verfügbaren Herstellverfahren für Thermoplast-Laminat betrachtet.

## 2.3 Herstellung von Thermoplast-Laminaten

### *Manufacturing of thermoplastic laminates*

Während bei der subtraktiven Bauteilfertigung, z. B. aus metallischen, isotropen Halbzeugen, die Formgebung im Vordergrund steht, sind bei der FVK-Verarbeitung die Wechselwirkungen sowohl der Herstellung des Verbundwerkstoffs, des Zusammenfügens von Einzelschichten zu einem Laminat und letztendlich der Bauteilfertigung zu betrachten. Ein wesentlicher Vorteil von thermoplastischen Matrixmaterialien liegt in

ihrer Wiederaufschmelzbarkeit, sodass sich die Prozessketten zur Herstellung von Thermoplast-FVK von der duroplastischer FVK unterscheiden. Aufgrund des Potenzials zur automatisierten Verarbeitung werden im Folgenden Prozesse zur Herstellung von Thermoplast-Laminaten vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf additiven Verfahren wie dem Tapelegen, die eine Fertigung von belastungsoptimierten Laminataufbauten ermöglichen.

### 2.3.1 Halbzeugherstellung

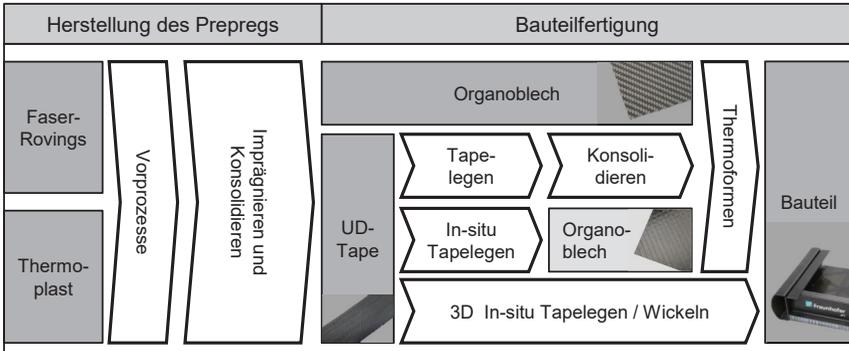
#### *Manufacturing of prepregs*

Bei Thermoplasten dominiert die Verwendung von vorimprägnierten Halbzeugen, welche entweder in Form von Organoblechen oder UD-Tapes vorliegen können. Der Einsatz dieser Prepregs ermöglicht es, in der Lieferkette zwischen Material- und Bauteilherstellung zu trennen. Generell sind die folgenden Prozessschritte notwendig:

- Imprägnierung der Verstärkungsfasern mit Matrixkunststoff
- Formgebung
- Konsolidierung und Aushärtung (Duroplast) bzw. Abkühlen (Thermoplast)

Diese einzelnen Schritte lassen sich durch verschiedene Prozesse realisieren, sodass sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten und Varianten ergeben. Die verschiedenen Prozessketten zur Laminat- und Bauteilherstellung sind in Bild 2.6 dargestellt. Neben den drei genannten Hauptfunktionen sind je nach Verfahren und Ausgangsmaterial Vorprozesse erforderlich. Für die Verstärkungsfasern sind dies textile Verfahren, wie das Weben von Gelegen und Geweben oder das Spreizen von unidirektionalen Rovings. Die thermoplastischen Kunststoffe werden abhängig vom Imprägnierverfahren in verschiedenen Formen verwendet, sodass ebenfalls Vorprozesse, wie z. B. die Folienherstellung, notwendig sind [NEIT14, S. 176]. Wird als Prepreg ein mehrlagiges Laminat hergestellt, dessen Faserorientierung bei der Bauteilherstellung nicht mehr verändert wird, wird in Analogie zur Metallverarbeitung von *Organoblech* gesprochen. Damit werden ebene, vollständig imprägnierte und konsolidierte Thermoplast-FVK Lamine bezeichnet, die zu Bauteilen warmumgeformt werden können. [NEIT14, S. 147]

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Thermoplastlaminaten ist die Verwendung von vollständig imprägnierten UD-Tapes. Diese dünnen, einlagigen Halbzeuge werden in Lege- oder Wickelverfahren schichtweise zu einem Laminat bzw. Bauteil weiterverarbeitet. [NEIT14, S. 183; MICH89, S. 19]



**Bild 2.6:** Prozessketten zur Laminat- und Bauteilherstellung für thermoplastische FVK, vgl. [BREC15d; SCHÄ15]

*Process routes for part and laminate manufacturing of thermoplastic composites*

Wesentlicher Prozessschritt bei der Herstellung der oben genannten Halbzeuge ist das Imprägnieren der Verstärkungsfasern mit der Matrix. Nach LEE lässt sich der Imprägnierprozess von thermoplastischen Faserverbundkunststoffen als Strömung eines Fluides, der schmelzflüssigen Matrix, durch ein poröses Material, dem textilen Faserhalbzeug, auffassen [LEE87, S. 1021]. Die Strömungsgeschwindigkeit  $u_z$  eines Fluids mit Viskosität  $\eta$  in einem porösem Medium mit Permeabilität  $K_P$  aufgrund eines aufgeprägten Druckgradienten  $\frac{dp}{dz}$  in Dickenrichtung kann nach dem Gesetz von DARCY beschrieben werden:

$$u_z = \frac{K_P}{\eta} \frac{dp}{dz} \quad (2.1)$$

Die Schmelzviskosität  $\eta$  von Thermoplasten ist mit  $10^2$ – $10^4$  Pa·s verglichen mit der Viskosität  $\eta$  von unvernetzten Duroplasten, die typischerweise bei  $10^1$ – $10^0$  Pa·s liegt, sehr groß. Zusätzlich liegt die Verarbeitungstemperatur von Thermoplasten meist bei 200–400 °C, während Duroplaste teilweise bei Raumtemperatur, zumindest jedoch unter 200 °C verarbeitet werden können. [VANR07, S. 675]

Aus Formel 2.1 ergibt sich damit für Thermoplaste ceteris paribus eine geringere Imprägniergeschwindigkeit, was bei gleicher Laminatdicke zu längeren Imprägnierzeiten verglichen mit dem Einsatz von Duroplasten führt. Um trotzdem kurze Prozesszeiten zu ermöglichen, ist ein hoher Prozessdruck notwendig. Zusätzlich wird durch entsprechende Imprägnierverfahren versucht, den notwendigen Fließweg zu reduzieren, indem der Matrixkunststoff bereits vor dem Imprägniervorgang möglichst homogen im Faserhalbzeug verteilt wird. Im Wesentlichen werden die Verfahren danach unterschieden, in welcher Form eine Durchmischung der Fasern mit Matrix vorgenommen wird. Einerseits kann die Durchmischung bereits vor dem Aufschmelzen der Matrix geschehen, zum Beispiel durch Verwendung von Pulververfahren, Thermoplastfolien oder Hybridgarnen [BOUR01]. Beim Schmelzprägnieren wird hingegen das Faser-

halbzeug durch ein Werkzeug mit Thermoplastschmelze gezogen. Die Prozesse unterscheiden sich nach Wirtschaftlichkeit und Qualität sowie Faservolumengehalt. Zusätzlich hängt bei einigen Verfahren, insbesondere bei der Verwendung von Suspensionsbädern, die Eignung stark von der Wasseraufnahmeaffinität des zu verarbeitenden Polymers ab [VORD92].

Die Imprägnierung der Faserhalbzeuge kann diskontinuierlich in statischen Press- oder Autoklavverfahren, z. B. im Filmstackingverfahren, stattfinden. Für eine wirtschaftliche Anwendung in der Großserie sind jedoch kontinuierliche Verfahren zu bevorzugen. Diese sind sowohl zur Imprägnierung von Geweben oder Gelegen als auch für unidirektionale Halbzeuge und damit zur Tapeherstellung geeignet. Häufig werden Kalandere oder Doppelbandpressen eingesetzt, um eine kontinuierliche Herstellung zu ermöglichen. Die entsprechenden Verfahren und Technologien zum Imprägnieren sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst. [NEIT14, S. 168–184; CHAN88, S. 289–293]

**Tabelle 2.3:** Herstellung von Organoblechen und Tapes, nach [NEIT14, S. 168–184; CHAN88, S. 289–293]

*Processes for manufacturing of thermoplastic composite sheets and tapes*

Pressverfahren				
Statisch		Semi-kontinuierlich	Kontinuierlich	
Pressen	Auto- klaven	Transferpressen	Doppelbandpressen (isobar/isochor)	Kalander
Imprägniertechnologien				
Hybridgarn	Pulver- verfahren	Schmelz- imprägnierung	Lösungsmittel/ Suspension	Filmstacking

Bei der Herstellung von UD-Tapes wird außerdem danach unterschieden, ob ein breites Halbzeug, oft breiter als 400 mm, hergestellt wird, welches anschließend auf die Maßbreite konfektioniert wird (engl.: slit tape). Dies bietet gegenüber kalibrierten Tapes, die direkt in der gewünschten Breite hergestellt werden, wirtschaftliche Vorteile [NEIT14, S. 183]. Jedoch sind kalibrierte Tapes hinsichtlich Maßhaltigkeit und Homogenität qualitativ höherwertig und die Gefahr offener Faserenden am Rand des Tapes besteht nicht.

Verfahren zur Herstellung von thermoplastischen FVK, bei denen die Imprägnierung erst im Bauteil hergestellt wird, sind zurzeit aufgrund der genannten Herausforderungen, insbesondere der hohen Schmelzviskosität, kaum verbreitet. Als Verfahren sei hier beispielhaft auf das von SCHÖLDGEN beschriebene inline-Imprägnieren im Diaphragma-Umformverfahren verwiesen [SCHÖ13]. Eine andere Möglichkeit besteht darin, in einem Infusionsverfahren einen Vorformling mit Monomeren zu infiltrieren, die erst bei der Bauteilherstellung zu einem Thermoplast-Polymer reagieren. Ein Beispiel für die sogenannte in-situ-Polymerisation ist das Thermoplast-RTM Verfahren [PART05]. Allerdings sind noch nicht alle rheologischen Randbedingungen für die in-

situ Polymerisation von FVK vollständig verstanden, sodass dieses Verfahren bisher in wenigen Anwendungen eingesetzt wird [THOM17].

### 2.3.2 Verarbeitung thermoplastischer Tapes

#### *Processing of thermoplastic tapes*

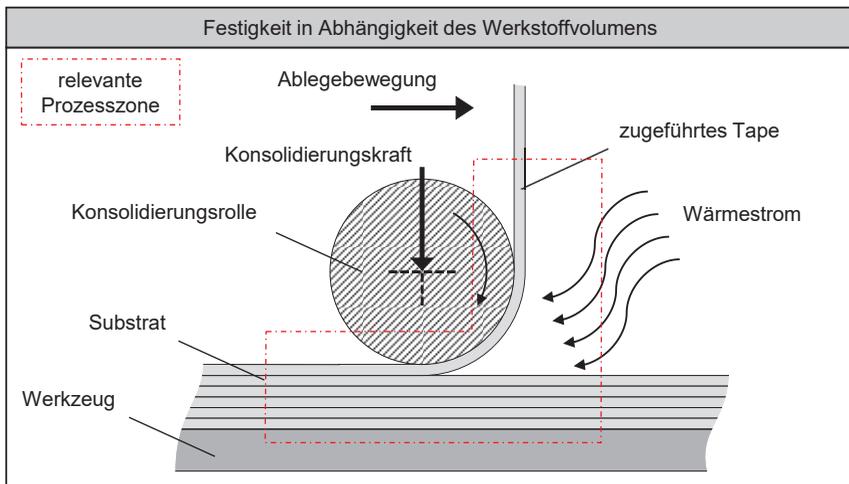
Die unidirektional faserverstärkten, vollständig imprägnierten thermoplastischen Tapes sind ein vielseitiges Halbzeug, das in verschiedenen Prozessen weiterverarbeitet werden kann. Zur Herstellung mehrlagiger Lamine kommen nach Bild 2.6 zwei verschiedenen Prozessrouten in Frage:

- Ablage der Tapes mit nachgeschalteter Konsolidierung, z. B. in Autoklaven
- In-situ Konsolidierung während des Tapelegens

Konsolidierung bezeichnet dabei nach GUTOWSKI das Herausdrücken von Luftein-schlüssen und überschüssigem Matrixmaterial, sodass eine vollflächige Verbindung zwischen den einzelnen Laminatschichten vorliegt [GUTO87, S. 651]. Im Folgenden soll näher auf die Tapeverarbeitung mit in-situ Konsolidierung eingegangen werden. Bild 2.7 stellt das Prinzip der thermoplastischen Bandablage schematisch dar, das sich nach PITCHUMANI im Wesentlichen in die beiden Prozessschritte

- Aufschmelzen und Herstellen eines Lagenkontaktes
- Verschweißen und Abkühlen

einteilen lässt [PITC97].

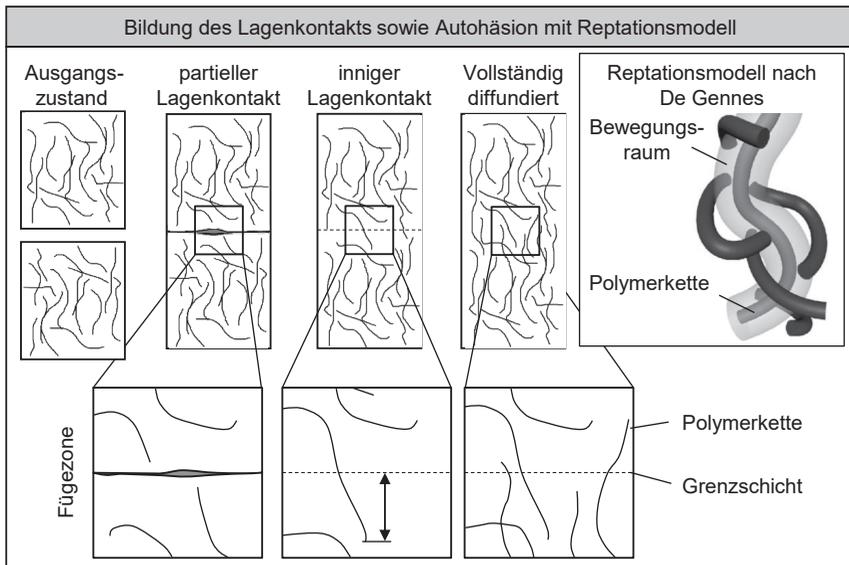


**Bild 2.7:** Prinzipskizze des Thermoplast-Tapelegens  
*Basic process of thermoplastic tape placement*

Das auf einer Rolle gespeicherte Tape wird über eine bewegte Andruckrolle auf dem Werkzeug oder bereits abgelegtem Substrat appliziert. Dabei wird in den Kontaktbereich von Tape und Substrat, dem sogenannten Zwickelbereich, Wärme eingebracht. Die Prozess Temperatur liegt dabei über der Schmelztemperatur, sodass das zugeführte Tape in geschmolzenem Zustand mit dem bereits abgelegten Substrat in Kontakt kommt.

Die Prozessenergie kann über verschiedene Wärmequellen, wie z. B. Infrarotstrahler, Heißgas, Ultraschallsonotroden, Elektronenstrahl- oder verschiedene Laserquellen, eingebracht werden. Nach SCHMIDT ist der Einsatz von Laserstrahlung den anderen Aufheizmethoden dabei in den Punkten erreichbare Prozessgeschwindigkeit und Temperaturregelbarkeit überlegen [SCHM94, S. 26].

Die einzelnen Prozessschritte sind in Bild 2.8 zusammengefasst. Die beiden erwärmten Oberflächen der Fügepartner werden in Kontakt gebracht. Durch den Konsolidierungsdruck entsteht ein Lagenkontakt, der aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit zunächst nur partiell ausgeprägt ist. Abhängig von Oberflächenrauheit und -welligkeit sowie den eingestellten Prozessparametern Temperatur und Druck bildet sich der Kontaktanteil  $D_{ic}$  (engl.: degree of intimate contact) aus, wobei  $D_{ic} = 1$  einem vollständigen Kontakt und somit einer vollständigen Konsolidierung ohne Porenbildung entspricht. Es sind zahlreiche Modelle zur Berechnung des Lagenkontaktes bekannt, vgl. [YANG02; LEE87; DARA85].



**Bild 2.8:** Beschreibung des Fügeprozesses mittels Lagenkontakt und interlaminaerer Diffusion [KERM15, S. 16; BONT14, S. 68; STEY13, S. 44; DARA85, S. 7]

*Description of the joining process with an intimate contact and diffusion model*

Sobald ein Kontakt zwischen zwei schmelzförmigen Fügepartnern vorliegt, findet eine Diffusion der Polymere, die sogenannte AutohäSION, in der Fügezone statt [LEE87]. Häufig wird dies als Reptation der einzelnen Molekülketten in einem Modell nach DE GENNES dargestellt [GENN71]. Analog zum Lagenkontakt lässt sich eine Kennzahl  $D_h$  (engl.: degree of healing) zur Beschreibung der Polymerdiffusion einführen und durch eine Kopplung von  $D_h$  und  $D_{ic}$  eine die interlaminaire Festigkeit beschreibende Kennzahl  $D_b$  (engl.: degree of bonding) beschreiben [TIER06]. Dabei ist zu beachten, dass der Diffusionsgrad und damit die Fügefestigkeit von den Prozessparametern Zeit und Temperatur abhängen, nicht aber vom Druck [LEE87].

Der Lagenkontakt hat aber nicht nur Einfluss auf die Festigkeit des Laminates, sondern beeinflusst direkt den Wärmewiderstand zwischen Substrat und Tape, sodass ein direkter Einfluss auf die Aufheiz- und Abkühlprozesse besteht. So benutzt LEVY das Kontaktmodell nach LEE und SPRINGER, um den Wärmewiderstand zwischen Tape und Substrat zu berechnen [LEVY13]. Die zuvor beschriebene Verschweißung stellt einen komplexen Prozess dar, der in der Realität von diversen Einfluss- und Störgrößen abhängt. Insbesondere besteht ein komplexer, d. h. nicht linearer, nicht monotoner Zusammenhang zwischen den Prozessparametern untereinander. Als Beispiel sei hier die Temperaturverteilung im Tape und Substrat in Abhängigkeit von Aufheizlänge, Rollendurchmesser, Geschwindigkeit, Lagenanzahl, Bestrahlungsintensität und Ablegegeometrie genannt. Zusätzlich sind die Temperaturverteilung und der entstehende Konsolidierungsgrad sowie die resultierende Kristallinität stark von den Materialeigenschaften beeinflusst. [WEIL17; SONM97]

Den Einfluss der Andruckzeit, die sich bei gegebener Prozessgeschwindigkeit aus der Kontaktlänge der Konsolidierungsrolle ergibt, hat STEYER untersucht. Dazu wurde das von KÖLZER, s. [KÖLZ08], entwickelte System mit einer formflexiblen Andruckrolle ausgestattet, sodass sich eine größere Kontaktfläche und damit eine längere Konsolidierungszeit als bei einer starren Andruckrolle ergibt. Ein positiver Einfluss auf den Konsolidierungsgrad und die Festigkeit bei Verwendung einer formflexiblen Andruckrolle konnte nachgewiesen werden. [STEY13]

Neben dem Aufheizen und der Herstellung des Lagenkontaktes kommt der Abkühlphase eine wichtige Bedeutung zu. Solange die Matrix wärmer als die Kristallisationstemperatur  $T_K$  ist, finden Diffusionsvorgänge im Polymer statt und der Rekristallisationsprozess setzt sich fort. Dies führt bei mehrfachen Prozessüberfahrten zu einer gesteigerten interlaminairen Festigkeit. STIMPFL konnte diesen Nachkonsolidierungseffekt nachweisen, indem er die Schälfestigkeit zwischen verschiedenen Lagen eines Ringwickelkörpers bestimmt hat. Die Schälfestigkeit wird dabei maßgeblich von der interlaminairen Scherfestigkeit bestimmt. [STIM14, S. 108]

Weitere zu beachtende Prozessgrenzen ergeben sich durch Faserwelligkeit, thermischen Verzug und Eigenspannungen. KERMER-MEYER hat den Einfluss der Temperaturverteilung im Laminat auf die mechanischen Eigenschaften durch Einbringen einer aktiven Kühlung hinter der Konsolidierungsrolle und durch Variation der Werkzeug-

temperatur untersucht. Der Nachweis wurde erbracht, dass durch eine optimierte Temperaturführung und ein homogenes Temperaturprofil die Formhaltigkeit und interlaminae Scherfestigkeit verbessert werden kann. [KERM15]

Die Untersuchung der thermischen Prozesse ist Gegenstand einiger aktueller Forschungsvorhaben. STOKES-GRIFFIN entwickelte ein Modell für die Temperaturverteilung beim Laser-unterstützten Tapelegeprozess. Dieses bestätigt, dass bei etablierten Einstrahlgeometrien und Prozessparametern die oberflächliche Absorption der Strahlung zu einer vollständigen Erwärmung des Tapes entlang der gesamten Tapedicke führt. Der von STEYER beschriebene Abschattungseffekt durch die Konsolidierungsrolle kann durch eine höhere Temperatur des einlaufenden Tapes ausgeglichen werden. Wesentlich kritischer zum Erreichen guter Verbindungsfestigkeiten ist die Substrattemperatur, da diese maßgeblich das Abkühlverhalten und damit die zu erreichenden Festigkeiten bestimmt. [STOK15, S. 1457–1459; STEY13, S. 40–51]

Dies deckt sich mit den Ergebnissen von GROUVE, der für einen PPS-CF Tapelegeprozess ebenfalls geringe thermische Gradienten im Tape und hohe Gradienten im Substrat feststellt [GROU12, S. 43–47]. Neuere Untersuchungen befassen sich insbesondere mit der Modellierung des Einflusses der Prozessgeschwindigkeit auf die resultierenden Temperaturprofile [WEIL17; DIFR17].

Des Weiteren werden auch Verfahren, bei denen das Tape nicht über eine Rolle abgelegt wird, teilweise als Tapelegeverfahren bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine Art Stapel- bzw. Greifprozess, bei dem einzelne Tapes translatorisch auf eine Werkzeugform abgelegt werden. Eine in-situ Konsolidierung kann dabei nicht stattfinden, da kein vollflächiges Aufschmelzen der Fügezone erfolgt. Vielmehr findet lediglich eine lokale Verschweißung zur räumlichen Fixierung der Tapes statt, sodass ein lose verbundener Tapestapel anstelle eines konsolidierten Laminates nach der Ablage vorliegt. [KROP17b; CAMP08]

Bisher werden meist herkömmliche Maschinenkinematiken mit Verarbeitungsköpfen zum in-situ Tapelegen ausgerüstet. Daher existiert noch keine Ablegetechnologie, die hinsichtlich einer durchgängigen Prozesskette optimiert ist. Die zuvor beschriebenen Erkenntnisse zur Tapeablage mit in-situ Konsolidierung werden in Kapitel 4 aufgegriffen, um ein technisch-wirtschaftliches Modell zur Ermittlung der Anforderungen eines effizienten und robusten Tapelegeprozesses abzuleiten.

### 2.3.3 Anlagen zur Bandablage

#### *Systems for automated prepreg layup*

Bereits kurz nachdem PAN-basierten Kohlenstofffasern im Jahre 1966 [DORE87] industriell verfügbar wurden, rückte eine automatisierte Verarbeitung von unidirektionalen Prepregs in den Forschungs- und Entwicklungsfokus, um ihr großes Potenzial hinsichtlich der Steigerung von Produktivität und Fertigungsqualität gegenüber einer manuellen Faserablage zu erschließen. Daher wurden in den 1970er Jahren erste proprietäre Bandablagensysteme von Unternehmen der Luft- und Raumfahrt sowie entsprechenden Forschungseinrichtungen entwickelt und eingesetzt. Dabei wird zwischen der

automatisierten Ablage von schmalen Bändern, AFP (engl.: automated fiber placement), und breiten Tapes, ATL (engl.: automated tape laying), unterschieden. Nach weiteren Entwicklungsschritten waren entsprechende Fertigungsanlagen erstmalig in den 1980er Jahren kommerziell verfügbar. Bei diesen handelte es sich meist um CNC-Portalanlagen, die mit einem Endeffektor, dem AFP- bzw. ATL-Kopf, ausgestattet waren, um große Flugzeugbauteile fertigen zu können. Zunächst stand die Verarbeitung von duroplastischen Prepregs im Vordergrund, bevor später auch thermoplastische Tapes verarbeitet wurden. [LUKA12]

Der AFP- bzw. ATL-Prozess hat somit seinen Ursprung in der Luft- und Raumfahrt. Aufgrund der Größe der zu fertigenden Bauteile, bis zu 35 m Länge im Falle des Airbus A350 XWB [CHAM12], ist neben dem Endeffektor zur Bandablage ein ausreichend genaues und dynamisches Maschinensystem eine Hauptherausforderung bei der Entwicklung entsprechender Fertigungsanlagen. Daher ist es naheliegend, dass etablierte Hersteller von Großmaschinen, z. B. zur spanenden Bearbeitung von Rumpf- oder Flügelbauteilen, zu den kommerziellen Anbietern entsprechender AFP- und ATL-Anlagen gehören. Dies sind insbesondere die Unternehmen *Ingersoll*, *MAG Cincinatti* bzw. heute *Fives Cincinatti* und *MTorres* [MARS11]. Bild 2.9 zeigt eine Übersicht der entsprechenden Anlagen. Zu den neueren bzw. weniger verbreiteten Anbietern gehören *Mikrosam*, *GFM*, *Entec* und *ATK* [LUKA12].



**Bild 2.9:** Kommerziell verfügbare AFP-Anlagen [MTOR17; FIVE17; CAMM17]

*Commercially available AFP systems*

Zusätzlich gibt es Maschinenhersteller wie z. B. *Automated Dynamics*, die sich auf AFP- oder ATL-Anlagen spezialisiert haben. Verhältnismäßig neu sind Systeme, bei denen AFP- Köpfe mit seriellen Industrierobotern geführt werden. Diese sind zum Erreichen der großen Arbeitsräume oftmals auf Linearachsen geführt. Als Beispiel sind hier die Anlagen von *Coriolis Composites* zu nennen [DELL12]. Zurzeit wird daran gearbeitet, die Produktivität von AFP-Systemen durch Verwendung von kooperierenden Robotern zu steigern. Ein Beispiel ist die *GroFi*-Anlage des DLR, bei der acht robotergeführte AFP-Systeme gleichzeitig im Einsatz sind [KROM13].

Die beschriebenen Anlagen sind weitestgehend auf die Verarbeitung duroplastischer Prepregs ausgelegt. Die Verarbeitungstemperatur von Thermoplasten, insbesondere von den in der Luftfahrt eingesetzten Hochleistungsthermoplasten wie PPS oder

PEEK, liegt mehrere hundert Kelvin über der Verarbeitungstemperatur von Duroplasten. So beträgt bereits die Schmelztemperatur von PEEK  $T_{m,PEEK} = 334 \text{ °C}$  [COGS92, S. 29], während die Verarbeitungstemperatur nochmals höher ist und oft  $400 \text{ °C}$  überschreitet. Die Ablagetemperatur von Duroplast-Bändern liegt im Bereich von  $30 \text{ °C}$  bis maximal  $90 \text{ °C}$  [IVAN13]. Höhere Prozesstemperaturen werden erst beim nachträglichen Aushärten notwendig. Daher sind zur Verarbeitung von thermoplastischen Tapes leistungsstärkere Heizquellen notwendig. So statten sowohl *Coriolis* als auch *MTorres* ihre Systeme zu Versuchszwecken mit Diodenlasern aus [DIFR16; CHAM12]. Jedoch bleibt hiervon der grundlegende Aufbau der AFP-Anlagen unbeeinflusst. Dadurch sind die Geometrieparameter, z. B. die freie Einstrahlänge zur Erwärmung des zugeführten Bands, nicht für die Thermoplastverarbeitung optimiert. Zurzeit lässt sich mit der in-situ Konsolidierung nicht die hohen erforderlichen Qualitätsanforderungen der Luftfahrt erreichen. Daher ist ein Nachkonsolidieren der abgelegten Bauteile, z. B. in Autoklaven, notwendig [QURE14].

Die geschilderten Anlagen sind u. a. aufgrund ihrer Größe und der damit einhergehenden Kosten nur selten für Anwendungen außerhalb der Luft- und Raumfahrt, wie z. B. dem Automobilbau, geeignet. Zusätzlich führt die Vielfalt der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Prozessrouten dazu, dass es mittlerweile verschiedene Anlagen zur Verarbeitung von Thermoplast-Tapes gibt. Ein mögliches Unterscheidungskriterium ist der Grad der maximal erreichbaren Konsolidierung. Dieser reicht vom lokalen, punktförmigen Anhaften bis hin zur vollständigen Konsolidierung während der Ablage.

Eine weitere Möglichkeit ist es, zwischen zweidimensionaler und dreidimensionaler Ablage sowie Wickelverfahren zu unterscheiden. Dies hat u. a. einen Einfluss auf die mögliche Ausgestaltung der Kontaktzone zwischen Tape und Substrat. Während bei einer ebenen Ablage auch flächige Andruckeinheiten möglich sind, ist bei einer dreidimensionalen Ablageformen nur ein Punkt- oder Linienkontakt möglich. Die Andruckeinheit ist hier meist als Rolle ausgeführt.

Letztendlich lassen sich die Systeme auch danach unterscheiden, wie die Ablegebewegung ausgeführt wird bzw. welche Achsanordnung vorliegt. Im Wesentlichen kommen hier entweder Linearsysteme bzw. Portalsysteme oder Roboter mit serieller Kinematik zum Einsatz.

### **Systeme zur Ablage von thermoplastischen Tapes ohne in-situ Konsolidierung**

Für Prozessketten, bei denen die Konsolidierung nach der Ablage in nachgeschalteten Pressprozessen erzielt wird, kommen Anlagen zur Herstellung von partiell fixierten Tape Stapeln (engl.: stacks) zum Einsatz. Bild 2.10 gibt einen Überblick über am Markt verfügbare Anlagen dieser Art.



**Bild 2.10:** Systeme zum Ablegen partiell fixierter Tape Stapel [DIEF17; BOIK17; LEIC15]  
*Systems for stacking of thermoplastic tapes without consolidation*

Die dargestellten Anlagen unterscheiden sich erheblich in ihrem Aufbau. Beispielsweise verfügt die *FibreForge 4.0* Anlage des Herstellers *Dieffenbacher* über einen linear verfahrbaren Drehtisch, auf den bereits zuvor geschnittene Tape Stücke translatorisch abgelegt werden. Die Fixierung der Tapes untereinander geschieht dabei mittels Ultraschall-Punktschweißen bei stillstehendem Ablegetisch. Die einzelnen Tape lagen sind somit in festem Abstand punktförmig miteinander verbunden. [GRAF16; BURK05]

Das Unternehmen *Boikon* bietet mit der *Falko ATL* ein Portalsystem mit feststehender Ablageform an. Das zu verarbeitende Tape wird von einer Spule abgerollt und mit einer Ultraschallsonotrode linear verschweißt. Die Verschweißung findet dabei aber nur lokal und nicht über die gesamte Tapebreite statt, sodass keine in-situ Konsolidierung vorliegt. [BOIK17; GRAF16]

Anstelle eines Portalsystems besteht die Anlage von *Compositence* aus einem seriellen Industrieroboter, mit dem ein *RoboMAG-T* Bandablagekopf über eine feststehende Ablageform geführt wird. Somit ist prinzipiell auch eine dreidimensionale Ablage möglich. Jedoch werden die bis zu 16 parallelen Tapes nur am Bauteilrand, das heißt am Beginn bzw. Endpunkt der Ablagebewegung fixiert. Zwischen dem Start und Endpunkt hebt der Applikator von der Werkzeugoberfläche ab. Es findet also kein Ablegen im eigentlichen Sinne, sondern vielmehr ein Spannen der Bändchen zwischen zwei Punkten statt. Dies bietet den Vorteil, dass das CFK-Halbzeug während der Bewegung nicht in Kontakt mit der Ablageform ist und somit hohe Geschwindigkeiten erreicht werden können. Nachteilig ist jedoch, dass die Tapes im Stapel über weite Strecken des Bauteils nicht fixiert sind. [LEIC15; KARB11]

Außerdem gibt es zahlreiche Entwicklungen von Forschungseinrichtungen zur Ablage von Thermoplast-Tapes mit verschiedenen Ablegestrategien und Konsolidierungsgraden. Beispielhaft sei hier auf die FORCE Prozesskette der *Neue Materialien Bayreuth GmbH* sowie den *F<sup>2</sup>-Compositor<sup>®</sup>* der *Automation Steeg und Hoffmeyer GmbH* verwiesen [KROP17b; STEE17]. Die verschiedenen Merkmale der drei detailliert vorgestellten Anlagen sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

**Tabelle 2.4:** Übersicht von Systemen zur Thermoplast-Tape Ablage ohne Konsolidierung [DIEF17; BOIK17; LEIC15]  
*Systems for thermoplastic ATL with post consolidation*

	Dieffenbacher FibreForge 4.0	Boikon Falko ATL	Compositence RoboMAG-T
<b>Heizquelle</b>	Ultraschall	Ultraschall	Infrarot
<b>Art der Verschweißung</b>	äquidistante Punktschweißung	kontinuierlich linear	Randfixierung
<b>Maschinen- aufbau</b>	Portalsystem mit bewegtem Ablegetisch	Portalsystem	Industrieroboter
<b>Ablege- kinematik</b>	translatorisches Andrücken	Abrollen	Abziehen ohne andrücken
<b>Anzahl Tapes</b>	1–2	1	16
<b>Tapebreite</b>	50–165 mm	8–300 mm	12 mm

### Systeme zur Tapeablage mit in-situ Konsolidierung

Im Folgenden sollen Systeme betrachtet werden, die für eine in-situ Konsolidierung ausgelegt sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen AFP- und ATL-Systemen kommt dabei der Heizquelle eine entscheidende Bedeutung zu. So bestimmt die Zone, in der das zugeführte Tape aufgeheizt wird, wesentlich den Aufbau des Tapelegekopfes. *Automated Dynamics* verwendet beispielsweise Heißgas, meist Stickstoff, um das zugeführte Tape aufzuschmelzen. Dadurch ergibt sich eine lange erwärmte Einlaufstrecke des zugeführten Tapes zwischen Schneideinheit und Andruckrolle bzw. Zwickelbereich [AUGU14]. Die Tapezuführung sowie die entsprechenden peripheren Baugruppen ähneln im Wesentlichen denen herkömmlicher AFP Systeme. Sie sind jedoch oft weniger komplex, da sich die festen Thermoplast Tapes einfach führen lassen und keine besonderen Vorrichtungen für die Kühlung der Halbzeuge oder ein Entfernen von Trennfolien notwendig ist [BREC15d; BREC15a]. Bild 2.11 zeigt drei kommerziell verfügbare Anlagen zur automatisierten Verarbeitung von thermoplastischen Tapes.

Der Einsatz von Wärmequellen mit hohen Intensitäten bietet die Möglichkeit, höhere Ablagegeschwindigkeiten und kurze ungeführte Einstrahlängen zu realisieren. Besonders gut geeignet für die Ablage von dreidimensionalen Strukturen, z. B. beim Wickeln, ist die Verwendung von Laserstrahlung als Energiequelle, die sowohl hohe Intensität als auch schnelle Regelbarkeit bietet [SCHM94; BREC10a]. Als Laserquelle hat sich der Diodenlaser durchgesetzt, da er ausreichend Leistung bei guter Wirtschaftlichkeit bietet und seine geringere Strahlqualität beim Einsatz als Wärmequelle nicht nachteilig ist.



**Bild 2.11:** Systeme zum Thermoplast-Tapelegen mit in-situ Konsolidierung [ACCU17; AUTO17; HENN14]

*Machine systems for thermoplastic tape placement with in-situ consolidation*

Die *AFPT GmbH* vertreibt seit ca. einem Jahrzehnt entsprechende Systeme, deren Eigenschaften in Werken von *STEYER* und *KÖLZER* im Detail beschrieben sind [KÖLZ08; STEY13]. *Automated Dynamics* setzt neuerdings ebenfalls Diodenlaser zur Verarbeitung von Thermoplast Tapes in ihren ATL-Anlagen ein, wodurch sich im Vergleich zu den Systemen mit Heißgas die notwendige Erwärmungslänge aufgrund der höheren Intensität reduzieren lässt [AUGU14].

Alle zuvor genannten Anlagen verfügen über eine Rolle als Andruckeinheit, sodass sich dreidimensionale Strukturen, vornehmlich in Wickelverfahren, fertigen lassen. Der Gestaltung der Rolle, insbesondere der Materialwahl, kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie sich einerseits flexibel an die Form anpassen soll, aber andererseits den hohen Prozesstemperaturen standhalten muss [STEY11]. Während bei AFP-Prozessen das Schneiden des zugeführten Bandes (engl.: cut on the fly) ohne Anhalten der Ablegebewegung Stand der Technik ist, ist es bei den zuvor genannten Anlagen nicht ohne weiteres möglich, Lamine ohne Verschnitt mit vollständiger in-situ Konsolidierung bis zum Laminatrand herzustellen [BREC15b; HENN14].

*Accudyne Systems* hat ein System zum in-situ Konsolidieren von ebenen Laminaten entwickelt. Die Andruckeinheit besteht dabei aus einem flächigen, temperierten Andruckschuh. Das zugeführte Tape wird zunächst mittels Infrarotstrahlung vorgewärmt, aber erst durch den beheizten Andruckschuh konduktiv über die Schmelztemperatur erwärmt. Um den Kontakt des feststehenden Andruckschuhs mit dem schmelzflüssigen Tape zu verhindern, wird eine Metallfolie zwischen Tape und Andruckschuh hindurchgezogen und nach der Prozesszone wieder aufgerollt. Dieses System ermöglicht es, das Tape während der Ablage zu schneiden und zu konsolidieren. Allerdings ist die maximale Ablebegeschwindigkeit des Systems auf  $83 \text{ mm/s}$  begrenzt. [LAMO03]

In Tabelle 2.5 werden die verschiedenen AFP-Systeme zur in-situ Konsolidierung hinsichtlich der genannten Unterscheidungsmerkmale dargestellt und verglichen.

**Tabelle 2.5:** Übersicht von Systemen zur Thermoplast-Tape Verarbeitung mit in-situ Konsolidierung

*Overview of systems for thermoplastic ATL with in-situ consolidation*

	Accudyne Systems	AFPT	Automated Dynamics
<b>Heizquelle</b>	Infrarotstrahlung und Konduktion	Laser	Heißgas oder Laser
<b>Kontakt</b>	Gleitschuh mit Stahlband	Rolle	Rolle
<b>Maschinenaufbau</b>	Portalsystem	Roboter mit serieller Kinematik	Roboter oder Wickelanlagen
<b>Anzahl Tapes</b>	einzelnes Tape	einzelnes Tape	ein- oder mehrfach

Somit lässt sich zusammenfassen, dass in den letzten Jahren einige Anlagen zum ebenen Ablegen von UD-Tapes ohne in-situ Konsolidierung entwickelt und kommerzialisiert wurden, die eine hohe Produktivität aufweisen. Die damit gefertigten Tape Stapel werden meist in einem nachgeschalteten Pressprozess zu Laminaten konsolidiert und anschließend als Verstärkungseinleger für hybride LFT- oder Spritzgussprozesse verwendet, s. Kapitel 2.4.2 [GRAF16].

Anlagen zur Tapeverarbeitung mit in-situ Konsolidierung sind industriell hauptsächlich zum Tapewickeln verbreitet oder werden für Forschungszwecke zur Herstellung von meist großen, dreidimensionalen Strukturen, insbesondere für die Luft- und Raumfahrt, eingesetzt. Eine wirtschaftliche Anlagentechnologie für kostensensitive Industrien zur Herstellung von belastungsoptimierten, ebenen Laminaten mittels in-situ Konsolidierung, die im Thermoformen oder Hinterspritzen weiterverarbeitet werden, existiert hingegen nicht. Diese Technologie soll daher im Rahmen dieser Dissertation erforscht werden.

## 2.4 Verarbeitung thermoplastischer Lamine

Processing of thermoplastic composite laminates

Ebene thermoplastische FVK-Lamine können aufgrund der Wiederaufschmelzbarkeit des Matrixmaterials zu komplexen, dreidimensionalen Bauteilen warmumgeformt werden. Zusätzlich bietet die Schmelzbarkeit weitere Möglichkeiten zum Fügen und Verarbeiten zu Multimaterialverbänden. Nachfolgend sollen die verschiedenen Fertigungsprozesse und die zu Grunde liegenden physikalischen Prinzipien der Verarbeitungsschritte erläutert werden.

### 2.4.1 Umformen von thermoplastischen Laminaten

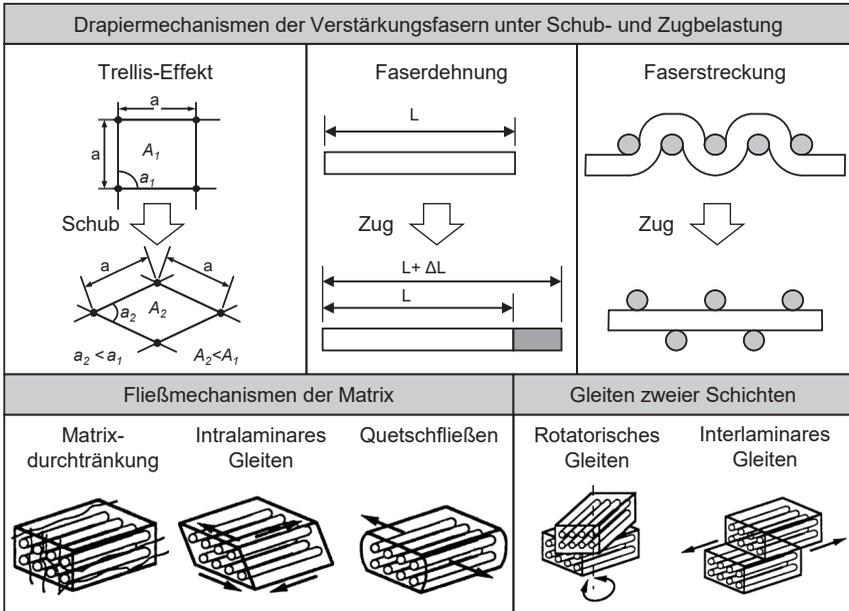
#### *Forming of thermoplastic composites*

Das Warmumformen von ebenen, vollständig konsolidierten Thermoplast-FVK Laminaten wird in Analogie zur Verarbeitung unverstärkter Thermoplaste als Thermoformen bezeichnet. Jedoch weisen bei FVK die beiden vorliegenden Phasen, Kunststoffmatrix und Faserverstärkung, vollkommen unterschiedliche Formgebungseigenschaften auf. Anders als bei Pressverfahren, bei denen die Formgebung durch die Fließfähigkeit bestimmt wird, ist beim Thermoformen faserverstärkter Thermoplaste die Drapierung der Verstärkungsfasern der geometriestimmende Faktor [NEIT14, S. 394]. Beim Thermoformen bleibt die Laminatdicke weitgehend erhalten, sodass es sich um ein umformendes Fertigungsverfahren handelt. Die einzelnen Umformmechanismen sind in Bild 2.12 zusammengefasst und werden im weiteren Verlauf für die beiden Phasen, Verstärkungsfasern und Matrix, erläutert.

#### **Drapieren der Verstärkungsfasern**

Das Umformen der trockenen Fasertextilien wird als Drapieren bezeichnet. Unter Drapierbarkeit wird die sphärische Verformbarkeit von textilen Flächengebilden ohne Faltenbildung verstanden [NEIT14, S. 394].

Beim Drapieren findet eine Relativbewegung der Fasern zueinander aufgrund von äußeren Zug- und Scherkräften statt. Dabei dominieren unter Zug- und Scherbeanspruchung drei Drapiermechanismen. Unter Zugbeanspruchung tritt zunächst eine Faserdehnung auf. Wenn die Verstärkungsfasern als Gewebe vorliegen, tritt zusätzlich eine Faserstreckung auf, die durch die Gewebeondulation ermöglicht wird, vgl. Kapitel 2.2.2. Generell sind Druckspannungen beim Drapieren zu vermeiden, da diese zu verstärkter Ondulation oder sogar zum Knicken der Fasern führen. Liegen lokal im Laminat Druckspannungszustände vor, kann folglich eine Faltenbildung im Laminat entstehen. Bei textilen Geweben wird die Drapierbarkeit maßgeblich durch Scherung bestimmt. Es tritt unter Scherbeanspruchung eine Winkeländerung der Kett- und Schussfäden zueinander auf. Aufgrund von Reibung zwischen den Fasern ist der maximale Scherwinkel begrenzt. Ab diesem so genannten *Locking Angle* ist keine weitere Orientierungsänderung ohne hohen Kraftaufwand möglich [LONG07].



**Bild 2.12:** Grundlegende Drapier- und Fließmechanismen beim Thermoformen von Thermoplast-FVK, vgl. [ERMA07]

*Basic draping mechanisms and matrix flow during thermoforming of TP-CFRP*

Bei faserverstärkten Thermoplasten spielt zusätzlich der Trellis-Effekt eine besondere Rolle. Unter Scherung bei gleichbleibendem Abstand zwischen den Faserkreuzungspunkten verringert sich die zwischen den Fasern aufgespannte Fläche, sodass das überschüssige Matrixvolumen aus diesen Bereichen herausfließen muss, woraus ein zusätzlicher Widerstand gegen die Verformung entsteht. Unidirektional faserverstärkte Schichten hingegen werden weniger stark von den textilen Eigenschaften, sondern vielmehr von den Matrixeigenschaften bestimmt, da die Fasern nicht über textile Prozesse miteinander verknüpft wurden und somit frei in der Matrix fließen können. [NEIT14, S. 393–397; ERMA07]

**Matrix**

Die Umformbarkeit der thermoplastischen FVK wird stark durch das Fließverhalten der Matrix beeinflusst. Die den Fließvorgang wesentlich beeinflussende Viskosität der schmelzflüssigen Matrix nimmt mit zunehmender Temperatur und Schergeschwindigkeit ab. Durch die äußeren Prozesskräfte induzierten Druckgradienten und Scherspannungen treten Fließvorgänge der Matrix auf. [VANC08]

Unter der Berücksichtigung der Faserverstärkung lassen sich für unidirektionale Schichten fünf verschiedene Fließmechanismen unterscheiden, vgl. Bild 2.12. Inner-

halb einer Schicht können Matrixperlokation, Quetschfließen und intralaminare Gleiten auftreten. Zwischen zwei Schichten sind entsprechend rotatorisches und translatorisches, interlaminares Gleiten quer oder senkrecht zur Faserrichtung möglich.

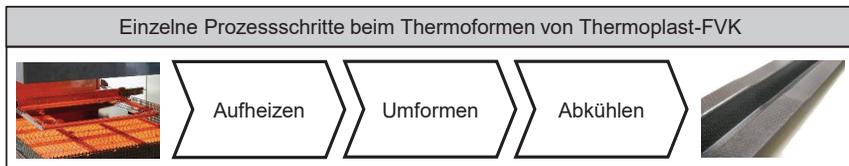
Geringe Parameteränderungen können das Thermoformen von unidirektionalen Laminaten stark beeinflussen, da aufgrund fehlender textiler Faserverbindungen die Drapierung keine dominierende Rolle spielt und es sich vielmehr um einen hydrodynamischen Gleitvorgang handelt. Die Vielzahl der rheologischen Parameter, wie Temperatur, Schergeschwindigkeit, Faservolumengehalt und Viskosität, sowie ihre unterschiedlichen Werte in longitudinaler oder transversaler Faserrichtung, macht eine Prozesssimulation schwierig. Es sind aufwändige Materialtests, z. B. für die Reibung zwischen Werkzeug und Erstlage, notwendig. Zurzeit sind nur wenige kommerzielle Softwarelösungen, wie z. B. das Simulationsprogramm *AniForm*, verfügbar, die über eine kinematische Simulation des Drapiervorgangs hinausgehen und die rheologischen Eigenschaften beim Umformen von unidirektionalen Materialien berücksichtigen. [HAAN13; VANC08; BERT02]

Zusätzlich zum Drapieren der Fasern ist beim Thermoformen von FVK-Bauteilen der Verzug zu beachten. Dieser entsteht bei Abkühlung des Laminates von Prozess- zur Raumtemperatur aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten des anisotropen Materials und kann durch eine entsprechende thermische Prozessführung und Werkzeugtechnologie kontrolliert werden. [WIJS05]

### **Thermoformverfahren**

Das Thermoformen ist ein Umformverfahren, bei dem beispielsweise ein konsolidiertes Organoblech konstanter Dicke über Schmelztemperatur aufgeheizt und anschließend in einer Presse umgeformt wird. Beim Aufheizen entsteht zunächst eine teilweise Dekonsolidierung, das sogenannte *Loften* [EGGE11, S. 43]. Im Werkzeug finden dann die zuvor beschriebenen Umformvorgänge und eine finale Konsolidierung statt. Mittlerweile haben sich eine Vielzahl von Verfahrensvarianten, wie z. B. das Diaphragmaverfahren oder das Stempelumformverfahren, für verschiedene Anwendungen etabliert. Letzteres ist besonders für den Serieneinsatz geeignet, da sich eine Zykluszeit für den gekoppelten Umform- und Abkühlprozess von unter einer Minute erreichen lässt. Dabei wird das Organoblech in einem Metallgesenk mittels eines Metall- oder Elastomerstempels umgeformt. Das Werkzeug ist dabei, ähnlich wie beim Spritzgießen, auf eine Temperatur um 50–150 K unter der Verarbeitungstemperatur des Matrixmaterials temperiert, um einerseits ein frühzeitiges Einfrieren des Organoblechs bei der Umformung zu verhindern und andererseits den Bauteilverzug beim Abkühlen zu minimieren. Die Kavität im Gesenk entspricht der Dicke des Halbzeuges bzw. der Wandstärke des Bauteils, da keine makroskopischen Fließeffekte stattfinden. In Regionen starker Umformung kann jedoch aufgrund des Trellis-Effektes eine lokale Vergrößerung der Kavität notwendig sein [LANX17]. Die Verwendung eines Elastomerstempels führt gegenüber einem Metallstempel zu einem homogeneren Druckzustand beim Umformen und ermöglicht eine höhere Geometrie Komplexität. Jedoch ist die

Werkzeugstandzeit begrenzt. Die einzelnen Prozessschritte sind in Bild 2.13 aufgezeigt. Es sind zusätzliche, unterstützende Prozessschritte, wie Positionieren, Handhaben, Entformen und Nachbearbeitung, notwendig, die je nach Verfahrensvariante bzw. Prozesskette variieren. Das Thermoformen wird in verschiedenen Branchen, z. B. dem Automobilbau, der Luftfahrt aber auch für Konsumgüter, eingesetzt. [NEIT14, S. 393–408; GARD11; EGGE11; LONG07]



**Bild 2.13:** Prozessschritte beim Thermoformen [NEIT14, S. 396; GARD11]

*Process steps for thermoforming of thermoplastic composites*

Die Verarbeitung von lokal verstärkten Organoblechen mit nicht konstanter Blechdicke im Thermoform-Verfahren ist ebenfalls möglich. Die Konsolidierung der Verstärkungslagen mit dem Organoblech findet dabei häufig erst beim Umformen statt. Jedoch ist für diese Verfahrensvariante ein erhöhter Aufwand für die Werkzeug- und Handhabungstechnologie notwendig: Aufgrund der variablen Halbzeugdicke sind in metallischen Umformwerkzeugen entsprechende Taschen bzw. Aussparungen erforderlich. Ist die Positioniergenauigkeit des Halbzeugs im Werkzeug unzureichend und die Taschen werden beim Schließen des Werkzeuges verfehlt, besteht die Gefahr von nicht ausformten oder nicht vollständig konsolidierten Bauteilen. [NEIT14, S. 414]

Ein alternativer Ansatz besteht darin, lokal verstärkte Organobleche mittels Gummi- bzw. Elastomerwerkzeugen umzuformen, vgl. [BREC12]. Diesen Werkzeugen sind jedoch insbesondere bei hohen Umformtemperaturen Grenzen bzgl. der Standfestigkeit und der erreichbaren Oberflächengüte gesetzt.

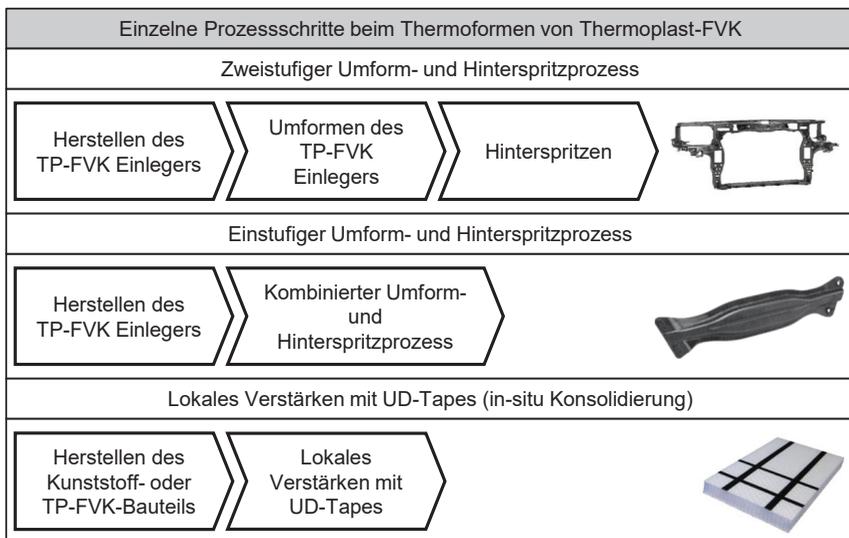
## 2.4.2 Herstellen von thermoplastischen Hybridbauteilen

*Hybrid thermoplastic composites*

Die Aufschmelzbarkeit von Thermoplast-FVK erlaubt die Fertigung von Multimaterialbauteilen in verschiedenen Verfahren. So lassen sie sich mit herkömmlichen Fügeverfahren, wie z. B. Nieten, mit Metallen oder anderen artungleichen Materialien zu hybriden Baugruppen verbinden. Als industrielles Beispiel sei hier die Verbindung von Spanten mit PPS-CF Clips im Airbus A350 genannt [BLAC15]. Möglichkeiten zur Verbesserung der Verbindungsfestigkeit ergeben sich dadurch, dass durch Warmumformung Löcher ohne Faserschädigung, die beim Bohren auftritt, eingebracht werden können. Die Fasern werden an den Lochrand verschoben, sodass sich ein stromlinienförmiger Faserverlauf um das Loch ergibt [BREC16c; BROW15; DURA09]. Dieses Verfahren lässt sich auch auf das Durchsetzfügen erweitern, sodass eine Multimaterialverbindung ohne zusätzliches Verbindungselement realisiert werden kann [SEID11].

Das flächige Fügen mit Metallen ist ebenfalls über eine Strukturierung der Metalloberfläche möglich. Unter Druckbeaufschlagung fließt die Thermoplastmatrix in die Kavitäten der Metalloberfläche, sodass sich ein Mikroformschluss ergibt. [VAND16; KUKL17]

Zusätzlich bieten thermoplastische FVK weitere neuartige Möglichkeiten zur Fertigung von Multimaterialbauteilen. Insbesondere ist hier die Kombination von endlosfaserverstärkten FVK-Bauteilen mit reinen oder kurzfaserverstärkten Thermoplasten zu nennen. Die FVK-Komponente bietet hervorragende mechanische Eigenschaften, während die Kunststoffkomponente die erforderliche Geometriekomplexität, Funktionalität oder Oberflächenbeschaffenheit im so entstehenden Hybridbauteil abbilden kann. Bild 2.14 zeigt drei mögliche Prozessrouten zur Fertigung von hybriden Thermoplast-FVK Bauteilen, die im Folgenden erläutert werden.



**Bild 2.14:** Herstellung von hybriden Thermoplast FVK-Bauteilen [BREC16b; SCHU12; LANX10]

*Process routes for the manufacturing of hybrid thermoplastic composites*

### Zweistufige Herstellung von Vollkunststoff-Hybridbauteilen

Kunststoff-Metall-Verbunde werden im Automobilbau immer häufiger eingesetzt, um hochintegrierte, belastbare und leichte Strukturbauteile herzustellen. Dabei werden Stahlblechstrukturen im Spritzgussprozess mit thermoplastischen Elementen, z. B. Rippenstrukturen, kombiniert. Diese Verbundart wird Hybridtechnik genannt. Die Verbindung der unterschiedlichen Werkstoffe erfolgt dabei meist formschlüssig. Die Verwendung von Organoblechen anstelle von Stahlblechen bietet mehrere Vorteile. Einerseits besteht die Möglichkeit, auf Korrosionsschutz zu verzichten, andererseits kann durch Stoffschluss das Organoblech direkt im Spritzgussprozess mit Funktionselementen und Anbauteilen versehen werden. Das Organoblech wird zunächst erhitzt und thermogeformt. Anschließend wird das resultierende Halbzeug bis kurz unter den

Schmelzpunkt der Kunststoffmatrix erwärmt, in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt und hinterspritzt. Dabei ergeben sich Fügestigkeiten, die der einer Schweißung entsprechen. [LANX09]

Ein Beispiel für ein entsprechendes Bauteil ist das Frontend des Audi A8, bei dem der Untergurt aus dem Organoblech Tepex® von Bond Laminates besteht [MALE10]. Die Umformwerkzeuge für Organobleche sind aufgrund der geringen Prozessdrücke relativ günstig [LANX17]. Jedoch erfordert das Umformen komplexer Geometrien eine genaue Prozessführung, wie z. B. die Verwendung von Niederhaltern oder das Aufbringen von definierten Vorspannungen im Laminat, um Faltenbildung zu vermeiden [BROO07]. Dies kann in diesem zweistufigen Prozess gut realisiert werden. Trotzdem besteht vermehrt die Bestrebung, Hybridbauteile in einem Prozessschritt zu fertigen. Dabei findet das Umformen des Organoblechs im Spritzgusswerkzeug statt.

### **Kombinierter Umform-Hinterspritzprozess**

Das Umformen und Hinterspritzen in einem Prozessschritt ermöglicht gegenüber dem zweistufigen Prozess eine verkürzte Prozesskette. Bei diesem Verfahren wird das Organoblech außerhalb der Spritzgussmaschine aufgeschmolzen und im schmelzförmigen Zustand in die Maschine transferiert. Die Schließbewegung des Werkzeuges und der Anspritzdruck übernehmen das Umformen des FVK-Einlegers. Die Umformpresse sowie die dazugehörige Peripherie entfallen. Außerdem ist nur ein einmaliges Aufheizen und Abkühlen notwendig, was neben den verringerten Investitionskosten und dem reduzierten Energieverbrauch auch die Durchlaufzeit deutlich verringert. [LANX17; SCHU12; LANX09] Das Hinterspritzen des Organoblechs kann auch mit kurz- oder langfaserverstärkten Thermoplasten durchgeführt werden. [KROP17b; GRAF16]

Wegen des einstufigen Prozesses ergeben sich besondere Anforderungen an das kombinierte Spritzguss-Umformwerkzeug. So sind entsprechende Aktiv- und Funktionselemente zum Zentrieren und Fixieren des FVK-Einlegers im Werkzeug vorzusehen [KRAU13, S. 9]. Insbesondere bei Einlegern aus unidirektionalen Laminaten sind erhebliche Werkzeugaufwände notwendig, um eine Verminderung der mechanischen Eigenschaften, z. B. durch Faserwellung, zu vermeiden [RIET16]. Vertikal schließende Spritzgussanlagen vereinfachen die Handhabung des geschmolzenen, biegeschlaffen Laminats. Bereits bei frühen Untersuchungen zur Herstellung hybrider Thermoplast-Bauteile kamen diese Anlagen zum Einsatz [BOUR98]. Zusätzlich kommt der Werkzeugtemperierung eine große Bedeutung zu, da diese maßgeblich die Fügestigkeit beeinflusst [JOPP17]. Der einstufige Prozess bietet somit das Potenzial einer höheren Wirtschaftlichkeit und besseren Verbundhaftung, ist aber mit steigender Geometrie-komplexität des Einlegers mit erhöhtem Aufwand verbunden. Daher muss eine Entscheidung für den ein- oder zweistufigen Prozess im Einzelfall in Abhängigkeit der technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen getroffen werden.

Beim ein- und zweistufigen Prozess weist das gesamte Bauteil während des Fügeprozesses ein hohes Temperaturniveau auf, das ungefähr bei Schmelztemperatur liegt. Aufgrund von Schrumpf, Schwindung und der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffi-

zienten der jeweiligen Komponenten, die insbesondere beim Einsatz von CFK zu berücksichtigen sind, können starker Bauteilverzug oder Eigenspannungen entstehen. Eine Möglichkeit, Hybridbauteile zu fertigen ohne beide Komponenten vollständig auf Schmelztemperatur zu erwärmen, ist das Verstärken von Kunststoffbauteilen mit UD-Tapes mittels in-situ Konsolidierung.

### **Lokales Verstärken durch unidirektionale Tapes**

Die zuvor beschriebenen Verfahren beruhen alle auf der Herstellung eines Hybridbauteils im Spritzguss- oder Pressprozess. Insbesondere bei kleineren Stückzahlen oder größeren Bauteilabmaßen kann es jedoch sinnvoll sein, die unverstärkten Komponenten außerhalb eines Werkzeugs im AFP-Verfahren mittels in-situ Konsolidierung mit unidirektionalen Tapes zu verstärken [HOLS14; HOLS12; BREC11]. Hierbei können sowohl ebene Platten als auch einfach gekrümmte, konvexe Oberflächen oder Hohlkörper im Lege- oder Wickelverfahren mit Tapes kombiniert werden. Dabei wird das einlaufende Tape entsprechend des in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Verfahrens vollständig aufgeschmolzen und mit dem oberflächlich erwärmten Substrat verschweißt. Das Grundbauteil wird also nicht vollständig erwärmt, was verschiedene Vorteile aufweist, wie z. B. Energieeffizienz, Beibehaltung des Kristallinitätsgrads und Oberflächenbeschaffenheit außerhalb der Fügezone sowie lokale Begrenzung der Schwindungseffekte. Da es sich um einen additiven Prozess handelt, wird kein Werkzeug benötigt, was sich positiv auf die Prozesskosten auswirkt. So betragen die Prozesskosten für die Verstärkung eines Bauteils mit einem 250 mm langem CFK-Tape weniger als 0,01 € [BREC16a].

Es lassen sich auch unterschiedliche thermoplastische Matrixsysteme miteinander verbinden [BREC14]. Als Grundmaterialien können sowohl spritzgegossene oder additiv gefertigte Bauteile, Kunststoff- oder GMT-Platten, Organobleche, Folien sowie extrudierte Rohre oder Holstrukturen verwendet werden. Jedoch ist die bei der Verstärkung mit dem ATL-Verfahren erzielbare Geometriekomplexität verhältnismäßig gering. Eine Alternative besteht darin, lokal verstärkte Platten anschließend umzuformen. [BREC16a; BREC12; WAKE02]

Neben dem lokalen Verstärken besteht die Möglichkeit, verschiedene thermoplastische FVK-Bauteile mit herkömmlichen Verfahren wie dem Ultraschallschweißen, dem Widerstandsschweißen und dem Laserdurchstrahlschweißen zu verbinden. [BREC15c; HOPM14; SHI12]

Damit stehen eine Vielzahl verschiedener Prozessketten zur Fertigung von Hybridbauteilen bereit. Viele davon entstammen der herkömmlichen Kunststoffverarbeitung und sind mit hohen Investitionskosten für Form- oder Gusswerkzeuge verbunden. Zusätzlich steht oft die Funktionalisierung mittels der unverstärkten Kunststoffkomponente im Vordergrund. Deshalb soll in dieser Arbeit eine Fertigungstechnologie mit reduziertem Investitionsaufwand entwickelt werden, die den Anforderungen des Thermoformens belastungs- und verschnittoptimierter Thermoplast-Lamine gerecht wird.

## 2.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

### Summary of the state of the art

Der Einsatz von FVK bietet die Möglichkeit, einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz zu leisten. Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, ist es jedoch notwendig, die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit von FVK gegenüber konventionellen Materialien zu steigern. Einen Beitrag dazu kann die Verwendung von thermoplastischen Matrixsystemen liefern, die eine schnelle und automatisierte Verarbeitung von FVK ermöglichen. Zusätzlich zum werkstofflichen Leichtbau, bei dem herkömmliche Materialien durch FVK substituiert werden, ist es jedoch notwendig, die besonderen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs zu berücksichtigen und somit zu belastungsoptimierten Strukturen zu gelangen.

Die in Kapitel 2.2 zusammengefassten Werkstoffeigenschaften verdeutlichen, dass es unabdingbar ist, die guten mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern, insbesondere bei Verwendung von teuren Kohlenstofffasern, optimal auszunutzen. Dazu ist es notwendig, auf den Belastungsfall angepasste Laminataufbauten zu verwenden. Neben dem generellen Aufbau des Verbundwerkstoffs aus zwei unterschiedlichen Phasen sowie der statistischen Zusammensetzung des Werkstoffs, von der Faser- bzw. Mikroebene über die Einzelschichten bis hin zur makroskopischen Betrachtung des Laminates, führt der Einsatz thermoplastischer Matrixsysteme mit ihren hohen Verarbeitungstemperaturen zu besonderen Herausforderungen bei der Herstellung von FVK-Bauteilen.

Es ist offensichtlich, dass herkömmliche subtraktive Verfahren, die aus standardisierten, nicht lastangepassten Halbzeugen, wie z. B. gewebebasierten Organoblechen, Material heraustrennen, die Anforderungen an eine effiziente Ausnutzung des Werkstoffs nur unzureichend erfüllen oder die Verwendung mehrerer kleiner Zuschnitte erforderlich machen. Daher sind additive Fertigungstechnologien erforderlich, die einen Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und technologischem Optimum bilden. So ist es ebenfalls nicht wirtschaftlich, für jedes Bauteil bei der spezifischen Ablage einer Einzelfaser oder eines Einzelrovings zu beginnen. Die in Kapitel 2.3 beschriebenen unidirektionalen, thermoplastischen Tapes bieten einen Kompromiss aus standardisierten Halbzeugen bei gleichzeitig vorhandener Flexibilität zum Aufbau von belastungsoptimierten Laminaten. Bestehende Anlagen zur Tapeablage erfordern oft eine Konsolidierung der Tapeastapel in nachgeschalteten, energieaufwändigen Autoklav- oder Pressprozessen. Zusätzlich sind an den Laminataufbau angepasste Konsolidierungswerkzeuge notwendig, um eventuelle Dickensprünge abbilden zu können. Das Verfahren des Thermoplast-Tapelegens mit in-situ Konsolidierung bietet hier eine Möglichkeit, auf die aufwändige Nachkonsolidierung zu verzichten. Jedoch ist bisher keine entsprechende Anlagentechnologie verfügbar, die eine wirtschaftliche und flexible Herstellung ebener, belastungsoptimierter Thermoplast-FVK Lamine ermöglicht. Diese soll im Rahmen dieser Arbeit erforscht werden.

Die ebenen Halbzeuge lassen sich anschließend, z. B. mittels Thermoformen, zu dreidimensionalen Bauteilen umformen, s. Kapitel 2.4. Die Kombination von FVK mit verstärkten Thermoplasten ermöglicht es zudem, die erzielbare geometrische Komplexität in Form eines Hybridbauteils deutlich zu steigern und z. B. durch das Einbringen von Rippenstrukturen die mechanischen Eigenschaften deutlich zu verbessern. Den bisher verfügbaren Prozessen sind jedoch hinsichtlich der erreichbaren geometrischen Flexibilität Grenzen gesetzt, da bauteilspezifische und teure Werkzeuge notwendig sind. Als Beispiel sei hier der Hybrid-Spritzgießprozess, entweder als integrierter Formgebungsprozess oder als Verfahrenskombination mit Thermoformen und nachgeschaltetem Hinterspritzprozess, genannt.

Aus dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse lässt sich ein Forschungsbedarf für eine wirtschaftliche und flexible Fertigung von maßgeschneiderten Faserverbundbauteilen auf Basis von unidirektionalen thermoplastischen Halbzeugen, den UD-Tapes, ermitteln. Daraus leitet sich der Forschungsgegenstand dieser Arbeit ab. Es soll eine neuartige FVK-Prozesskette entwickelt werden, die auf der Verwendung von UD-Tapes zur flexiblen Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten basiert. Dazu muss eine entsprechende Anlagentechnologie aufgebaut werden, welche die Vorteile der Tapeverarbeitung zu ebenen Laminaten mit der Wirtschaftlichkeit einer kontinuierlichen Fertigung kombiniert. Zusätzlich muss die Bauteilherstellung aus den belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten erforscht werden. Eine neuartige Verfahrenskombination zum Fügen von Hybridbauteilen im Thermoformprozess ist notwendig, um eine Prozesskette mit reduzierten Werkzeugkosten zu ermöglichen. Da der Vorteil dieser Prozesskette neben verbesserten Leichtbaueigenschaften insbesondere in ihrer Wirtschaftlichkeit liegt, ist parallel zur technischen Entwicklung die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Prozesse mit Hilfe von entsprechenden Modellen zu bewerten.

## 3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

### *Task definition and objective*

Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist eine Serienherstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten mit variabler Dicke aus unidirektionalen Tapes nur mit einer nachgeschalteten Konsolidierung in einem Heißpress- oder Autoklavprozess möglich. Die daraus resultierende hohe Zykluszeit bei gleichzeitig hohen Energie- und Investitionskosten hemmt eine weite Verbreitung dieses Verfahrens. Roboter-gestützte Systeme zum Laser-unterstützten Thermoplast-Tapelegen mit in-situ Konsolidierung ermöglichen zwar die Herstellung von belastungsoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes, erfüllen aber hinsichtlich Verschnitt und Produktivität nicht die Anforderungen an eine industriell wirtschaftliche Produktion. Mangelnde Ablegegeschwindigkeiten sind auch der Nachteil von konduktionsbasierten Verfahren mit in-situ Konsolidierung, die eine höhere Schnittgenauigkeit aufweisen [LAMO09]. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit eine Produktionstechnologie erforscht werden, die eine wirtschaftliche Herstellung von thermoplastischen FVK-Bauteilen auf Basis von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes ermöglicht. Hierzu soll eine entsprechende Anlagentechnologie entwickelt und aufgebaut werden. Die zu untersuchende Prozesskette umfasst neben der Tapeablage ebenfalls auch das Herstellen von hybriden, thermoplastischen FVK-Bauteilen in einem Thermoformprozess, bei welchem die erforderlichen Werkzeugkosten erheblich reduziert werden sollen. Basis dafür bietet die Verwendung additiver Fertigungsverfahren. Die sich daraus ergebenden, bisher unbeantworteten Forschungsfragen sollen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden.

### 3.1 Wissenschaftliche Fragestellungen

#### *Scientific questions*

Um eine flexible und wirtschaftliche Prozesskette zu realisieren, sind für die beiden Prozessschritte Laminatfertigung und Herstellung des Hybridbauteils neue Verfahrenskonzepte zu erforschen und zu demonstrieren. Dementsprechend leiten sich zwei wesentliche Forschungsfragen ab.

#### **Laminatfertigung**

Die Forschungsfrage, ob und wie eine wirtschaftliche Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes mittels in-situ Konsolidierung möglich ist, soll beantwortet werden. Dabei ist zu untersuchen, inwiefern sich der Verschnitt bei der in-situ Verarbeitung von unidirektionalen Tapes reduzieren lässt und gleichzeitig eine hohe Konsolidierungsqualität auch in den Randbereichen des Laminates erreicht werden kann. Bei der verschnittminimierten Verarbeitung von Tapes soll insbesondere das Schneiden und Ansetzen des Materials ohne Reduzierung der Ablegegeschwindigkeit erforscht werden (engl.: cut and add on the fly). Während dies bei duroplastischen AFP-Prozessen bereits Stand der Technik ist, ergibt sich aufgrund des

notwendigen Wärmeeintrags im Zwickelbereich bei thermoplastischen, strahlungsunterstützten in-situ Verfahren daraus eine bedeutende Forschungsfrage. Um eine hohe Produktivität und Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen, soll überprüft werden, in wie weit sich kostengünstige Wärmequellen, insbesondere Infrarotstrahler, zur Tapeverarbeitung eignen. Des Weiteren ist zu untersuchen, welche Prozessparameter Auswirkungen auf die erzielbaren Lamineigenschaften haben und welche mechanischen Eigenschaften sich erreichen lassen.

Aus den vorgestellten Arbeiten und Erkenntnissen lassen sich damit folgende drei Forschungsthesen ableiten:

*Das IR-unterstützte Thermoplast-Tapelegen mit in-situ Konsolidierung ermöglicht eine verschnittminimierte Verarbeitung von unidirektionalen Tapes.*

*Mit dem entwickelten Verfahren lassen sich ebene, belastungsoptimierte Thermoplast-FVK Lamine flexibel und wirtschaftlich herstellen.*

*Es kann eine ausreichende Konsolidierungsqualität für die Verarbeitung der Lamine im Thermoformprozess erzielt werden.*

### **Herstellung des Hybridbauteils**

Daran schließt sich die Forschungsfrage an, wie die belastungs- und verschnittoptimierten Lamine zur Herstellung thermoplastischer Hybridbauteile verwendet werden können, ohne dass hierfür teure Werkzeuge notwendig sind.

Diese maßgeschneiderten ebenen Halbzeuge weisen keine konstanten Dicken und Faserorientierungen auf, sodass sich klassische Umformprozesse nicht ohne Weiteres anwenden lassen. Die Änderung der Laminatdicke bringt heutzutage aufwändige Anpassungen am Spritzgieß- oder Umformwerkzeug mit sich. Daher ist ebenfalls zu untersuchen, wie sich aus den belastungs- und verschnittoptimierten Organoblechen aus UD-Tapes funktionsintegrierte Bauteile flexibel fertigen lassen. Dabei werden additive Fertigungsverfahren zur Herstellung der unverstärkten Thermoplastkomponente betrachtet, sodass Dickensprünge der Lamine entsprechend berücksichtigt werden können. Diese Strukturen sollen mit den FVK-Laminen intrinsisch im Thermoformprozess gefügt werden. Die Verbindung der beiden Komponenten erfolgt dabei hauptzeitparallel zum Umformvorgang. In Analogie zur herkömmlichen Verarbeitung von Organoblechen orientiert sich die vierte Forschungsthese:

*Aus den belastungs- und verschnittoptimierten FVK-Laminen lassen sich durch Kombination mit additiv gefertigten Thermoplast-Strukturen funktionsintegrierte Multi-Materialbauteile in einem Thermoformprozess mit reduziertem Werkzeugaufwand fertigen.*

## **3.2 Vorgehensweise**

### *Procedure*

Die wissenschaftliche Bearbeitung der Forschungsfragen erfordert zunächst, die einzelnen Prozessschritte in physikalischen Modellen zu beschreiben. Dazu werden in

Kapitel 4 Modelle für die Prozessschritte Imprägnieren, Konsolidieren, Faserablage und Umformen hergeleitet. Auf Basis dieser Modelle werden anschließend die entsprechenden Produktionsparameter ermittelt und hinsichtlich der Zielstellung bewertet. Ziel ist es dabei, verschiedene Prozesse zu einer ausgewogenen Lösung zu verketten, die hohes Leichtbaupotenzial mit einer guten Wirtschaftlichkeit kombiniert.

Aufbauend auf den so ermittelten Anforderungen für eine optimierte Prozesskette werden entsprechende Konzepte zur anlagentechnischen Umsetzung erarbeitet. Dabei steht eine belastungs- und verschnittoptimierte Ablage der UD-Tapes bei gleichzeitiger in-situ Konsolidierung im Vordergrund. Der in Kapitel 5 beschriebene Konstruktions- und Entwicklungsprozess des Produktionssystems folgt dabei dem Vorgehen der Richtlinie VDI 2221 [VDI 93]. Nach der Auswahl geeigneter Konzepte für verschiedene Teilfunktionen werden diese zunächst an Prüfständen verifiziert, bevor die eigentliche Anlagentechnologie entwickelt und aufgebaut wird.

Anhand der damit zur Verfügung stehenden Produktionsausrüstung wird in Kapitel 6 eine fundierte Prozessanalyse des Herstellens von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus UD-Tapes durchgeführt. Hierzu findet eine Prozessentwicklung anhand eines teilfaktoriellen Versuchsplans statt und die erreichbaren Materialeigenschaften auf Laminatenebene werden bestimmt. Damit können die ersten drei Forschungsthemen validiert werden.

Die Herstellung von hybriden dreidimensionalen FVK-Bauteilen ist Gegenstand von Kapitel 7. Die mit der zuvor entwickelten Anlagentechnologie gefertigten Laminare werden in einem neuartigen Thermoformingverfahren mit unverstärkten Kunststoffstrukturen zu Hybridbauteilen verbunden. Anhand dieser Bauteile erfolgt anschließend die Bewertung der Prozesskette. Dabei werden die erzielbaren mechanischen Eigenschaften, d. h. Festigkeit, Konsolidierungsgrad und erreichbare Geometriekomplexität, der hergestellten Bauteile untersucht. Zusätzlich wird die Prozesskette sowohl hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit als auch bezüglich der erreichten Ressourcen- und Energieeffizienz bewertet. Dadurch kann die vierte Forschungshypothese anhand eines empirischen Beispiels beantwortet werden.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Einordnung in aktuelle Forschungsvorhaben ab. Zuletzt werden Ansätze zur Ableitung neuer Forschungsfragestellungen aufgezeigt.



## 4 Technisch-wirtschaftliche Modellierung der FVK-Prozesskette

### *Technical and economical modelling of the composite process chain*

Basierend auf dem Stand der Technik wurden die Potenziale zur Effizienzsteigerung bei der Verwendung von Faserverbundkunststoffen aufgezeigt. Die guten mechanischen Werkstoffeigenschaften leiten sich aus dem Größeneffekt und der damit einhergehenden hohen Anzahl an Einzelfasern ab. So liegen in einem FVK-Bauteil beispielsweise bei einem Faservolumengehalt  $\varphi_f$  von 50 % ca. 10.000 Kohlenstofffaser-Filamente pro Quadratmillimeter Bauteilquerschnittsfläche  $A_Q$  vor. In dieser Beschaffenheit des Verbundwerkstoffs sind die erheblichen und teilweise ungelösten Herausforderungen bzgl. einer automatisierten und wirtschaftlichen Produktion begründet. Die Prozesskette muss den unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften von Faser und Polymer Rechnung tragen. Zusätzlich wird die Komplexität der Fertigung durch die Anisotropie des Verbundwerkstoffes erhöht.

Eine wirtschaftliche Produktion muss sowohl die prozesstechnischen Aspekte der Herstellung von Endlosfaser-Halbzeugen und Polymer als auch die diskrete Bauteilfertigung abdecken. Dazu hat sich eine Vielzahl von Verfahren und Prozessrouten unter Verwendung verschiedener Halbzeuge etabliert. Ein besonders vielversprechenderer Ansatz, diese Herausforderung zu lösen, ist die Verwendung von thermoplastischen Halbzeugen wie Organoblechen und Tapes. Die in dieser Arbeit adressierte Anforderung an eine wirtschaftliche und flexible Prozesskette erfordert neue Verfahrensvariationen bzw. eine Rekombination von Prozessschritten im bestehenden Lösungsraum.

Für die Bestimmung des technisch-wirtschaftlichen Optimums einer Prozesskette ist es notwendig, die einzelnen Prozessschritte samt ihrer fundamentalen physikalischen Wirkprinzipien zu modellieren und auf wesentliche Kenngrößen, wie z. B. Produktivität, Robustheit und Wirtschaftlichkeit, zu abstrahieren. Im Folgenden sollen daher zunächst die produktionssystematischen Anforderungen an eine FVK-Prozesskette betrachtet werden, s. Kapitel 4.1. Anschließend lassen sich die einzelnen Schritte zu einer optimalen Kette kombinieren und Empfehlungen bzgl. der technischen Umsetzbarkeit ableiten. Dazu werden in Kapitel 4.2 die einzelnen Prozessschritte für die Hybridbauteilfertigung aus thermoplastischen Tapes modelliert und bewertet. Diese Ergebnisse sollen dann im weiteren Verlauf für den Aufbau einer entsprechenden Demonstrations-Prozesskette herangezogen und anhand dieser validiert werden.

### 4.1 Modellierung der FVK-Prozesskette

#### *Modelling of the process chain for composite manufacturing*

Die Fertigung von FVK-Bauteilen wird zunächst aus Sicht der Wertschöpfungskette betrachtet und damit in den Kontext der Prozesskettenauslegung eingeordnet. Dabei wird die Reihenfolge der einzelnen Prozess- und Fertigungsschritte betrachtet und modellhaft abgebildet. Anschließend wird die Bedeutung von urformenden und additiven

Fertigungsverfahren für die effiziente Herstellung von FVK-Bauteilen erörtert. Um eine technisch-wirtschaftliche Bewertung zu ermöglichen, werden zudem Hilfsmittel und Kenngrößen zur Quantifizierung der Produktivität von Leichtbau-Produktionsketten erarbeitet, vorgestellt und diskutiert.

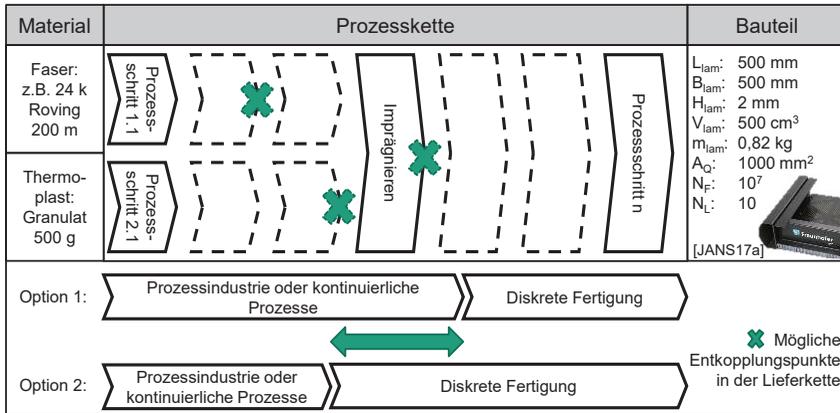
#### 4.1.1 Beurteilung der Prozesskette

##### *Assessment of the process chain*

In der Produktionstechnologie nimmt die Fertigungstechnik im Sinne der Bearbeitung diskreter Werkstücke einen wesentlichen Stellenwert in der Wertschöpfungskette ein. In der Kunststoff- und Textilverarbeitung spielen zusätzlich prozesstechnische Verfahren und kontinuierliche Verarbeitungsprozesse von Halbzeugen eine wichtige Rolle. In der industriellen Produktion haben sich diskrete Fertigung und Prozesstechnik als weitgehend getrennte Domänen herausgebildet [MERS11, S. 7]. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Produkte erfordern unterschiedliche Verfahren, die zu spezifischen Anlagentechnologien sowie verschiedenen Anlagen- und Prozessmodellen geführt haben. Die Integration von Prozesstechnik und diskreter Fertigung zu hybriden Anlagen bzw. hybriden Prozessketten stellt eine wesentliche Herausforderung dar [MERS11, S. 18]. Aufgrund des Verbundwerkstoffcharakters und der hybriden Prozessschritte ist genau dies bei der Fertigung von FVK-Bauteilen zu berücksichtigen.

In der FVK-Bauteilfertigung sind neben der Materialherstellung bzw. den Vorprozessen der Kunststoff- und Textilverarbeitung die drei wesentlichen Produktionsschritte Imprägnieren, Konsolidieren und Formgebung durchzuführen. Die Änderung der Reihenfolge dieser Schritte und die Kombination verschiedener Verfahren ermöglicht unterschiedliche Prozessketten. Dabei kann der Übergang von Prozessindustrie bzw. kontinuierlicher Verarbeitung zur diskreten Fertigung eines Bauteils an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Prozesskette stattfinden.

Der betrachtete Lösungsraum für die Herstellung von Thermoplast-Hybridbauteilen ist in Bild 4.1 dargestellt. Ein beispielhaftes Bauteil bestehe aus einem Laminat mit Länge  $L_{lam}$  und Breite  $B_{lam}$  von  $500\text{ mm}$ . Für eine Höhe  $H_{lam} = 2\text{ mm}$ , entsprechend einer Lagenanzahl  $N_L = 10$ , ergibt sich ein Volumen von  $V_{lam} = 500\text{ cm}^3$  und eine Masse von  $m_{lam} = 0,82\text{ kg}$ . Die prozesstechnisch hergestellten Ausgangsmaterialien liegen als Faseroving bzw. als Thermoplast-Granulat vor. Bei einem Faservolumengehalt von  $\varphi_f = 50\%$  sind ca.  $500\text{ g}$  Granulat für ein Laminat notwendig. Bei der Verwendung eines  $24\text{ k}$  Rovings ist eine Länge von  $200\text{ m}$  erforderlich. Daraus entsteht in der Prozesskette eine Anzahl  $N_f = 10^7$  von einzelnen Filamenten, die im Laminatquerschnitt vorliegen. Daher finden in der betrachteten Prozesskette zunächst einzelne textile bzw. kunststofftechnische Vorprozesse statt, bevor die beiden Materialströme zusammengeführt werden. Der entsprechende Prozessschritt, bei dem der Verbundwerkstoff entsteht, ist das Imprägnieren.



**Bild 4.1:** Abstrahierte Betrachtung der Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Hybridbauteilen  
*Process routes for manufacturing of hybrid thermoplastic composites*

**Flexibilität von Prozessketten**

Aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich des Supply Chain Management befasst sich damit, dass neben reinen Skaleneffekten der Massenproduktion zunehmend weitere Differenzierungsmerkmale wie Flexibilität und Individualisierung eine stärkere Rolle spielen. Daraus leiten sich Anforderungen an Agilität sowie kurze Vorlaufzeiten ab. Neben den klassischen Produktionsmanagement-Philosophien *Make to order* oder *Make to stock* lassen sich insbesondere in mehrstufigen Wertschöpfungsketten verschiedene, je nach Anwendungsfall optimierte Produktionsstrategien ermitteln. WIKNER hat dazu ein Rahmenmodell entwickelt, das auf multiplen Entkopplungspunkten (engl.: Customer order decouple point) basiert. [WIKN14]

Der Entkopplungspunkt bezeichnet dabei den Punkt im Materialfluss, ab dem ein (Zwischen-) Produkt eindeutig einem Kunden bzw. Auftrag zugewiesen werden kann [OLHA12, S. 37]. Generell können Entkopplungspunkte ebenfalls bei Zulieferern in der Wertschöpfungskette liegen. Um eine schlanke, kosteneffiziente Produktion mit der Strategie einer hohen Flexibilität bzw. Anpassbarkeit kombinieren zu können, müssen verschiedene Bereiche in der Lieferkette entkoppelt werden. Beim Auslegen von entsprechenden Produktionsketten ist daher darauf zu achten, dass vor dem Entkopplungspunkt eine auf Skaleneffekte basierte Produktion vorliegt. Im weiteren Verlauf zum Endkunden können eine Flexibilität und Differenzierung bzw. eine Individualisierung in den Vordergrund rücken. Im Sinne dieses Modells ist es daher ratsam, den Materialfluss entsprechend zu gestalten und für die verschiedenen Schritte der Lieferkette unterschiedliche Strategien anzuwenden. So sollten beispielsweise für die kosteneffiziente Produktion standardisierte Zwischenprodukte verwendet werden, die sich in späteren Prozessschritten zu individuellen Produkten verarbeiten lassen. [OLHA12]

Bezogen auf die heterogenen Anforderungen an die einzelnen Prozessschritte der FVK-Fertigung wird deutlich, dass für eine industrielle Produktion die gezielte Auswahl von Zwischenprodukten bzw. Halbzeugen entscheidend ist. In Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.3 sind die mikro- und makromechanischen Besonderheiten von schichtweise aufgebauten FVK und die resultierenden Anforderungen an Verarbeitungsverfahren zusammengefasst. Die Betrachtung des Materialflusses des in Bild 4.1 dargestellten Beispiels verdeutlicht die hohe Zahl an möglichen Prozesskombination.

Das Modell der Entkopplungspunkte lässt sich anhand verschiedener Zwischenhalbzeuge, die noch nicht einem finalen Bauteil zuordenbar sind, verdeutlichen. So können die Ausgangsstoffe zu verschiedenen Halbzeugen, beispielsweise textilen Geweben oder Polymerfolien, verarbeitet werden. Der Prozessschritt des Imprägnierens besitzt insofern eine wichtige Rolle, als dass in diesem Schritt die beiden Materialströme Faser und Kunststoff zusammengeführt werden. Bei der Verwendung von Prepregs, wie z. B. thermoplastischen Tapes, findet der Imprägnierprozess vor der Bauteilherstellung statt. Aus Sicht des Supply Chain Managements kann somit ein Entkopplungspunkt nach dem Imprägnieren bzw. der Herstellung des Verbundwerkstoffs gelegt werden, wodurch diese von der Bauteilherstellung getrennt wird.

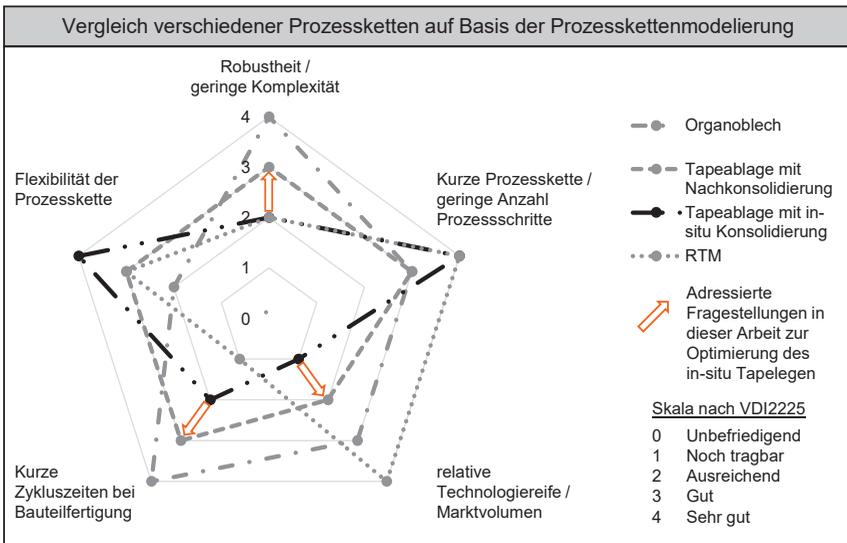
Als Beispiel einer stark prozesstechnisch dominierten Fertigung sind hingegen die Harzinfiltrationsprozesse zu nennen. Im RTM-Verfahren wird das Harz erst im Mischkopf des Werkzeugs zur diskreten Bauteilfertigung mit dem Härter vermischt. Durch die damit beginnende chemische Reaktion entsteht die polymere Matrix somit erst im Bauteil selbst. Die Prozesstechnik reicht bis in den Bauteilfertigungsprozess hinein. Die damit verbundenen juristischen Haftungsfragen führen zu hohen Anforderungen an die Qualitätssicherung und zerstörungsfreie Prüfung. [EICK13, S. 23]

Auch die Verstärkungsfasern lassen sich in verschiedener Weise verarbeiten. Herkömmliche Preformingverfahren, die auf textilen Geweben und Gelegen basieren, sind für einen Großteil der Fertigungskosten von FVK verantwortlich [MARQ17, S. 8]. Andere Verfahren reduzieren die Anzahl der textilen Vorprozesse deutlich, was zu einer kürzeren Prozesskette führt. Als Beispiel sei hier das dreidimensionale Fasersprühen zu nennen, bei dem die Fasern direkt in die Werkzeugform eingebracht werden [FECH17]. Je kürzer die Prozesskette ist, desto mehr steigt die Komplexität der verbleibenden Prozessschritte an. Die Funktionen Imprägnieren, Konsolidieren, Formgebung und Materialaushärtung finden teils in einem kombinierten Schritt bzw. in der Werkzeugform statt. Dies kann zu langen Zykluszeiten und einer verringerten Robustheit führen.

Im Falle der vermehrt als Halbzeug eingesetzten Organobleche findet die Imprägnierung und Konsolidierung früh innerhalb der Wertschöpfungskette statt. Danach liegt ein Halbzeug vor, das bereits einen definierten Laminataufbau enthält und nur noch fertigungstechnisch in diskreten Prozessen umgeformt und bearbeitet werden muss [SCHÄ15]. Da jedoch Laminataufbau und -dicke bereits festgelegt sind, ist die Flexibilität eingeschränkt. Die Orientierung des Laminats lässt sich nur noch über das Aus-

schneiden kleinerer Laminats aus einem großen Halbzeug variieren, was mit Verschnitt verbunden ist. Wenn jedoch bauteilspezifische, belastungsoptimierte Laminat-Halbzeuge hergestellt werden, z. B. in diskontinuierlichen Pressverfahren, liegt der Entkopplungspunkt sehr weit vorne, d. h. nahe der Ausgangswerkstoffe, in der Prozesskette.

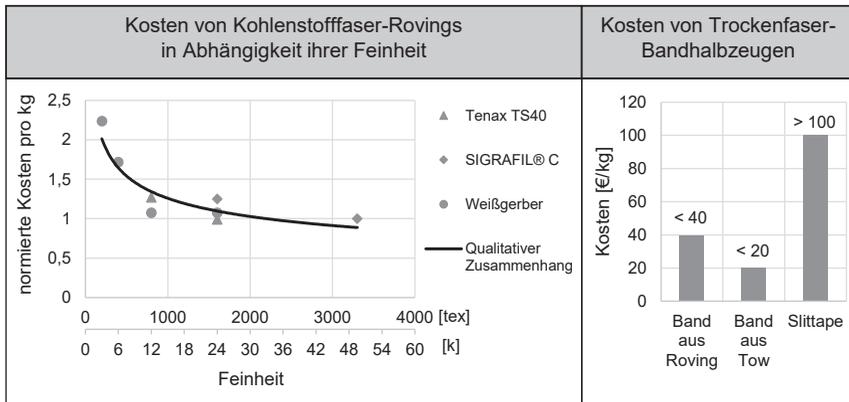
Die hier diskutierten Prozessketten und Halbzeuge sind in Bild 4.2 vergleichend dargestellt. Die Bewertung erfolgt dabei in Anlehnung an die Punktwertskala der VDI 2225 [VDI 98]. Es zeigt sich, dass die Verwendung von thermoplastischen Tapes ein großes Potenzial bzgl. der Flexibilität bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit bietet. Die Imprägnierung findet auf der Ebene der Einzelschichten statt, sodass in späteren Schritten die bauteilspezifische Fertigung eines mehrlagigen Laminats folgen kann. Durch die Entkopplung von der Bauteilfertigung lassen sich bei der Materialherstellung Skaleneffekte ausnutzen. Die Tapeablage mit in-situ Konsolidierung bietet in der Laminatfertigung die Möglichkeit, die Anzahl der Prozessschritte zu verringern und die Prozessflexibilität zu steigern. Es besteht aber noch Forschungsbedarf, um die Qualität und Zuverlässigkeit der in-situ Konsolidierung zu erhöhen bzw. die Prozesskomplexität zu reduzieren. Des Weiteren sind Produktivitätssteigerungen notwendig, um wettbewerbsfähige Zykluszeiten auf dem Niveau der bestehenden Verfahren für Thermoplast-FVK zu erreichen. Deshalb werden in Kapitel 4.2 die physikalischen Effekte der einzelnen Prozessschritte analysiert und modelliert, um entsprechende Steigerungspotenziale identifizieren und technisch umsetzen zu können. Dadurch lässt sich die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen, was die Grundlage für eine gesteigerte Marktdurchdringung des Tapelegens mit in-situ Konsolidierung bildet.



**Bild 4.2:** Vergleich verschiedener Prozessketten zur Herstellung von FVK-Bauteilen  
*Comparison of different process routes for composite manufacturing*

## Resultierende Kosten verschiedener Prozessketten

Aus der Prozesskettenbetrachtung ergibt sich, dass die Wahl der Halbzeug- und Zwischenprodukte die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflusst. Ein Beispiel für den Einfluss der Halbzeugbeschaffenheit ist der ansonsten in dieser Arbeit nicht weiter betrachtete Faserherstellungsprozess. In diesem Produktionsschritt bzw. bei der Herstellung der Prekusoren werden die einzelnen Filamente nach dem Spinnen zu Strängen bzw. unverdrehten Rovings zusammengefasst. Diese bilden in dem in Bild 4.1 gezeigten Beispiel die kleinste beeinflussbare Einheit als Faserhalbzeug. Die Feinheit dieser textilen Halbzeuge wird in  $\text{tex}$  bzw.  $k$  angegeben und reicht typischer Weise bei Kohlenstoffasern von unter  $3 k$  bis über  $50 k$ . Obwohl die einzelnen Filamente teils die gleichen Eigenschaften besitzen, kann die Feinheit starken Einfluss auf die Kosten und Bauteileigenschaften besitzen. In Bild 4.3 sind die massenspezifischen Kosten für verschiedene Roving-Feinheiten und entsprechende Trockenfaser-Halbzeuge dargestellt. Da die absoluten Kosten stark von dem Fasertyp und der Abnahmemenge abhängen, sind die Kosten auf den Preis von  $1 \text{ kg}$  Kohlenstofffaser-Roving der Feinheit  $50 k$  normiert. Es ist ersichtlich, dass die Beschaffungskosten für Kohlenstoffasern in Form von *Heavy Tows* weniger als die Hälfte der Kosten von feinen Rovings mit beispielsweise  $3 k$  Filamenten beträgt.



**Bild 4.3:** Kosten von Kohlenstofffaser-Halbzeugen in Abhängigkeit ihrer Feinheit; Datenquellen: [R&G 17; WEIß17; MARQ17, S. 14]

*Costs of carbon fiber materials depending on their linear density*

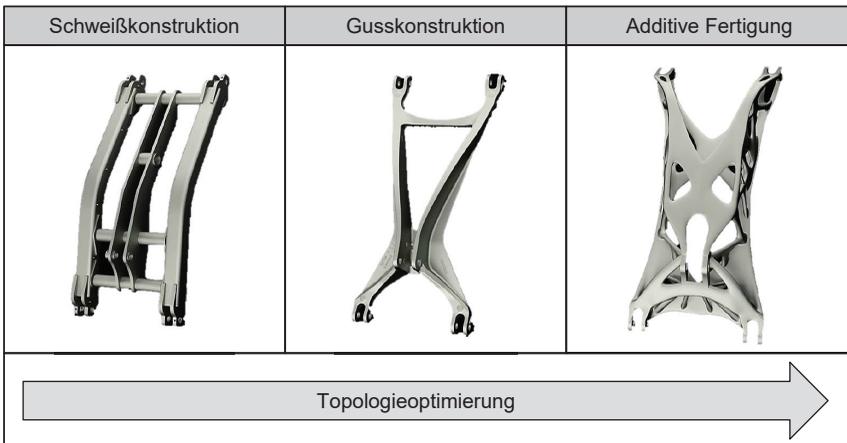
### 4.1.2 Additive Fertigung im Leichtbau

*Additive manufacturing for lightweight production*

Bei additiven Fertigungsverfahren handelt es sich um Prozesse, bei denen das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird. Zu den bekannten Prozessen zählen die pulverbasierten Verfahren SLM (engl.: Selective Laser Melting) und SLS (Selektives Lasersintern) oder das Extrusionsverfahren FDM (engl.: Fused Deposition Mo-

delling) [VDI14]. Neben der Möglichkeit, Bauteile in geringen Stückzahlen ohne notwendige Werkzeugformen wirtschaftlich zu fertigen, besteht ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung in der Fertigbarkeit komplexer Geometrien. Additive Verfahren bieten die Möglichkeit, topologieoptimierte Leichtbaustrukturen zu fertigen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht oder nur sehr kostenintensiv herstellbar sind. Oft werden diese Konstruktionen als *bionisches Design* bezeichnet. So lassen sich bei Kraffteinleitungselementen, die in Flugzeugkabinen zum Einsatz kommen, bis zu 41 % Gewicht durch Topologieoptimierung und additive Fertigung bei gleichem Konstruktionswerkstoff einsparen. [EMME11]

Für isotrope Materialien, insbesondere Metalle, erlauben moderne FEM-Softwarepakete einfache Topologieoptimierungen und zuverlässige Eigenschaftsvorhersagen. Beispielhaft ist in Bild 4.4 die gewichtsoptimierte Konstruktion eines Fahrzeug-Strukturbauteils unter Verwendung einer Topologieoptimierung und additiver Fertigung dargestellt. Jedoch spielen bei der additiven Fertigung noch ungelöste Fragen der Qualitätssicherung eine Rolle, da Lunker und Materialeinschlüsse entstehen und entsprechende Qualitätssicherungskonzepte für eine Serienproduktion noch entwickelt werden müssen. [BABE17]



**Bild 4.4:** Änderung der Konstruktion mittels Topologieoptimierung bei Verwendung von urformenden und additiven Fertigungsverfahren, vgl. [BABE17]

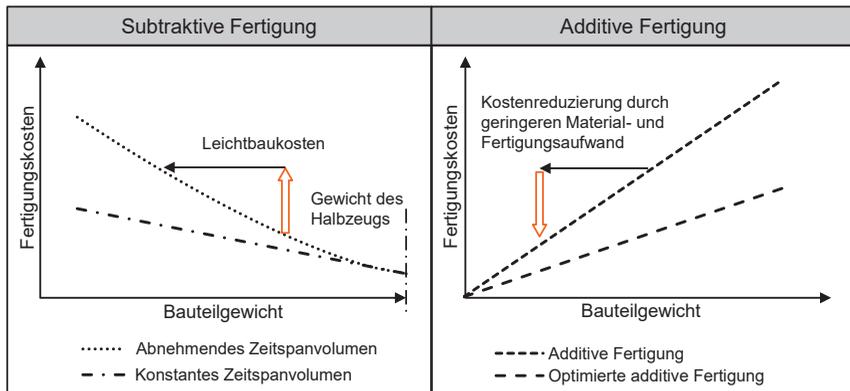
*Optimized lightweight design for casting processes and additive manufacturing*

Bei subtraktiven Fertigungsverfahren verbleibt häufig nur ein kleiner Teil des Halbzeugmaterials im fertigen Bauteil. So beträgt der Zerspananteil in Luftfahrtbauteilen in Integralbauweise bis zu 95 %. Der Zerspanprozess bestimmt damit wesentlich die Produktionskosten. [DENK15]

Zusätzlich lassen sich komplexere Geometrien nicht oder nur schwer herstellen. Deshalb sinkt bei komplexen Geometrien das realisierbare Zeitspanvolumen und die Produktionszeit steigt überproportional an. Im Gegensatz dazu ist bei additiv gefertigten Bauteilen der Zusammenhang zwischen Bauteilgewicht und Fertigungsdauer bzw.

Produktionskosten unter Vernachlässigung von Rüst- und Nebenzeiten linear. Die Komplexität der Geometrie hat zudem keinen Einfluss auf die Bauteilkosten. Bauteil- und Fertigungskosten sind damit proportional vom Bauteilgewicht abhängig. [POPR15, S. 51]

Übertragen auf den Leichtbau lässt sich daraus ableiten, dass die gewichtsbezogenen Grenzproduktionskosten von subtraktiven Verfahren positiv und von additiven Verfahren negativ sind. Das Gewicht einer bestehenden Bauteilkonstruktion zu reduzieren führt im Falle der additiven Fertigung zu geringeren Material- und Herstellungskosten. Daher liegt bei der additiven Fertigung ein endogener Effekt vor, der im Sinne von Produktionskosteneinsparungen zu leichteren Bauteilen führt. Dieser Effekt ist modellhaft in Bild 4.5 dargestellt. Jedoch ist hier darauf hinzuweisen, dass das allgemeine Kostenniveau der additiven Fertigung für die meisten Anwendungen über dem Kostenniveau der subtraktiven Fertigung liegt. Insbesondere die Produktivität der additiven Fertigungsverfahren gilt es zu optimieren [BAUM16].



**Bild 4.5:** Endogener Leichtbaueffekt bei additiver Fertigung: gewichtsbezogene Grenzkosten bei additiver und subtraktiver Fertigung

*Endogenous effect of lightweight production by use of additive manufacturing*

Die Verarbeitung von FVK stellt insofern eine Besonderheit dar, dass sowohl additive als auch subtraktive Verfahren für die einzelnen Prozessschritte verwendet werden. Im Preforming werden zunächst die einzelnen Sub-Preforms aus den textilen Halbzeugen ausgeschnitten und dann schichtweise zusammengefügt. Dabei entsteht Verschnitt, der insbesondere bei den teuren Kohlenstofffasern zu vermeiden ist. Zusätzlich ist bei FVK die Anisotropie des Werkstoffs zu beachten. Zum einen müssen daher die entsprechenden Nesting-Algorithmen, z. B. bei der Verarbeitung von Organoblechen, neben der reinen Verschnittminimierung ebenfalls die Faserorientierung berücksichtigen. Zum anderen muss auch beim schichtweisen Aufbau, z. B. im AFP-Verfahren, die Ablegerichtung beachtet werden.

Die in Kapitel 2.4 dargestellten Verfahren zur Fertigung von thermoplastischen Hybridbauteilen stellen eine Kombination von FVK und im Spritzguss urformend gefertigten Funktions- und Rippenstrukturen dar. Die im Spritzguss fertigmöglichen Geometrien sind deutlich komplexer als die im FVK realisierbaren Geometrien. Jedoch sind auch dem Spritzguss durch Anforderungen an Mindestwandstärken, Verzug und Hinterschneidungen geometrische Grenzen gesetzt, sodass auch für die Thermoplastkomponente durch den Einsatz von SLS- oder FDM-Verfahren Material eingespart werden kann. Die additiven Verfahren bergen damit großes Leichtbaupotenzial und können somit einen wesentlichen Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz beitragen [HUAN16]. Jedoch sind sie wirtschaftlich in vielen Fällen noch nicht wettbewerbsfähig. Die Bewertung der Produktivität und Fertigungskosten ist damit eine zentrale Frage, die nachfolgend genauer ausgeführt werden soll.

### 4.1.3 Bewertungskriterien für die Leichtbauproduktivität

*Key figures for the evaluation of lightweight production*

Für die Bewertung der Materialeigenschaften haben sich leichtbauspezifische Kennzahlen etabliert. Diese setzen meist eine Materialgröße, wie z. B. die Festigkeit, ins Verhältnis zur Materialdichte. Die Kennzahlen lassen sich in speziellen Diagrammen, bspw. nach ASHBY, gegenüberstellen, um eine schnelle Werkstoffauswahl zu ermöglichen [ASHB93]. Neben reinen Materialkennzahlen lässt sich auch die Bauteilgeometrie durch Einbeziehung der entsprechenden Konstruktionswerte, wie z. B. dem Flächenträgheitsmoment, berücksichtigen. Im automobilen Leichtbau haben sich spezielle Kennzahlen wie die Leichtbaugüte hinsichtlich der Torsionssteifigkeit einer Karosserie sowie für allgemeine Schub-, Knick- und Biegesteifigkeiten, etabliert. [FRIE13, S. 62–70; KLEI13, S. 23–37]

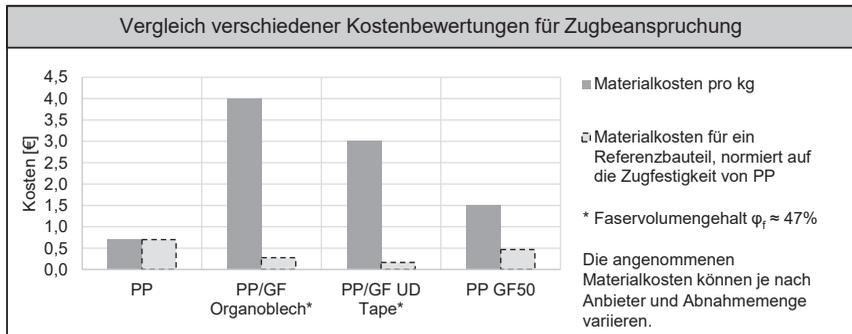
Diesen leichtbauspezifischen Material- und Konstruktionskennzahlen steht die klassische Bewertung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit gegenüber. Wirtschaftliche Aspekte werden heutzutage in massenbezogenen Größen quantifiziert, wie z. B. Materialausbringung in  $[kg/h]$  bzw. Materialpreis in  $[€/kg]$ . Dies widerspricht dem Leichtbauprinzip einer lokalen Belastungsoptimierung, da sowohl die spezifischen Materialeigenschaften als auch die erreichbare Geometriekomplexität vernachlässigt werden. Somit erhalten kontinuierliche, unflexible Fertigungsverfahren aus kostengünstigen, aber schweren Werkstoffen, eine positivere Bewertung.

Andere Kennwerte sind somit notwendig, um Prozessketten für Leichtbauwerkstoffe objektiv bewerten zu können. Diese dürfen nicht mehr auf einer massen- oder gewichtsspezifischen dominierten Bewertung beruhen, sondern müssen die Funktionalität des Bauteils abbilden. Dazu zählen insbesondere Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen. Je nach vorliegender Materialsteifigkeit und Festigkeit, gekennzeichnet z. B. durch den Elastizitätsmodul  $E$  bzw. die Zugfestigkeit  $R$ , ist dafür ein bestimmtes Materialvolumen notwendig. Für die genannten FVK-Verarbeitungsverfahren ist die Dichte des Werkstoffs als konstant anzusehen. Daher sollen in dieser Arbeit die in Tabelle 4.1 empfohlenen volumetrischen Kennzahlen zur Bewertung der betrachteten Prozesskette, vgl. Kapitel 7, herangezogen werden.

**Tabelle 4.1:** Leichtbauspezifische Produktionskennzahlen*Key figures for evaluation of productivity of lightweight production*

	Herkömmliche Bewertung	Empfohlene, leichtbau-gerechte Bewertung
Produktivität (Steifigkeit-dominiertes Bauteil)	$\frac{\rho V}{t} \text{ in } \left[ \frac{kg}{h} \right]$	$E \cdot \frac{V}{t} \text{ in } \left[ \frac{N}{mm^2} \frac{m^3}{h} \right]$
Produktivität (Festigkeit-dominiertes Bauteil)	$\frac{\rho V}{t} \text{ in } \left[ \frac{kg}{h} \right]$	$R \cdot \frac{V}{t} \text{ in } \left[ \frac{N}{mm^2} \frac{m^3}{h} \right]$
Materialkosten (Steifigkeit-dominiertes Bauteil)	$\frac{\text{Kosten}}{\rho V} \text{ in } \left[ \frac{\text{€}}{kg} \right]$	$\frac{\text{Kosten}}{E \cdot V} \text{ in } \left[ \frac{\text{€}}{\frac{N}{mm^2} \cdot m^3} \right]$
Materialkosten (Festigkeit-dominiertes Bauteil:)	$\frac{\text{Kosten}}{\rho V} \text{ in } \left[ \frac{\text{€}}{kg} \right]$	$\frac{\text{Kosten}}{R \cdot V} \text{ in } \left[ \frac{\text{€}}{\frac{N}{mm^2} \cdot m^3} \right]$

Für einen effizienten Materialeinsatz von FVK ist die Ausnutzung der anisotropen Werkstoffeigenschaften anzustreben. Beim Vergleich von nicht- oder kurzfaserverstärktem Kunststoff, Organoblech und unidirektionalem Tape werden die Unterschiede besonders deutlich. Während der reine Matrixwerkstoff bei herkömmlichen Bewertungen hinsichtlich der Produktivität am besten abschneidet, lassen sich im Vergleich dazu mit höherwertigen Werkstoffen wie FVK je nach vorliegendem Belastungsfall günstigere Konstruktionen realisieren. In Bild 4.6 ist dies am Beispiel von PP/GF unter der Berücksichtigung der Zugbeanspruchung dargestellt. Während der Materialpreis in  $[\text{€/kg}]$  für das unverstärkte Polymer am günstigsten ist, ist der Bauteilpreis bei gleicher Zugfestigkeit für unidirektionale Tapes am geringsten.

**Bild 4.6:** Vergleich verschiedener Kostenbewertungen für ein Bauteil unter Zugbeanspruchung; Datenquellen: Tabelle 2.2 und [SCHI16]*Influence of cost figures for comparison of lightweight materials*

Auch die Verwendung von kurzfaserverstärkten Spritzgussmassen bei belasteten Bauteilen bietet ein Kosteneinsparungspotenzial. Etablierte Beispiele für den Einsatz von FVK zur Kostensenkung sind Bauteile mit gut definiertem Belastungsfall. Hier sind insbesondere große Rohrleitungen aus glasfaserverstärkten UP-Harzen zu nennen [HORL16].

Die vorliegenden allgemeingültigen Kenngrößen ermöglichen eine Bewertung von FVK-Prozessketten. Um jedoch die erforderlichen Bauteilkosten quantifizieren zu können, ist eine Prozesskostenbetrachtung notwendig. Bisher sind dazu nur bauteil- und materialspezifische Untersuchungen verfügbar, bspw. für Rotorblätter oder Luftfahrt-Lamine, vgl. [MERE15], [SCHU12b], [BADE02]. Eine generelle Analyse der gesamten Prozesskette, insbesondere für thermoplastische Tapes, die für alle einzelnen Schritte übergeordnete Prozessgrößen wie z. B. Imprägnier- und Ablegezeit, Verschnitt, Prozessstabilität, Ausschuss, etc. berücksichtigt, ist nicht bekannt. Eine Modellierung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich dieser Kriterien folgt deshalb in Kapitel 4.2.

## 4.2 Modellierung der einzelnen Prozessschritte

### *Modelling of single process steps*

Die einzelnen Prozesse zur Verarbeitung von FVK und deren Kombination haben starken Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass thermoplastische UD-Tapes eine vielversprechende Möglichkeit darstellen, eine hohe Flexibilität in der Bauteilfertigung bei gleichzeitiger Ausnutzung von Skaleneffekten in der Materialherstellung zu gewährleisten. Auch innerhalb dieser Halbzeugart lassen sich viele Eigenschaften variieren, z. B. Dicke und Breite, Faservolumengehalt sowie Faser- und Matrixmaterial. Um eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Prozesskette zu ermöglichen und optimale Lösungen zu ermitteln, ist es folglich notwendig, die einzelnen Prozessschritte durch Modelle abzubilden.

Im Folgenden werden die Prozessschritte zur Herstellung von Thermoplast-Laminaten aus unidirektionalen Tapes auf Basis der ihnen zugrundeliegenden physikalischen Prozesse modelliert. Dies sind die Schritte *Imprägnieren* des Faserhalbzeugs, *Drapieren* bzw. *Ablegen*, *Konsolidieren* sowie *Thermoformen*. Die Modelle lassen sich auch für andere Verfahrensvarianten anwenden, da diese meist auf den gleichen physikalischen Effekten beruhen. Die einzelnen Prozessbeschreibungen werden anschließend, s. Kapitel 4.3, zu einem Modell zusammengefügt, das die gesamte Prozesskette umfasst und eine globale Optimierung mittels Verknüpfung der Einzelschritte ermöglicht.

### 4.2.1 Imprägnieren

#### *Impregnation*

Wie in Kapitel 2.3.1 und 4.1 beschrieben kommt dem Imprägnieren eine wesentliche Bedeutung zu, weil in diesem Prozessschritt die beiden Phasen des Faserverbundwerkstoffes zusammengeführt werden. Für die hier betrachteten Thermoplaste ist dieser Schritt besonders herausfordernd, da die Schmelzviskosität sehr hoch ist. Bereits

aus dem Gesetz von DARCY, welches den Fließvorgang in idealen porösen Körpern beschreibt, Formel 2.1, ist ersichtlich, dass die Fließgeschwindigkeit  $u_z$  maßgeblich von der Viskosität  $\eta$  abhängt. Aufbauend auf diesem Gesetz lassen sich verschiedene Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens der Matrix ableiten. Zusätzlich wird der Imprägniervorgang wesentlich von der notwendigen Temperierung des Materials bestimmt, da das Imprägnieren einen schmelzflüssigen Zustand der Matrix voraussetzt.

### Fließvorgang

Der Fließvorgang ist von den Materialeigenschaften des textilen Halbzeugs und des Matrixpolymers abhängig. Wenn man das textile Halbzeug als ein homogenes, ideal steifes, poröses Gebilde annimmt, lassen sich die Fließeingenschaft bestimmenden Größen des Faserhalbzeuges zu einem konstanten Parameter, der Permeabilität  $K_P$ , zusammenfassen. Der entsprechende Fließvorgang wird durch einen extern aufgetragten Druckgradienten  $\Delta p$  initiiert. Dieser wird z. B. durch einen Extrusionsprozess, durch sich verjüngende Werkzeugkavitäten oder durch Walzen bzw. Kalandrierer erzeugt.

Das Gesetz von DARCY lässt sich für den Imprägniervorgang unter den Bedingungen anwenden, dass die Schmelze als Newtonsches Fluid mit Viskosität  $\eta$  und das Textil als ideal steif und homogen idealisiert wird [SCHÖ13, S. 90]. Durch Integration der Formel 2.1 ergibt sich eine Imprägnierdauer  $t_{imp}$  bei einer Länge des Fließweges  $l_{imp}$  von:

$$t_{imp} = \frac{\eta l_{imp}^2}{2 K_P \Delta p} \quad (4.1)$$

Nach [GAYM98] lässt sich daraus für den Fall der einseitigen Imprägnierung eines Faserhalbzeuges mit Dicke  $H_i$  der Imprägniergrad  $D_{imp}$  nach der Zeit  $t$  bestimmen zu:

$$D_{imp} = \frac{l_{imp}}{H_i} = \sqrt{\frac{2 K_P \Delta p t}{\eta H_i^2}} \quad (4.2)$$

Für den Imprägniervorgang gibt es zahlreiche Abschätzungen der Permeabilität  $K_P$ . Ausgehend von einer idealisierten Schlitzströmung gibt SCHÖLDGEN [SCHÖ13, S. 92] die Permeabilität  $K_P$  in Abhängigkeit des Faserdurchmessers  $r_f$  und Faservolumengehalts  $\varphi_f$  an zu:

$$K_{P,Sch} = \frac{r_f^2}{12} \left( 2 - \sqrt{\frac{\pi}{\varphi_f}} \right)^2 \quad (4.3)$$

Bei unidirektionalen Laminaten ist der Faserdurchmesser die bestimmende geometrische Größe. Bei Organoblechen aus Gewebe ist zusätzlich der Rovingdurchmesser entscheidend. Die Porosität von Geweben ist im Regelfalle größer als die Porosität der unidirektionalen Einzelschicht. Die Fließgeschwindigkeit  $u_z$  zwischen den Rovings ist

größer als im Faserbündel selbst, sodass die Zwischenräume im Gewebe zuerst imprägniert werden [BINE15, S. 135]. Daher lässt sich zwischen Mikro- und Makro-Imprägnierung unterscheiden [SCHÖ13, S. 92].

In der Literatur existieren weitere Modelle zur Beschreibung der Permeabilität von textilen Halbzeugen. So bestimmt GEBART [GEBA92] für den Fall einer hexagonalen Faseranordnung die Permeabilität  $K_{P,hex}$  zu

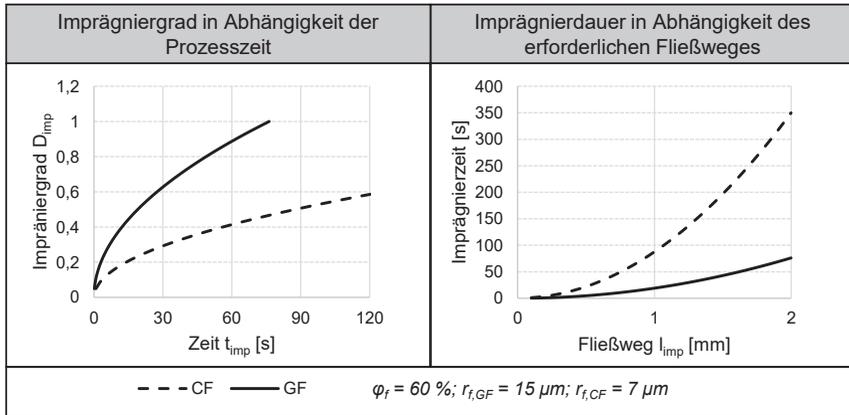
$$K_{P,hex} = \frac{16 r_f^2}{9\pi\sqrt{6}} \left( \sqrt{\frac{\varphi_{f,max}}{\varphi_f}} - 1 \right)^{\frac{5}{2}} \quad (4.4)$$

mit dem maximalen Faservolumengehalt  $\varphi_{f,max}$  der hexagonalen Packung von:

$$\varphi_{f,max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

Damit wird deutlich, dass der quadratisch eingehende Faserdurchmesser  $r_f$  wesentlich die Imprägniergeschwindigkeit beeinflusst. Zusätzlich ist ersichtlich, dass mit hohem Faservolumengehalt die Permeabilität abnimmt. Um bei gegebener Permeabilität des textilen Halbzeugs die Imprägnierdauer zu reduzieren, kann der Fließweg verringert werden. Dies geschieht z. B. durch Verwendung von Pulververfahren, Suspensions- und Lösungsbädern oder comingelten Hybridgarnen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Druckgradienten zu erhöhen oder die Viskosität zu reduzieren, z. B. durch die Wahl eines geeigneten Polymers bzw. durch Erhöhung der Schergeschwindigkeit. Für verschiedene Verfahren existieren zahlreiche Modelle und Untersuchungen, die weitere Parameter mit einbeziehen und hier nicht weiter behandelt werden sollen. [CHRI14; SCHÖ13; BERN99; BATE99; LEE87]

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Materialparameter zu untersuchen, werden die Imprägnierverhalten von unidirektionalen Laminaten aus GFK und CFK miteinander verglichen. Dazu wird das Modell aus Formel 4.2 mit der Permeabilität aus Formel 4.4 herangezogen. Der erreichbare Imprägniergrad  $D_{imp}$  sowie die Imprägnierzeit  $t_{imp}$  ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die notwendige Imprägnierzeit  $t_{imp}$  für ein 0,2 mm dickes Laminat beträgt für Kohlenstofffasern 3,5 s. Der größere Durchmesser von Glasfaser führt ceteris paribus zu einer geringeren Imprägnierzeit von  $t_{imp} = 0,76$  s. Bei einer Laminatdicke von 2 mm beträgt die Imprägnierzeit bereits  $t_{imp}^{GFK} = 76$  s bzw.  $t_{imp}^{CFK} = 350$  s. Der Unterschied ist auch hier alleine in dem unterschiedlichen Faserdurchmesser begründet. In der Realität werden daher unidirektionale Laminat entweder in dünnen Schichten hergestellt oder es werden die zuvor genannten Verfahren angewendet, bei denen die Kunststoffmatrix vorab im Faserhalbzeug verteilt wird.



**Bild 4.7:** Vergleich der Imprägnierprozesse von GFK und CFK  
*Comparison of the impregnation process of CFRP and GFRP*

### Temperierung

Der zuvor beschriebene Imprägniervorgang setzt einen flüssigen Zustand des Matrixmaterials voraus, sodass er bei Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur  $T_m$  stattfindet. Die gewählten Aufheiz- und Abkühlraten beeinflussen neben der notwendigen Prozesszeit auch die Materialeigenschaften, wie z. B. den Kristallisationsgrad. Zusätzlich sollte eine möglichst homogene Temperaturverteilung vorliegen, um negative Effekte wie Eigenspannungen bzw. Bauteilverzug zu verhindern.

Die instationäre Wärmeübertragung führt bereits unter vereinfachten Annahmen zu komplexen Modellen. Im Folgenden soll daher das Temperierverhalten des ebenen Laminats unter Vernachlässigung von Randeffekten beschrieben werden. Das Aufheiz- und Abkühlverhalten einer ebenen Platte durch Konvektion ist in der Literatur hinreichend beschrieben [SPEC08, S. 701–731]. Das Verhalten wird wesentlich vom Verhältnis des Wärmeübergangs zum Fluid zur Wärmeleitung innerhalb des festen Körpers bestimmt. Dieses wird durch die dimensionslose Biot-Zahl  $Bi$  ausgedrückt, welche als Parameter den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , die Wandstärke  $H_i$ , und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  besitzt. Die Biot-Zahl ist definiert als:

$$Bi = \frac{\alpha H_i}{2\lambda} \quad (4.6)$$

Bei Körpern, in denen die Wärmeleitung dominiert, können örtliche Temperaturdifferenzen vernachlässigt werden. Man spricht von *thermisch dünnen* Körpern. Diese Abschätzung ist für  $Bi < 0,1$  gültig. Für größere Werte der Biot-Zahl laufen die Wärmeleitungsvorgänge verhältnismäßig langsam ab, sodass sich Temperaturgradienten in Dickenrichtung einstellen, die nicht zu vernachlässigen sind. [SPEC08, S. 701]

Für thermisch dünne Platten, d. h.  $Bi \rightarrow 0$ , mit spezifischer Wärmekapazität  $c_p$  lässt sich die benötigte Temperierzeit von der Ausgangstemperatur  $T_0$  auf die Zieltemperatur  $T$  bei Umgebungstemperatur  $T_\infty$  ermitteln als

$$t_{Bi,0} = \frac{c_p \rho}{\alpha} \frac{H_i}{2} \ln \left( \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \right) \quad (4.7)$$

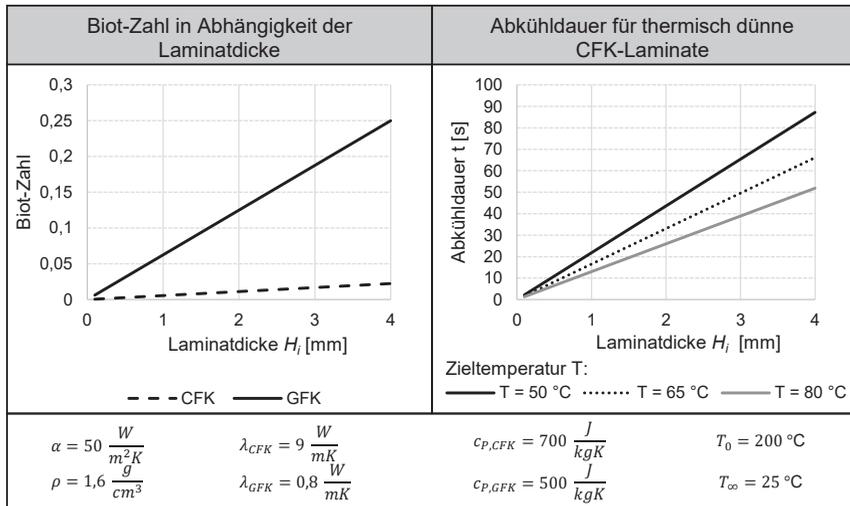
Die Temperierdauer ist somit proportional zur Laminatdicke  $H_i$ . Für sehr dicke Platten, also  $Bi \rightarrow \infty$  ergibt sich hingegen ein quadratischer Zusammenhang zwischen der benötigten Temperierzeit von der Laminatdicke  $H_i$ :

$$t_{Bi,\infty} = \frac{4}{\pi^2} \frac{c_p \rho}{\lambda} \left( \frac{H_i}{2} \right)^2 \ln \left( \frac{8}{\pi} \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \right) \quad (4.8)$$

Zu beachten ist, dass im Fall der thermisch dünnen Platte die Wärmeleitung  $\lambda$  keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit hat. Die Zieltemperatur  $T$  beschreibt im Falle der thermisch dicken Platte die Kerntemperatur. Aufgrund der langsamen Wärmeleitungsvorgänge bildet sich ein thermisches Profil aus, sodass die Oberflächentemperatur deutlich von der Kerntemperatur abweichen kann. WEILER hat die sich einstellenden Temperaturgradienten in Abhängigkeit der Ablegegeschwindigkeit und Erwärmungsdauer für den Tapelegeprozess betrachtet [WEIL17].

Da sich die thermischen Eigenschaften von CFK und GFK deutlich unterscheiden, wird die Wärmeübertragung für beide Materialien untersucht. Dazu wird zunächst die  $Bi_{OT}$ -Zahl berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.8 links dargestellt. Es zeigt sich, dass für CFK die  $Bi_{OT}$ -Zahl  $Bi$  für typische Laminatdicken von  $H_i < 4 \text{ mm}$  aufgrund der hohen Wärmeleitung deutlich unter  $Bi < 0,1$  liegen. Für GFK hingegen liegt die Grenze von  $Bi < 0,1$  bei  $H_i \approx 1,5 \text{ mm}$ , sodass viele GFK-Lamine nicht mehr als thermisch dünn betrachtet werden können.

Die Abkühldauer von thermisch dünnen Laminaten ist nach Formel 4.7 proportional zur Laminatdicke. Abbildung 4.8 rechts zeigt entsprechend die Ergebnisse für ein CFK-Laminat und einer erzwungenen Konvektion mit hohem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ . Während für Lamine mit Dicken von  $4 \text{ mm}$  die Abkühlzeit bis zu  $90 \text{ s}$  beträgt, ist die Abkühlzeit eines dünnen Tapes deutlich geringer. Für häufig verwendete Tapedicken  $h_T = H_i < 0,2 \text{ mm}$  ist sie kleiner als  $4 \text{ s}$ .



**Bild 4.8:** Links: BIOT-Zahl für GFK- und CFK-Laminat in Abhängigkeit der Laminatdicke; Rechts: Abkühldauer von CFK bei unterschiedlichen Zieltemperaturen  
*Left: Biot number for GFRP and CFRP laminates in relation to laminate thickness;*  
*Right: Cool down time of CFRP laminates for different target temperatures*

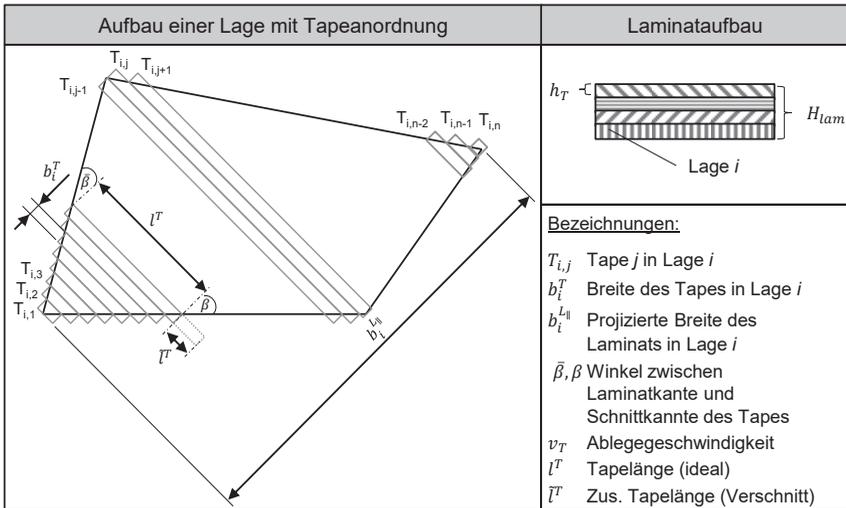
Abschließend lässt sich festhalten, dass der Imprägniervorgang mit steigender Schichtdicke längere Zykluszeiten aufweist und somit erheblichen Anlagen- und Prozessaufwand erfordert. CFK-Laminat weisen durch den kleineren Faserdurchmesser längere Imprägnierzeiten auf. In nachfolgenden Schritten lassen sich aber Laminat mit großen Wandstärken aus CFK aufgrund der hohen Wärmeleitung schneller verarbeiten als gleich dicke GFK-Laminat. Sowohl die Temperierung als auch die Imprägnierung sind von zahlreichen Parametern abhängig. Um gleichmäßige Materialeigenschaften zu erzielen, sollten diese Vorgänge möglichst kontrolliert und gleichmäßig ablaufen. Dazu sind homogene Druck- und Temperaturverhältnisse sowie konstante Laminatdicken anzustreben. Daher ist es bei einzelner Betrachtung des Imprägniervorgangs ratsam, diesen in optimierten Prozessen und unter einstellbaren Randbedingungen, wie z. B. bei der Imprägnierung von ebenen, möglichst dünnen Halbzeugen, durchzuführen und von der Bauteilherstellung zu entkoppeln.

#### 4.2.2 Laminatfertigung mittels Tapelegen

##### *Laminat manufacturing by tape laying*

Die FVK-Halbzeuge werden im nächsten Schritt zu mehrlagigen Laminaten zusammengefügt, beispielsweise im ATL- oder AFP-Verfahren. Im Folgenden soll daher die ebene Ablage von thermoplastischen Tapes modelliert werden. Das Besäumen des Laminats bzw. das Ausschneiden von Organoblech-Platinen aus großen Halbzeugen wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Beim Tapelegen wird das Laminat aus mehreren Schichten aufgebaut, die jeweils aus parallel nebeneinander abgelegten Tapes bestehen. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass jedes Tape direkt neben das zuvor abgelegte Tape platziert wird. Eine Aufweitung der Tapes im Prozess, vgl. [STEY13], wird bei der Modellierung ebenso nicht berücksichtigt wie unterschiedliche Ablegestrategien, z. B. Reihenfolge und Richtung der Tapeablage oder ein Versatz der Tapes in verschiedenen Lagen zueinander. In Abbildung 4.7 ist eine beliebige konvexe Form dargestellt, die durch Tapes abgebildet werden soll. Dieses Modell lässt sich prinzipiell auch auf Laminats mit Ausbrüchen erweitern. Hier werden aber zunächst kontinuierliche Tapes in Lage  $i$  mit Länge  $l_{ij}$  betrachtet. Die Lagenanzahl im Laminat sei  $N_{lam}^L$  und die Tapeanzahl in Lage  $i$  sei  $n_i^T$ .



**Bild 4.9:** Aufbau und Struktur eines Laminats aus einzelnen Tapebahnen  
*Composition of tapes forming a laminate*

Unter der Annahme, dass immer vollständige Einzellagen der Dicke  $h_L$  abgelegt werden, ergibt sich die Laminathöhe  $H_{lam}$  zu:

$$H_{lam} = N_{lam}^L \cdot h_L = N_{lam}^L \cdot h_T \tag{4.9}$$

**Ablegegeschwindigkeit**

Um die Produktivität der Laminatfertigung zu bewerten, ist die benötigte Zeit zur Fertigung des Laminats  $t_{lam}$  die entscheidende Größe. BERESHEIM ermittelt ein komplexitäts-basiertes Modell, mit dem die Zykluszeit für dreidimensionale Ablegevorgänge in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie abgeschätzt werden kann [BERE02, S. 93–112]. In dieser Arbeit soll stattdessen der Einfluss der Halbzeugparameter und der Prozessgeschwindigkeit untersucht werden, um eine Optimierung der Prozesskette für die Ablage von ebenen Laminaten zu ermöglichen.

Die Zykluszeit  $t_{lam}$  ergibt sich aus der Ablegezeit für die einzelnen Tapes inklusive eventuell notwendigen Verschnitts sowie Abbrems- und Beschleunigungszeiten. Zusätzlich wird eine geschwindigkeitsunabhängige Zeit  $t_{T,0}$  eingeführt, die Nebenzeiten, wie z. B. Schneidoperationen, Rückfahrten, Aktivieren von Heiz- und Andruckeinheit oder sonstige Maschinenfunktionen berücksichtigt. Zusätzlich ist die Zeit  $t_i^{rot}$  zum Einstellen der Lagenorientierung notwendig. Für den Fall, dass nur ein einzelnes Tape gleichzeitig abgelegt wird, gilt somit:

$$t_{lam} = \sum_i (t_i^L + t_i^{rot}) = \sum_{i=1}^{N_{lam}^L} \sum_{j=1}^{n_i^T} \left( \frac{l_{i,j}^T + \bar{l}_{i,j}^T}{v_T} + \frac{2v_T}{a_T} + t_{T,0} \right) + \sum_i^{N_{lam}^L} t_i^{rot} \quad (4.10)$$

mit

$$N_{lam}^L = \frac{H_{lam}}{h_T} \quad (4.11)$$

sowie

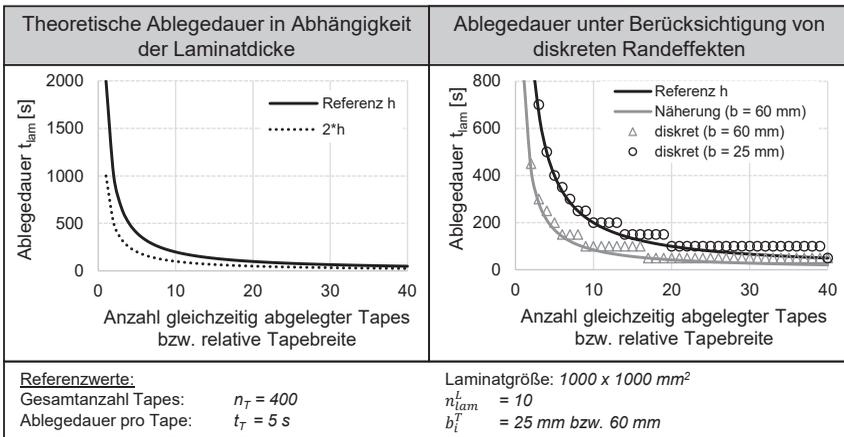
$$n_i^T = \left\lceil \frac{b_i^{L_n}}{b_T} \right\rceil \quad (4.12)$$

Wenn eine hohe Maschinendynamik vorliegt, ist die Beschleunigungszeit von weniger als 0,1 s meist gegenüber der Ablegezeit vernachlässigbar. Daher kann nach Formel 4.10 näherungsweise von einem hyperbolischen Zusammenhang zwischen  $v_T$  und  $t_{lam}$  ausgegangen werden. Gleiches ergibt sich aus den Formeln 4.11 und 4.12 für die Tapedicke und -breite und der daraus resultierende Tapeanzahl  $n_T$ , wenn man die Abweichung der Ablegedauern einzelner Lagen aufgrund unterschiedlicher Faserorientierungen vernachlässigt. Die vereinfachten Abschätzungen für die Herstelldauer eines Laminates  $t_{lam}$  in Abhängigkeit der Ablegegeschwindigkeit  $v_i$  und Halbzeuggeometrie  $b_T$  bzw.  $h_T$  sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Je größer die Lamine sind, desto geringer ist der Fehler dieser Approximation. Bei kleinen Laminaten oder komplexen Geometrien sind die Nebenzeiten zu berücksichtigen, um genau Abschätzungen zu ermöglichen.

**Tabelle 4.2:** Einflüsse verschiedener Parameter auf die Produktivität der Laminatfertigung  
*Influence of different parameters on the productivity of laminate manufacturing*

	Tapebreite $b_T$	Tapedicke $h_T$	Ablegegeschwindigkeit $v_T$	Anzahl gleichzeitig abgelegter Tapes $n_{Sys}^T$
Einfluss auf Zykluszeit $t_{lam}$	$t_{lam} \sim \frac{1}{b_T}$	$t_{lam} \sim \frac{1}{h_T}$	$t_{lam} \sim \frac{1}{v_T}$	$t_{lam} \sim \frac{1}{n_{Sys}^T}$

Neben der Möglichkeit, breitere Tapes abzulegen, können auch mehrere Tapes gleichzeitig in einem Ablegehub abgelegt werden ( $n_{Sys}^T$ ). Es ist offensichtlich, dass pro Hub die Strecke des längsten Tapes zurückgelegt werden muss. Die Multi-Tapeablage ist also hinsichtlich der Produktivität mit der Ablage von einem Tape mit entsprechender Breite gleichzusetzen. Die Systemkomplexität und damit auch die Investitionskosten skalieren jedoch mit der Anzahl der Bänder. Betrachtet man die benötigte Ablegezeit  $t_{lam}$  für ein Laminat in Abhängigkeit der Tapedicke sowie der Tapebreite bzw. der Anzahl der gleichzeitig abgelegten Tapes, werden die Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung ersichtlich. In Bild 4.10 links ist der hyperbolisch angenommene Verlauf der Ablegezeit über die Tapebreite bzw. Tapeanzahl für verschiedene Schichtdicken dargestellt.



**Bild 4.10:** Produktivität der Tapeablage unter Berücksichtigung von diskreten Effekten  
*Influence of discrete effects on the productivity of tape laying*

Während das Hinzufügen einer weiteren Ablegeeinheit bei geringer Tapeanzahl erheblich die Ablegezeit verkürzt, nimmt der Grenznutzen bei höheren Tapeanzahlen deutlich ab. Noch deutlicher wird dies, wenn Diskretisierungseffekte mit einbezogen werden, s. Bild 4.10 rechts. Am Beispiel eines  $1 \times 1$  m<sup>2</sup> großen Laminats lässt sich bereits erkennen, dass bei gleichzeitiger Ablage vieler Tapes die real erreichbare Ablegezeit teils deutlich über der abgeschätzten Ablegezeit liegt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass beim Ablegevorgang am Laminatrand nicht alle verfügbaren Ablegeeinheiten aktiv sind. Vielmehr ist es je nach Geometrie denkbar, dass lediglich ein einzelnes Tape abgelegt werden muss und alle anderen Ablegeeinheiten in dieser Ablegebewegung pausieren müssen.

Sowohl durch eine Steigerung der Tapebreite als auch durch Erhöhung der Anzahl gleichzeitig abgelegter Tapes bei Multi-Tapelegesystemen kann die Produktivität zunächst deutlich gesteigert werden. Die maximale Tapebreite bzw. Anzahl muss dabei in einem sinnvollen Verhältnis zur Bauteilgröße stehen, da wegen der geometrischen

Randbedingungen eine weitere Vergrößerung der Ablegeleistung kaum Mehrwert bietet. Eine allgemeingültige Optimierung ohne Betrachtung der Bauteilgeometrie ist nicht möglich. Die Verwendung vieler schmaler Tapes gegenüber wenigen breiten Tapes bietet keine Produktivitätsvorteile. Der Vorteil schmaler Tapes liegt vielmehr in der eingesetzten Materialmenge, da die Geometrie des Laminates besser angenähert werden kann. Dies soll im Folgenden detailliert betrachtet werden.

### Verschnitt

Ein wesentlicher Faktor für eine wirtschaftliche Verarbeitung von FVK ist eine hohe Materialausnutzung. Diese wird durch den Verschnittanteil  $V_A$  beschrieben, der die im Laminate verbleibende Menge  $m_{Lam}$  bezogen auf die eingesetzte Materialmenge  $m_{Ein}$  betrachtet, vgl. [MARQ17, S. 9]. Mit den zuvor eingeführten geometrischen Größen, s. Bild 4.9, von Tapelänge  $l_{i,j}^T$ , Verschnittlänge  $\bar{l}_{i,j}^T$  und Fläche der Lage  $A_i^L$  ergibt sich der Verschnittanteil  $V_A$  zu:

$$V_A = 1 - \frac{m_{Lam}}{m_{Ein}} = 1 - \frac{\sum_i A_i^L}{\sum_i \sum_j [b_{i,j}^T (l_{i,j}^T + \bar{l}_{i,j}^T)]} \quad (4.13)$$

Der Verschnitt setzt sich aus verschiedenen Summanden zusammen. Zum einen entspricht die projizierte Laminatbreite in der Realität nur in den seltensten Fällen einem Vielfachen der Tapebreite. Zusätzlich lassen sich verschiedene Laminatformen nur approximativ durch schmale, rechteckige Tapes annähern. Während dies rein geometrische Parameter sind, spielen auch Prozessfaktoren eine Rolle. So lassen sich z. B. nicht beliebig kurze Tapestücke ablegen. Des Weiteren könnte eine Ein- oder Auslaufänge notwendig sein, wenn die Prozess- bzw. Materialeigenschaften an den Randzonen nicht ausreichen sollten. Die ungenutzte Tapefläche pro Lage  $i$  ergibt sich also zu:

$$\Delta A_i = \Delta A_i^{diskret} + \Delta A_i^{geometrisch} + \Delta A_i^{prozess} \quad (4.14)$$

Für die aus der Diskretisierung entstehende notwendige Tapeanzahl in Lage  $i$  gilt:

$$n_i^T = \frac{b_i^{L_{\parallel}}}{b_i^T} \leq \left\lceil \frac{b_i^{L_{\parallel}}}{b_i^T} \right\rceil \leq \frac{b_i^{L_{\parallel}}}{b_i^T} + 1 \quad (4.15)$$

Ohne Einschränkung der Allgemeinheit sei das Tape  $n_i^T$  das zuletzt abgelegte Tape am Rand. Der maximal entstehende Verschnitt aus der Diskretisierung lässt sich nach oben abschätzen zu:

$$\Delta A_i^{diskret} \leq b_{i,n}^T l_{i,n}^T \quad (4.16)$$

Der geometrische Verschnitt entsteht aus der Winkelabweichung von Laminatkante und Schnittwinkel des Tapes. Nach Bild 4.9 gilt:

$$\Delta A_i^{\text{geometrisch}} = \frac{1}{2} \sum_j \left( (b_{i,j}^T)^2 (\tan(\beta) + \tan(\bar{\beta})) \right) \quad (4.17)$$

Somit besteht ein quadratischer Zusammenhang zwischen der Tapebreite und dem entstehenden Verschnitt. Betrachtet man nun verschieden große Lamine mit ähnlicher Form, also konstantem Verhältnis von  $l^L$  zu  $b^L$ , zeigt sich, dass bei größeren Laminen der Verschnittanteil sinkt, sofern  $b_i^T$  konstant bleibt. Die steigende Tapeanzahl  $n_i^T$  kann somit auch als dimensionslose Kennzahl für die geometrische Auflösung aufgefasst werden. Prinzipiell ist es möglich, die Tapes im Winkel entsprechend der Laminatkante zu schneiden. Dabei fällt meist jedoch ebenfalls Verschnitt bei der Konfektionierung des Tapes an, der den erhöhten Anlagenaufwand nicht rechtfertigt.

Aus prozesstechnischen Gründen kann es notwendig sein, das Laminat mit Aufmaß zu fertigen, d. h. längere Tapebahnen als notwendig abzulegen. Dieser prozessabhängige Verschnitt wird durch die zusätzlich prozessbedingte Tapelänge  $\tilde{l}_{i,j}$  wie folgt beschrieben:

$$\Delta A_i^{\text{prozess}} = \sum_j \tilde{l}_{i,j} b_{i,j}^T \quad (4.18)$$

Um die Verschnittlänge  $\tilde{l}_{i,j}$  zu minimieren, sollte der Prozess eine möglichst geringe Ein- und Auslaufstrecke benötigen. Dies erfordert eine gleichbleibende Konsolidierungsqualität bis in die Randbereiche hinein. Zusätzlich sollte die minimal ablegbare Tapelänge möglichst klein sein, um z. B. in Ecken oder bei kleinen Laminen den Verschnitt zu minimieren. Bei großen Laminen nimmt die Bedeutung des prozessabhängigen Verschnittanteils ab. Zum einen ist die Ein- bzw. Auslaufstrecke unabhängig von der Laminatgröße. Zum anderen sinkt die relative Anzahl der Tapes, die die minimal ablegbare Tapelänge unterschreiten.

Um den Verschnitt zu minimieren, sind somit verschiedene Stellgrößen möglich:

- Geringe systemspezifische minimale Ablegelänge
- Kurze systemspezifische notwendige Ein- und Auslaufstrecke
- Geringe Tapebreite bzw. eine hohe Anzahl an Tapes pro Lage
- Die für alle Lagen in Faserrichtung projizierte Laminatbreite sollte möglichst einem ganzzahligen Vielfachen der Tapebreite entsprechen

### Erwärmen

Zuvor wurde die Ablage der Tapes kinematisch beschrieben. Zur Herstellung eines Laminats ist jedoch sowohl ein Fixieren der Tapeposition als auch eine porenfreie Konsolidierung der einzelnen Schichten notwendig. Beides setzt eine flüssige Matrix und damit eine Erwärmung des Materials voraus. Die verschiedenen Erwärmungskonzepte und ihr Einfluss auf die Prozesszeit sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

**Tabelle 4.3:** Erwärmungs- und Konsolidierungskonzepte*Heating and consolidation concepts*

	Teilweises Aufschmelzen (Nachkonsolidierung erforderlich)		In-situ Konsolidierung
	Sequenzielles Anhaften	Prozessparallele Erwärmung	
Prozessbe- schreibung	Nach der Ablage eines einzelnen Tapes wird dieses lokal erwärmt und punktuell verschweißt (Bsp.: <i>FibreForge</i> )	Das zugeführte Tape und ggf. das Substrat werden im Ablegeprozess teilweise erwärmt (Bsp.: <i>Boikon</i> )	Das zugeführte Tape und ggf. das Substrat werden im Ablegeprozess vollständig erwärmt (Bsp.: <i>AFPT</i> )
Einfluss auf Prozessdauer	<u>Tapeerwärmung:</u> Dauer ca. 1 s  <u>Laminaterwärmung:</u> $t_{Bi,0} \sim H_i$ $t_{Bi,\infty} \sim H_i^2$	<u>Tapeerwärmung:</u> Während der Ablage  <u>Laminaterwärmung:</u> $t_{Bi,0} \sim H_i$ $t_{Bi,\infty} \sim H_i^2$	<u>Tapeerwärmung:</u> Während der Ablage  <u>Laminaterwärmung:</u> (Entfällt)
Sonstige beeinflusste Parameter	Keine	Min. Ablegelänge $\bar{l}_{i,j}^T$ Geschwindigkeit $v_T$	Min. Ablegelänge $\bar{l}_{i,j}^T$ Geschwindigkeit $v_T$

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben resultieren die verschiedenen Konzepte zur Konsolidierung in unterschiedlichen Prozessrouten. Heutzutage sind zur ebenen Laminatfertigung solche Verfahren Stand der Technik, bei denen während der Tapeablage lediglich ein lokales Anheften oder eine Teilkonsolidierung stattfindet. Diese so entstehenden Tapestapel müssen nachträglich konsolidiert werden. Dazu ist das Laminat über seine gesamte Dicke zu temperieren. Die zugrundeliegenden Wärmeleitungsmechanismen sind bereits für die Modellierung des Schmelzvorgangs beim Imprägnieren vorgestellt worden, vgl. Kapitel 4.2.1. Bei der in-situ Konsolidierung werden das zugeführte Tape und das Substrat soweit erwärmt, dass eine porenfreie Verschweißung möglich ist. Da das zugeführte Tape thermisch dünn ist, lässt sich die Aufheizung in den Ablegeprozess integrieren. Zur genauen Beschreibung der Erwärmung eines bewegten Tapes sei auf Kapitel 5.2 verwiesen.

### Konsolidierung

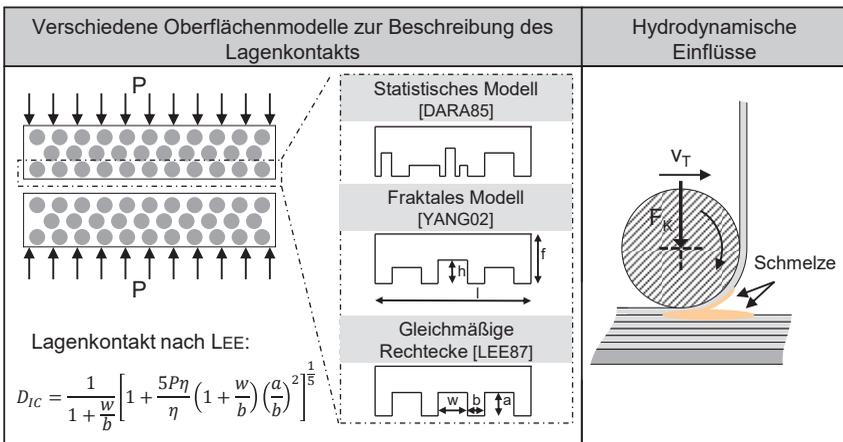
Das Fügen zweier Einzellagen aus Thermoplast-FVK wird als Konsolidieren bezeichnet. Um eine Verbindung zu ermöglichen, ist die Oberflächenrauheit der Fügepartner unter Druck auszugleichen, sodass ein Lagenkontakt entsteht. Die Güte für den Lagenkontakt ist die relative Kontaktfläche,  $D_{IC}$ , vgl. Kapitel 2.3.2. Sobald ein Kontakt vorliegt, finden Autodiffusionsvorgänge statt und die Fügefestigkeit bildet sich aus. Die

zuvor beschriebenen Verfahren mit Teilkonsolidierung führen nach dem Ablageprozess zu einer relativen Kontaktfläche  $D_{IC} \ll 1$ .

Zur Charakterisierung des Lagenkontakts sind zahlreiche analytische Modelle vorhanden. Diese unterscheiden sich meist in der Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit. Dabei wird von einem statischen Druckzustand ausgegangen, bei dem die Oberflächenrauheit bzw. die damit einhergehenden Poren durch Fließvorgänge des Polymers ausgeglichen werden. Ein vollständiger Lagenkontakt, d. h.  $D_{IC} = 1$ , ist dann erreicht, wenn alle Poren in der Kontaktzone ausgefüllt sind. Dabei spielt neben der temperaturabhängigen Viskosität der Matrix und dem Pressdruck die Oberflächenbeschaffenheit der Halbzeuge eine wesentliche Rolle. Die Beschreibung der Ausbildung des Lagenkontakts ist Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben, vgl. [LEE87; DARA85; YANG02].

In Bild 4.11 werden die bekanntesten Modelle miteinander verglichen. Die verschiedenen Oberflächenmodelle bilden dabei die Rauheit meist durch Rechtecke ab. Je nach Modell werden für das Erreichen eines vollständigen Lagenkontakts oft lange Kontaktzeiten  $t_{IC}$  angegeben, bspw. mehrere Minuten für PEEK-CF [BOUR01, S. 1049]. Nach LEE lässt sich die Dauer zum Erreichen eines vollständigen Lagenkontaktes  $t_{IC}$  abschätzen zu [LEE87]:

$$t_{IC} = \frac{\eta}{5P} \frac{1}{1 + \frac{w}{b}} \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[ \left(1 + \frac{w}{b}\right)^5 - 1 \right] \tag{4.19}$$



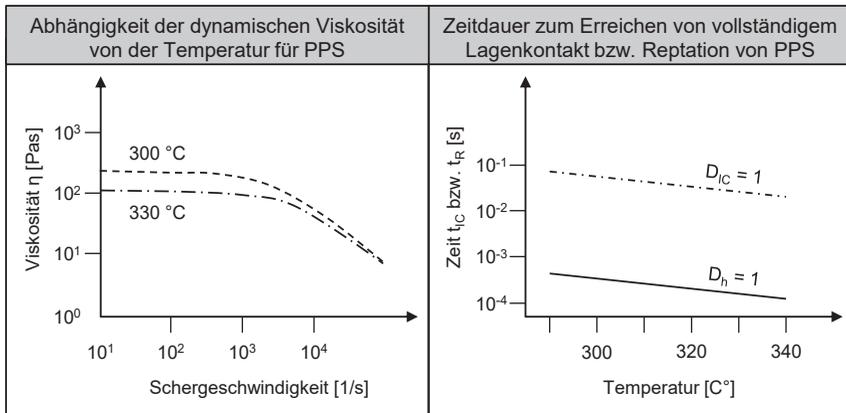
**Bild 4.11:** Modellhafte Beschreibung des Lagenkontakts beim Verschweißen von Thermoplast-FVK, vgl. [SCHÄ17]

*Modelling of the generation of an intimate contact during welding of thermoplastic composites*

Es ist anzumerken, dass diese Modelle für einen statischen Pressprozess ausgehen und die Fließbewegung des Polymers alleine vom Pressdruck bestimmt wird. Häufig werden diese Modelle auch in Arbeiten zum Tapewickeln bzw. -legen angewendet. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass selbst für statische Prozesse die anhand der Modelle abgeschätzten Prozesszeiten deutlich über den Werten aus experimentellen Untersuchungen liegen. Nach SCHÄFER ergibt sich bei statischen Pressprozessen von PA6 und geringen Drücken von  $p = 1\text{--}4 \text{ kPa}$  bereits nach  $t_{IC} < 10 \text{ s}$  ein inniger Lagenkontakt [SCHÄ17]. STEYER hat sich mit der Vergrößerung der effektiven Andruckzeit beim Laser-unterstützten Tapelegen durch eine flexible Andruckrolle befasst [STEY13]. Im Laser-unterstützten Tapelegen lassen sich bei der Verarbeitung von PA12 porenfreie Lamine mit Andruckzeiten von ca.  $0,1 \text{ s}$  realisieren, sodass sich die notwendige Kontaktzeit zu  $t_{IC} < 0,1 \text{ s}$  abschätzen lässt.

Eine mögliche Ursache für die große Abweichung der Modelle ist die Vernachlässigung von hydrodynamischen Effekten und Walkbewegungen beim Tapelegen, die eine Durchmischung und ein Fließen der Polymermatrix fördern. Die Andruckrolle bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v_T$  über das Schmelzbad, s. Bild 4.11 rechts. Auch wenn gewisse Ähnlichkeit mit der Elastohydrodynamik von Wälzkörpern besteht, sind die Randbedingungen für eine Übertragbarkeit der entsprechenden Modelle nicht erfüllt. Weder die Bedingung eines isotropen Materials noch eines inkompressiblen Newtonschen Fluids treffen zu. Zusätzlich findet keine Strömung im eigentlichen Sinne statt, da das Schmelzbad unter der Rolle erstarrt. Trotzdem ist offensichtlich, dass die Ablegebewegung einen positiven Effekt auf das Ausgleichen der Oberflächenrauigkeit hat. Für einen entsprechenden Modellierungsansatz sei auf TIERNEY verwiesen [TIER03].

Zweiter wesentlicher Bestandteil der Konsolidierung ist das Erzielen einer stoffschlüssigen Verbindung. Diese entsteht durch Autohäsiationsvorgänge, vgl. Kapitel 2.3. GROUVE modelliert für Tapelegeprozess sowohl die Kontaktzeit  $t_{IC}$  als auch die Zeit  $t_H$  zum Erreichen einer vollständigen Verbindungsfestigkeit, die auch durch die Reptationszeit  $t_R$  spezifiziert werden kann. Der experimentelle Nachweis wird mit einem System zum Laser-unterstützten Tapelegen erbracht, welches auf den Erkenntnissen von STEYER aufbaut. Bild 4.12 fasst die Ergebnisse für PPS mit einer Viskosität  $\eta = 200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  und einen maximalen Druck  $p = 400 \text{ kPa}$  zusammen. Es zeigt sich, dass die Reptationsvorgänge mit  $t_R < 1 \text{ ms}$  nochmals zwei Größenordnungen schneller ablaufen als die Herstellung eines innigen Lagenkontaktes. [GROU12, S. 80–83]



**Bild 4.12:** Temperaturabhängige Viskosität und Darstellung der resultierenden Kontaktzeit sowie der Reptationszeit, nach [GROU12, S. 82]

*Temperature dependent viscosity and resulting time for intimate contact and reptation*

Dies zeigt, dass für eine Konsolidierung während des Tapelegens nur kurze Prozesszeiten in der Größenordnung von *100 ms* notwendig sind. Daher ist eine in-situ Konsolidierung mit hohen Ablegegeschwindigkeiten und daraus resultierender hoher Produktivität möglich. Die Lamineigenschaften werden aber nicht nur durch den Konsolidierungsprozess, der oberhalb der Schmelztemperatur  $T_M$  stattfindet, beeinflusst. Vielmehr sind ebenfalls die Abkühl- und Erstarrungsprozesse der Matrix zu berücksichtigen und werden daher im Nachfolgendem betrachtet.

### Abkühlen und Erstarren

Während der Erwärmungsprozess beim Tapelegen mit in-situ Konsolidierung Gegenstand zahlreicher Untersuchungen ist, wird der Abkühlvorgang beim Konsolidieren häufig nicht als wesentlicher Prozessschritt angesehen.

Jedoch beeinflusst der Abkühlvorgang maßgeblich die folgenden Materialeigenschaften:

- Verzug und Schrumpf
- Kristallinitätsgrad bei teilkristallinen Thermoplasten
- Konsolidierungseigenschaften und resultierende Festigkeit

Die Abkühldauer lässt sich durch die in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Modelle zur Temperierung, Formel 4.7 und 4.8, abschätzen. Jedoch sind für die verschiedenen Vorgänge, d. h. Ausbildung des Lagenkontakts, AutohäSION und Rekrystallisation, verschiedene Temperaturniveaus entscheidend. Der Lagenkontakt kann sich ausbilden, solange die Matrix im schmelzförmigen Zustand ist und ein Prozessdruck aufgebracht wird. Nach BINETRY ist eine zu geringe Druckbeaufschlagung eine der Hauptursachen

von Porenbildung während der Abkühlphase. Wenn der Konsolidierungsdruck abnimmt bevor die Matrix erstarrt ist, dehnen sich die eingeschlossenen Gase aus und entsprechendes Porenwachstum findet statt. [BINE15, S. 136]

TIERNEY modelliert das Porenwachstum und berücksichtigt dabei insbesondere die wiederholten Aufheiz- und Abkühlvorgänge, die beim Fertigen eines Laminates aus mehreren Schichten entstehen. Die Erstarrung ohne Druck führt zum Porenwachstum und damit zu einer Dekonsolidierung. [TIER03; CHR114] YE analysiert den Vorgang des Schrumpfens bzw. Kollabierens von Poren unter erneuter Erwärmung und Druckbelastung. Poren wachsen und schließen sich in weniger als 1 ms [YE05, S. 242–253]. Die Änderung der Porengröße ist damit ein sehr schnell ablaufender Prozess. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass während des Abkühlvorganges solange Druck aufgebracht werden muss, bis das Laminat vollständig erstarrt ist.

Die Diffusionsvorgänge, die letztendlich die Festigkeit der Lagenverbindung bestimmen, finden hingegen oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$  statt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass bei teilkristallinen Matrixwerkstoffen die kristallinen Bereiche ggf. die Diffusionsvorgänge und die entstehende Fügefestigkeit beeinflussen können. Aus diesem Grund hat die Verweildauer bei höheren Temperaturen im Bereich der Kristallisationstemperatur  $T_K$  einen wichtigen Einfluss auf die Matriceigenschaften und die Verbindungsfestigkeit. Gleichzeitig ergeben sich aber bei nicht-isothermen Prozessen schnellere Diffusionsraten, was für die Verbindung zweier Lagen im Tapelegen mit in-situ Konsolidierung förderlich ist. [BOUR01, S. 1050–1052]

Der Kristallinitätsgrad ist eine Größe, die maßgeblich von dem Temperaturverlauf beim Abkühlen abhängig ist. Jedoch sind weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Bei FVK fungieren die Fasern als Keimstellen für die Kristallbildung. Gleichzeitig führen hohe Abkühlraten, wie sie für schnelle Prozesse notwendig sind, zu einer Verschiebung des Kristallisationsbereichs zu niedrigen Temperaturen. Trotzdem sind die maximal erreichbaren Abkühlraten limitiert, wenn hohe Kristallisationsgrade erreicht werden sollen. [BOUR01, S. 1055]

Zusätzlich ist eine möglichst homogene Temperaturverteilung im gesamten Laminat während der Abkühlung anzustreben. Nur so lassen sich durch Schrumpf entstehende Eigenspannungen verhindern. KERMER-MEYER hat eine entsprechende Methodik entwickelt, die eine Ermittlung der optimalen Prozesstemperaturführung erlaubt, um möglichst verzugsfreie Lamine zu erhalten [KERM15, S. 48–82].

### 4.2.3 Bauteilfertigung

#### *Part manufacturing*

Die Bauteilfertigung wird von der Bauteilgeometrie und dem gewählten Formgebungsprozess dominiert, vgl. Kapitel 2.4. Die herstellungsspezifischen Eigenschaften des Laminats haben nur indirekten Einfluss auf die Produktivität der diskreten Bauteilfertigung. So können die verschiedenen Prozessrouten zur Herstellung von Laminaten die Nebenprozesse der Bauteilfertigung, wie z. B. Besäumen, Erwärmen und Abkühlen sowie die Handhabung im schmelzförmigen Zustand, beeinflussen.

Organobleche aus Gewebe können eine geringfügig höhere Wärmeleitung in Dickenrichtung aufgrund der Faserondulation aufweisen als Lamine aus unidirektionalen Tapes. Im Gegensatz dazu erlauben belastungsoptimierte Lamine eine geringere Laminatdicke, sodass kürzere Temperierungszeiten als bei dickeren Organoblechen möglich sind. Auch die Konsolidierungsqualität im Laminat führt zu einer Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit. So sind für teilkonsolidierte Lamine längere Temperierdauern notwendig als für vollkonsolidierte Lamine. [SLAN19]

Neben dem Umformen ist im Regelfall noch ein Besäumen des Laminats notwendig. Bei der Verwendung von Organoblechen hängt der Verschnitt maßgeblich von der Bauteilgeometrie, der Faserorientierung und der zur Verfügung stehenden Halbzeugbreite ab. Die Materialwahl und der Laminataufbau können auch die Besäumverfahren, wie z. B. Fräsen, Scherschneiden, Wasser- und Laserstrahlschneiden, beeinflussen. Der anfallende Verschnitt bei der Verwendung von belastungsoptimierten Laminen aus unidirektionalen Tapes kann mit dem im Kapitel 4.2.2 vorgestellten Modell berechnet werden.

Zusätzlich weisen UD-Lamine in geschmolzenem Zustand eine geringere Stabilität als gewebebasierte Organobleche auf. Einerseits ermöglicht dies höhere Umformgrade. Andererseits ist die Handhabung erschwert, sodass ggf. spezielle Greif- und Spannsysteme notwendig sind. [SACH14]

Für die diskrete Bauteilfertigung lassen sich durch die Geometrieabhängigkeit keine allgemeingültigen Modelle aufstellen, um die verschiedenen Lamineigenschaften und Prozessrouten zu quantifizieren. Generell eignen sich alle in den zuvor genannten und untersuchten Verfahren hergestellten Lamine zur Bauteilherstellung im Thermoformen. Die Produktivität der eigentlichen Bauteilherstellung wird nur in geringem Maße durch den Laminataufbau beeinflusst. Zu einer wirtschaftlichen Optimierung der gesamten Prozesskette soll daher für weitere Untersuchungen maßgeblich die Laminatherstellung betrachtet werden.

### 4.3 Modellbasierte Optimierung der Prozesskette

#### *Model-based optimization of the process chain*

Um ein technisch-wirtschaftliches Optimum der Herstellung von Thermoplast-FVK Bauteilen zu erzielen, ist die gesamte Prozesskette zu betrachten. In der Literatur finden sich oft qualitative Betrachtungen und Bewertungen der generellen Eigenschaften einzelner Prozessschritte oder prozessanalytische Modelle, die genaue Prozessdaten benötigen, vgl. [ERBE16; SCHÄ15; NEIT14, S. 22; EVER00]. Eine integrierte Prozesskostenrechnung, welche ebenfalls die Materialeigenschaften und den Laminataufbau mit einbezieht, ist nur für einzelne Spezialfälle, z. B. dem RTM-Verfahren, verfügbar, vgl. [PARK09]. Eine allgemeingültige, prozessschrittübergreifende Betrachtung ist nicht bekannt. Daher wird im Folgenden ein prozessschrittübergreifendes Modell aufgebaut, das im Wesentlichen auf den in Kapitel 4.2 dargestellten physikalischen Prozessbeschreibungen basiert. Als wesentliche Bewertungsgröße wird die Durchlaufzeit bzw. die Summe aller Zykluszeiten der Einzelprozesse herangezogen. Vereinfachend

wird davon ausgegangen, dass ein linearer Zusammenhang der jeweiligen Zykluszeit und den Prozesskosten, z. B. über den Maschinenstundensatz, besteht.

### 4.3.1 Modellierung der verschiedenen Prozessketten

#### *Modelling of the different process chains*

Die notwendigen Prozessschritte zu Laminatfertigung, d. h. Imprägnieren, Drapieren bzw. Ablegen sowie Konsolidieren sind zu bewerten, um eine Optimierung der Prozesskette zur Herstellung von Thermoplast-FVK Bauteilen durchführen zu können. Zusätzlich ist die erforderliche Temperierung zum Aufschmelzen und Erstarren der Matrix zu berücksichtigen. Die Formgebung des Bauteils selbst wird nicht weiter betrachtet, da diese wesentlich von der Bauteilgeometrie beeinflusst wird und nicht unmittelbar von der gewählten Halbzeugart abhängig ist.

Aus den in Kapitel 4.2 ermittelten Modellen lassen sich die Haupteinflussfaktoren für die einzelnen Prozesszeiten ableiten. Neben diversen Material- und Prozessparametern spielt insbesondere die geometrische Größe der Halbzeugdicke  $H_i$  bzw. Tapetdicke  $h_T$  eine entscheidende Rolle. Für gleichbleibende Prozess- und Materialparameter lassen sich die Modelle als Funktion der Halbzeugdicke vereinfachen, wobei die entsprechenden Parameter über Konstanten  $c_i$  abgebildet werden. Für eine exakte wirtschaftliche Bewertung ließen sich die Prozesszeiten mit entsprechenden, anwendungsspezifischen Kostenfaktoren gewichten. Hier soll jedoch die Optimierung lediglich hinsichtlich der Zykluszeit stattfinden. In Tabelle 4.4 sind die Modelle und der Einfluss der Halbzeugdicke auf die Prozesszeiten zusammengefasst.

Aus den vereinfachten Modellen ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Halbzeugdicke und Imprägnierdauer. Für thermisch dünne Lamine ist die Temperierzeit proportional zur Laminatdicke. Der Konsolidiervorgang selbst ist hingegen unabhängig von der Halbzeugdicke.

**Tabelle 4.4:** Vereinfachte Modellierung der Zykluszeiten der einzelnen Prozesse

#### *Simplified models of cycle times for the single process steps*

Prozessschritt	Imprägnieren vgl. (4.1)	Temperieren vgl. (4.7)	Ablegen vgl. (4.10)	Konsolidieren vgl. (4.19)
Modell für Zykluszeit	$t_{imp} = \frac{\eta H_i^2}{2 K_p \Delta p}$	$t_{Bi,0} = \frac{c_p \rho H_i}{\alpha} \ln \left( \frac{T_0 - T_\infty}{T - T_\infty} \right)$	$t_{lam} = \sum_t (t_t^i + t_t^{rot})$	$t_{IC} = \frac{\eta}{5P} \frac{1}{1 + \frac{w}{b}} \left( \frac{b}{a} \right)^2 \left[ \left( 1 + \frac{w}{b} \right)^5 - 1 \right]$
Vereinfachtes Modell	$t_{imp} = c_{imp} H_i^2$	$t_{temp} = c_{temp} H_i$	$t_{lam} \sim c_{ab} \frac{1}{H_i}$	$t_{IC} \neq t_{IC}(H_i)$ $t_H \neq t_H(H_i)$

Je dünner ein Tape ist, desto mehr Lagen müssen übereinandergestapelt werden, um die geforderte Laminatdicke zu erreichen. Dies wird durch einen hyperbolischen Verlauf der Ablegezeit  $t_{lam}$  abgebildet. Es liegen also gegenläufige Effekte vor, sodass das globale Optimum nur bei Betrachtung der gesamten Kette gefunden werden kann. Die

Prozessschritte Imprägnieren und Temperieren beziehen sich auf die Tapeherstellung, sodass die Halbzeugdicke  $H_i$  der Tapedicke  $h_T$  entspricht. Für die Durchlaufzeit als Summe der einzelnen Prozesszeiten ergibt sich:

$$t_{ges}(H_i) = k_1 c_{imp} H_i^2 + k_2 c_{temp} H_i + k_3 c_{ab} \frac{1}{H_i} + t_{const} \quad (4.20)$$

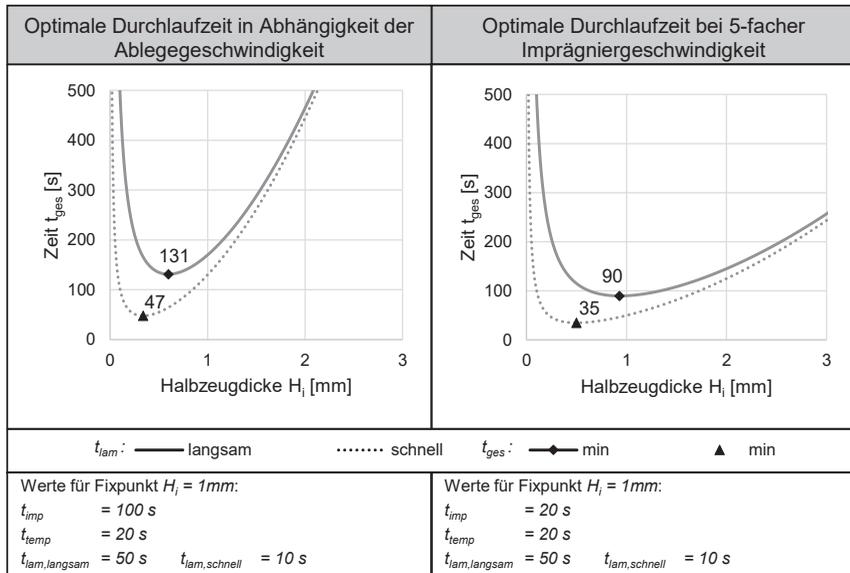
Dabei gibt  $k_i$  jeweils die Anzahl der Prozesswiederholungen an. Die Konstante  $t_{const}$  fasst die von der Laminatdicke unabhängigen Prozesszeiten zusammen. Für ein lokales Optimum muss nun notwendigerweise gelten:

$$\frac{d t_{ges}(H_i)}{d H_i} = 2k_1 c_{imp} H_i + k_2 c_{temp} - k_3 c_{ab} \frac{1}{H_i^2} = 0 \quad (4.21)$$

Die hinreichende Bedingung für das Vorliegen eines Minimums ist für alle Tape- bzw. Halbzeugdicken  $H_i > 0$  erfüllt:

$$\frac{d^2 t_{ges}(H_i)}{d H_i^2} = 2k_1 c_{imp} + 2k_3 c_{ab} \frac{1}{H_i^3} > 0 \quad \forall H_i > 0 \quad (4.22)$$

Nach Multiplikation mit  $H_i^2$  führt Formel (4.21) zu einer kubischen Gleichung. Auf eine allgemeingültige Nullstellendiskussion von  $\frac{d t_{ges}(H_i)}{d H_i}$  soll hier daher verzichtet werden. Stattdessen wird in Abbildung 4.13, links, die Gesamtdurchlaufzeit  $t_{ges}$  in Abhängigkeit der Ablegegeschwindigkeit und der Halbzeugdicke exemplarisch dargestellt. Die vereinfachten Modelle werden ohne Beschränkung der Allgemeinheit für einen Fixpunkt bei einer Halbzeugdicke von  $H_i = 1 \text{ mm}$  kalibriert, was einem beliebigen Laminat entspricht. Die Prozess- und Materialparameter wurden entsprechend der Beschreibung der physikalischen Effekte, Kapitel 4.2, plausibel gewählt und sind in gewissen Grenzen variierbar. Die im rechten Diagramm dargestellten Prozesszeiten bilden den Einfluss einer im Vergleich zum linken Diagramm gesteigerten Imprägniergeschwindigkeit ab. Sowohl die Imprägnierzeit  $t_{imp}$  als auch die Temperierzeit  $t_{temp}$  lassen sich durch die Wahl einer kleineren Halbzeugdicke reduzieren. Jedoch steigt dann die notwendige Ablegezeit  $t_{lam}$  an. Dadurch ergibt sich ein Optimum für die Gesamtprozesszeit. Bei dem Ausgangsbeispiel im linken Diagramm liegt diese bei  $t_{ges,min} = 131 \text{ s}$ . Eine fünf-fache Imprägniergeschwindigkeit, Bild 4.13 rechts, führt zu einer minimalen Durchlaufzeit von lediglich  $t_{ges,min} = 90 \text{ s}$ . Zusätzlich verschiebt sich das Optimum zu höheren Halbzeugdicken.



**Bild 4.13:** Gesamtdurchlaufzeit in Abhängigkeit der Tapedicke und Ablegegeschwindigkeit  
*Overall cycle time depending on tape thickness and layup speed*

Wenn sich nun der Faktor  $c_{ab} \sim 1/v_T$  durch Steigerung der Ablegegeschwindigkeit  $v_T$  verringert, reduziert sich die Gesamtdauer und das Produktivitätsoptimum verschiebt sich zu kleineren Halbzeugdicken. In der Erhöhung der Ablegeproduktivität liegt somit ein wesentlicher Schlüssel zur Steigerung der Gesamtproduktivität, da dadurch der Einsatz geringerer Halbzeugdicken wirtschaftlich möglich wird. Bestandteil dieser Dissertation ist es daher, einen Beitrag zur Erhöhung der Ablegeproduktivität von thermoplastischen Tapes zu leisten. Im Folgenden sollen die unterschiedlichen Prozessketten und der Einfluss der Halbzeugdicke exemplarisch an einem definierten Laminataufbau dargestellt werden.

### 4.3.2 Vergleich verschiedener Prozessketten

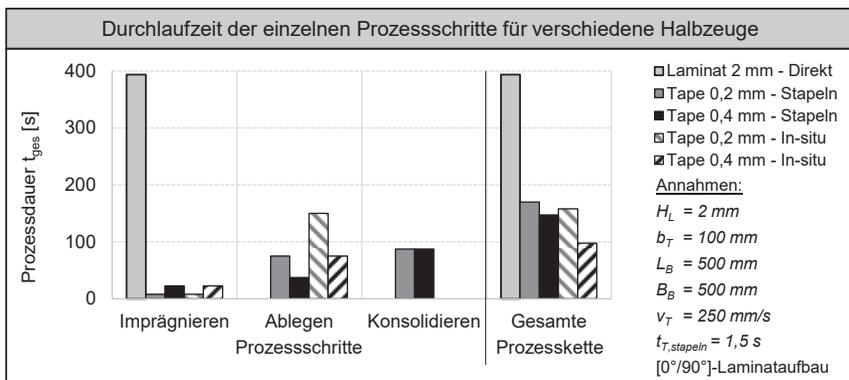
#### *Comparison of different process chains*

Bei dem in dieser Dissertation verfolgtem Konzept für eine flexible, großserientaugliche Produktion auf Basis von unidirektionalen Tapes ergeben sich durch die Wahl der Halbzeugdicke und unterschiedlicher Prozessketten verschiedene Lösungsmöglichkeiten. Der Lösungskorridor wird in der Realität durch technische Randbedingungen begrenzt. So muss die minimale Halbzeugdicke  $H_i$  mindestens mehrere Faserdurchmesser betragen und darf maximal auch nur so groß gewählt sein, dass für typische Laminatdicken verschiedene Lagenaufbauten realisierbar sind. Daher ergeben sich praxisrelevante Tapedicken  $h_T$  zwischen  $0,1\text{--}0,5\text{ mm}$ .

Anhand eines quadratischen Laminates mit  $500\text{ mm}$  Kantenlänge und einer Laminatdicke  $H_L$  von  $2\text{ mm}$  werden drei Prozessketten zur Laminatfertigung miteinander verglichen:

- Tapelegen mit Nachkonsolidierung ( $h_{T,1} = 0,2\text{ mm}$ ;  $h_{T,2} = 0,4\text{ mm}$ )
- Tapelegen mit in-situ Konsolidierung ( $h_{T,1} = 0,2\text{ mm}$ ;  $h_{T,2} = 0,4\text{ mm}$ )
- Direkte Imprägnierung eines Laminates mit  $H_L = 2\text{ mm}$

Zusätzlich werden zwei unterschiedliche Tapedicken betrachtet. Die Prozesskette für die Direktimprägnierung des Laminats besteht bei Vernachlässigung textiler Prozessschritte lediglich aus dem Imprägnierprozess selbst inkl. Aufheizen und Abkühlen der Matrix. Ein Zuschneiden oder Umformen wird bei allen drei betrachteten Prozessketten nicht berücksichtigt. Der angenommene Imprägnierweg entspricht der jeweiligen Halbzugdicke. Anhand der vorgestellten Modelle werden die einzelnen Prozesszeiten der drei Schritte Imprägnieren, Ablegen und Konsolidieren für die drei unterschiedlichen Prozessketten und zwei verschiedenen Tapedicken berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.14 dargestellt.



**Bild 4.14:** Durchlaufzeiten verschiedener Prozessketten  
*Overall cycle time of different process chains*

Die Imprägnierdauer spielt bei den Prozessketten zur Tapeverarbeitung lediglich eine untergeordnete Rolle. Beim Ablegen der Tapes wird deutlich, dass ein Produktivitätsvorteil für das Stapeln der Tapes gegenüber der Ablage mit in-situ Konsolidierung gegeben ist. Dem liegt eine Ablegegeschwindigkeit  $v_T$  bei der in-situ Konsolidierung von  $250\text{ mm/s}$  und eine benötigte Zeit von  $1,5\text{ s}$  für das Stapeln und Fixieren eines Tapes zugrunde. Da jedoch beim Stapeln und Fixieren als einziges Verfahren eine weitere Erwärmung und Abkühlung für die Nachkonsolidierung notwendig ist, geht der Produktivitätsvorteil bei Betrachtung der kumulierten Zykluszeiten für die gesamte Prozesskette verloren. Die Tapeablage mit in-situ Konsolidierung besitzt selbst für einfache Laminataufbauten das Potenzial, die Wirtschaftlichkeit der Thermoplast-Laminatfertigung zu steigern. Für die flexible Fertigung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ergeben sich zusätzliche Vorteile.

Anzumerken ist, dass sich die aus den notwendigen Prozesszeiten ergebenden Produktionsgeschwindigkeiten in kontinuierlichen Verfahren anlagentechnisch beeinflussen lassen. So ermöglicht eine Verlängerung der Kühl- und Heizstrecke bei der Imprägnierung eine höhere Produktionsgeschwindigkeit. Eine Skalierung der Halbzeugbreite führt ebenfalls zu einer gesteigerten Produktivität. Diese Maßnahmen sind aber ebenfalls für die in-situ Konsolidierung anwendbar. Um dies zu validieren soll eine entsprechende Anlagentechnik für die in-situ Konsolidierung entwickelt werden, welche die bisher gewonnenen theoretischen Erkenntnisse abbildet, s. Kapitel 5.

Ein Vorteil der Nachkonsolidierung des gesamten Laminats besteht darin, dass das gesamte Bauteil in einem Prozessschritt mit den gleichen Parametern verarbeitet wird. Im Sinne eines Chargenprozesses kann dadurch ein homogener, robuster Prozess ermöglicht werden. Bei der in-situ Konsolidierung handelt es sich jedoch um ein additives Verfahren, sodass sich die Bauteileigenschaften während der Tapeablage ergeben und sich lokal unterscheiden können.

Die Modellierung geht bisher vereinfachend von einer optimalen Prozessführung und gleichbleibender Bauteilqualität aus. Jedoch haben die erzielbaren Materialeigenschaften sowie Ausschuss- und Verschnitttraten erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens. Daher werden in Kapitel 4.4 Modelle zur Beschreibung der Prozessstabilität, der Anlagенrobustheit und Materialeffizienz entwickelt.

#### **4.4 Bewertung von Unsicherheiten und der Prozessfähigkeit**

##### *Assessment of uncertainties and process capability*

Der Vergleich verschiedener Prozessketten auf Grundlage der in Kapitel 4.2 hergeleiteten Prozessmodelle identifiziert eine in-situ Konsolidierung mit hoher Ablegeproduktivität als wesentliche Strategie zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. In diesem Kapitel soll zusätzlich die erreichbare Laminatqualität sowie die Robustheit dieses Prozesses analysiert werden. Die Produktivität der in Kapitel 2.3.3 vorgestellten AFP- und ATL-Verfahren und Systeme liegt in der Realität deutlich unter der theoretisch möglichen Materialausbringungsmenge. Laut UZMAN beträgt die reale Produktivität in der Luftfahrtproduktion bei Berücksichtigung aller Stillstandzeiten lediglich 12,5 % des idealen Werts. [UZMA12]

Die thermoplastische Tapeablage mit in-situ Konsolidierung bietet Potenzial für eine hohe Produktivität. Es werden wenige Prozessschritte benötigt, was gleichzeitig den Investitionsbedarf in Anlagentechnik reduziert. Jedoch gibt es Vorbehalte, was die Prozessrobustheit, Tapequalität und die erreichbare Laminatqualität einer in-situ Konsolidierung im Besonderen anbelangt, vgl. [GRUB12].

Die erreichbaren Laminateneigenschaften haben beispielsweise einen direkten Einfluss auf die notwendige Materialmenge, was sich sowohl in den Herstellungskosten als auch im Bauteilgewicht und somit in den Betriebskosten widerspiegelt. Daher werden für Luftfahrtanwendungen vereinzelt die Bauteilqualität, Produktionskosten und während der Nutzung entstehende Kosten gesamtheitlich optimiert, vgl. [KAUF08].

Um die real auftretenden Produktivitätsverluste bewerten zu können, wird die Gesamtanlageneffektivität OEE (engl.: Overall Equipment Effectiveness) der Tapeablage mit in-situ Konsolidierung abgeschätzt. Diese beinhaltet sowohl Aussagen über die reale Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit der Anlage sowie eine Bewertung der Bauteilqualität, vgl. [MAY08]. Zunächst wird der Verfügbarkeitsgrad quantifiziert. Anschließend wird die Prozessfähigkeit einer in-situ Konsolidierung anhand eines statistischen Modells aufgezeigt, sodass die Qualitätsverluste kontrollierbar sind. Die Leistungsverluste, wie z. B. kurzzeitig reduzierte Ablegegeschwindigkeiten, sind abhängig vom Maschinenkonzept, vgl. Kapitel 5.

#### 4.4.1 Verfügbarkeitsgrad der Anlagentechnik zur Tapeablage

##### *Availability factor of the tape placement equipment*

Neben den allgemeinen Ursachen für einen Maschinenstillstand, wie z. B. Wartungsarbeiten an Antrieben und Achssystemen, ergeben sich beim Tapelegen zahlreiche weitere Fehlerquellen. Hier sei beispielsweise fehlerhaftes Material oder ein notwendiger Spulenwechsel genannt. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Bänder einen entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit des Systems hat, vgl. [UZMA12]. Daher wird der Einfluss der Bandanzahl auf die Verfügbarkeit des Systems genauer untersucht.

In der industriellen Anwendung sind verschiedene Anlagenkonzepte – von der Mono-Tapeablage bis hin zu 16 oder 32 simultan abgelegten Faserhalbzeugen – vertreten, s. Kapitel 2.3.3. Dabei werden die Bandapplikatoren entweder parallel oder auch miteinander verkettet, z. B. hintereinander, angeordnet. Für die Berechnung der Verfügbarkeit spielt die genaue Anordnung keine Rolle, da sich für verkettete Ablegeeinheiten der Verfügbarkeitsgrad  $OEE_{\text{verfügbar}}$  aus dem Produkt aller Einzelverfügbarkeitsgrade berechnen lässt.

Wie in Kapitel 4.2 eingeführt, sei die Tapeanzahl im Laminat  $n_{\text{lam}}^T$  und  $n_{\text{sys}}^T$  sei die Anzahl der Tapes, welche vom Legesystem gleichzeitig abgelegt werden. Dann ergibt sich die Anzahl der Ablegevorgänge  $n_{\text{ab}}$  unter der Annahme, dass immer ein Vielfaches von  $n_{\text{sys}}^T$  pro Lage abgelegt wird, zu:

$$n_{\text{ab}} = \frac{n_{\text{lam}}^T}{n_{\text{sys}}^T} \quad (4.23)$$

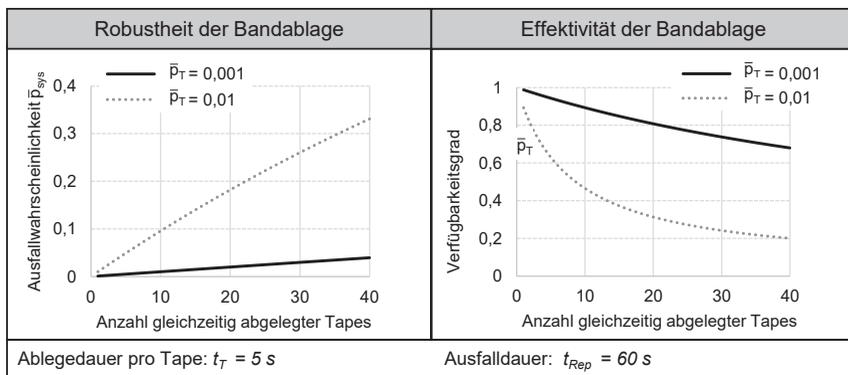
Mit der reinen Prozesszeit  $t_{\text{lam}}$  und der realen Fertigungszeit eines Laminats  $t_{\text{real}}$  sowie der Zeit für eine einzelne Ablegebewegung  $t_T$ , lässt sich der aus der Tapeablage entstehende Verfügbarkeitsgrad errechnen zu

$$OEE_{\text{verfügbar}} = \frac{t_{\text{lam}}}{t_{\text{real}}} = \frac{t_T n_{\text{ab}}}{t_T n_{\text{ab}} + t_{\text{Ausfall}}} \quad (4.24)$$

Mit der Ausfallwahrscheinlichkeit eines einzelnen Bandes  $\bar{p}_T$ , der Ausfallwahrscheinlichkeit für das Ablegesystem, bestehend aus mehreren unabhängigen Bandapplikatoren,  $\bar{p}_{Sys}$  und der Dauer eines Ausfalls eines Bandes  $t_{Rep}$  ergibt sich somit der Erwartungswert für die Ausfallzeit  $t_{Ausfall}$  zu

$$E(t_{Ausfall}) = t_{Rep} n_{ab} \bar{p}_{Sys} = t_{Rep} n_{ab} \left(1 - (1 - \bar{p}_T)^{n_{Sys}^T}\right) \quad (4.25)$$

In Abbildung 4.15 links ist die daraus resultierende Ausfallwahrscheinlichkeit des Bandablegesystems in Abhängigkeit der Bandanzahl abgebildet. Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bandes ist dabei exemplarisch mit  $\bar{p}_{T,1} = 1\%$  und  $\bar{p}_{T,0,1} = 0,1\%$  angenommen.



**Bild 4.15:** Prozessfähigkeit und Verfügbarkeitsgrad in Abhängigkeit der Bandanzahl  
*Influence of tape number on process capability and availability factor*

Der Grund für das Eintreten eines Stillstands muss nicht zwangsläufig ein fehlerhaftes Ereignis sein. Vielmehr führt bereits ein planmäßiger Spulenwechsel nach bspw. 100 bzw. 1000 abgelegten Bändern zu den exemplarischen angenommenen Ausfallwahrscheinlichkeiten. Der sich aus der Ausfallzeit ergebende Verfügbarkeitsgrad des Ablegesystems ist in Abbildung 4.15 rechts dargestellt. Dabei wird von einer Ausfalldauer je Ereignis  $t_{Rep} = 60$  s ausgegangen. Bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von  $\bar{p}_T = 1\%$  liegt bereits bei  $n_{Sys}^T = 9$  die Verfügbarkeit des Ablegesystems unter 50%. Zusätzlich sind Rüstzeiten, z. B. zum Entformen des Laminats, zu berücksichtigen. Während des Anlagenstillstands, z. B. wegen eines Rüstvorgangs oder dem Austausch einer Spule, sind alle Bandapplikatoren, also  $n_{Sys}^T$ , unproduktiv. Die Verfügbarkeit der Bandablegeeinheit muss zusätzlich noch mit der Verfügbarkeit des sonstigen Maschinensystems multipliziert werden, um die Gesamtanlagenverfügbarkeit zu erhalten.

Es lässt sich daher festhalten, dass insbesondere bei hoher Tapeanzahl die Rüst- und Wartungszeiten stark minimiert werden müssen, um hohe Verfügbarkeitswerte und

eine gute Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Dies erfordert weitere aufwändige Peripheriesysteme, wie z. B. wechselbare Werkzeugformen oder automatisch austauschbare Spulen- bzw. Spleißeinheiten. Diese komplexen und investitionsaufwändigen Anlagensysteme bieten insbesondere bei kleineren Bauteilen aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Diskretisierungseffekte nur eine begrenzte Steigerung der Produktivität. Es ist deshalb ein möglichst einfach skalierbares Maschinensystem zu entwickeln, welches zusätzlich über eine hohe Prozess- und Anlagenstabilität verfügt.

#### 4.4.2 Modellierung der Prozessstabilität der in-situ Konsolidierung

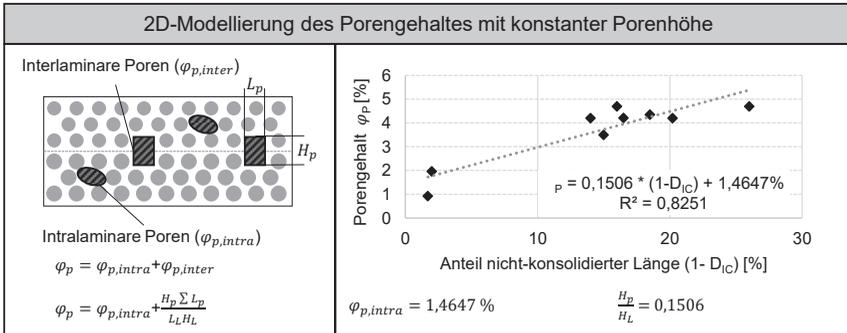
##### *Modelling of the process stability of the in-situ consolidation*

Die Prozessfähigkeit des Tapelegens mit in-situ Konsolidierung ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Dabei wird meistens der Porengehalt als kritische Prozessgröße herangezogen. In der Luftfahrt hat sich ein zulässiger Porengehalt von  $\varphi_P = 2\%$  etabliert [KAUF08]. Neben dem durchschnittlichen Porengehalt ist für eine industrielle Fertigung aber insbesondere eine Gleichmäßigkeit der Porenverteilung notwendig, um lokale Defekte auszuschließen. Daher wird nachfolgend ein statistisches Modell für die Entstehung von Poren erstellt, anhand dessen sich die generelle Prozessfähigkeit der in-situ Konsolidierung vorhersagen lässt.

##### **Eigenschaften der Poren**

Im Wesentlichen wird die Qualität des Laminats durch Poren, die sich während des Konsolidierungsprozesses ausbilden, bestimmt. In etablierten Fertigungsverfahren werden diese Poren in einem der Tapeablage nachgeschalteten Prozess eliminiert bzw. verringert. Generell ist zwischen intralaminaren Poren, also Fehlstellen im Tape, die während der Imprägnierung entstehen, und interlaminaren Poren zu unterscheiden. Letztere entstehen maßgeblich durch den Tapelegeprozess bei der Laminatherstellung, s. Kapitel 4.2.2. Zunächst soll eine Aussage über die Häufigkeit und Größe der interlaminaren Poren getroffen werden. In der Literatur lassen sich verschiedene Untersuchungen für den Porengehalt von Laminaten, insbesondere für PEEK/CF, finden, vgl. [DIFR17; DIFR16; GROU12; COGS92].

Um den Anteil der interlaminaren Poren  $\varphi_{p,inter}$  zu bestimmen, lässt sich auf die Messungen der nicht konsolidierten Fläche zwischen zwei Tapelagen in der genannten Literatur zurückgreifen. Aus dem Anteil der nicht konsolidierten Fläche lässt sich der Kontaktanteil  $D_{IC}$ , vgl. Kapitel 4.2, berechnen. Betrachtet man nun den Zusammenhang zwischen diesem Kontaktanteil und Porengehalt  $\varphi_p$ , so ergibt sich annäherungsweise ein linearer Zusammenhang, s. Modell in Abbildung 4.16. Dies impliziert, dass die Höhe der interlaminaren Poren annähernd konstant ist und sich lediglich ihre Ausdehnung bzw. Anzahl in der Laminebene ändert.



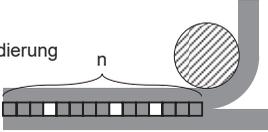
**Bild 4.16:** Modellierung der Porenverteilung mit Unterscheidung zwischen interlaminaen und intralaminaren Poren; Datenquellen: [DIFR17; DIFR16; GROU12; COGS92].

*Modelling of void distribution considering both interlaminar and interply voids*

Der intralaminare Porengehalt, der vom Tapelegeprozess mit in-situ Konsolidierung nicht beeinflussbar ist, beträgt als Ergebnis einer linearen Regression  $\varphi_{p,intra} = 1,465\%$ , was innerhalb des in der Datenbasis angegebenen Konfidenzintervall von  $\varphi_p = 1,3 \pm 0,18\%$  liegt, vgl. [DIFR16]. Daraus lässt sich errechnen, dass die Höhe der interlaminaen Poren ca. 15% der Schichtdicke beträgt. Für ein 0,15 mm dickes Tapematerial ergibt sich damit eine Porenhöhe in der Fügezone von  $H_p = 22,5 \mu m$ . Dies entspricht dem dreifachen Faserdurchmesser von Kohlenstofffasern und liegt damit in der Größenordnung der in Schlißbildern zu findenden Poren.

### Statistische Modellierung der Porenentstehung

Für eine statistische Modellierung der Prozessqualität wird angenommen, dass alle interlaminaen Poren dieselben Abmaße besitzen und die Porenlänge der Porenhöhe entspricht. Ferner sei die Porenbreite gleich der Tapebreite. Unter der Annahme, dass die Entstehung der diskreten Poren zufällig und voneinander unabhängig abläuft, ist die Anzahl  $Y$  von unabhängig auftretenden Fehlern beim Konsolidieren zweier Tapes, bestehend aus  $n$  Fügstellen der oben genannten Abmaße, binomialverteilt mit dem Parameter  $p$ , der die Einzelwahrscheinlichkeit einer Porenbildung an einer Stelle angibt. Das sich daraus ergebende statistische Modell ist in Bild 4.17 dargestellt.

Statistische Porenentstehung	Approximation der Porenbildung als Poisson-Prozess
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p><input type="checkbox"/> Pore</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Konsolidierung</p> </div>  </div> <p>Binomialverteilung für <math>Y = k</math> Fehler:</p> $P(Y = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$	<p>Näherung für kleine Wahrscheinlichkeiten mit <math>\lambda = np</math> und <math>p</math> nahe 0</p> $P(X = k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!}$ <p><math>\sigma = \sqrt{\lambda}</math></p> <p>Fehlerwahrscheinlichkeiten <math>P</math> für Qualitätsniveaus:</p> <p><math>6\sigma: 9,87 \cdot 10^{-10}</math></p> <p><math>7\sigma: 1,28 \cdot 10^{-12}</math></p>

**Bild 4.17:** Statistische Modellierung der Porenentstehung bei in-situ Konsolidierung als Poisson-Prozesses  
*Statistic modelling of void propagation during in-situ consolidation utilizing a Poisson process*

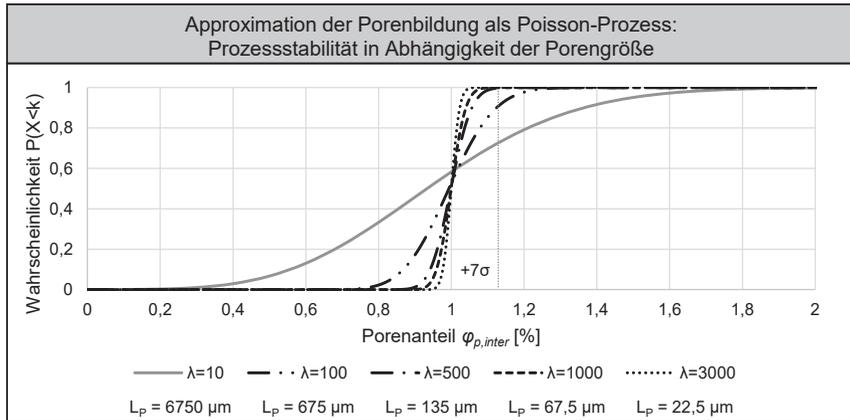
Damit lässt sich die Porenentstehung im Tapelegeprozess als eindimensionaler stationärer Prozess abbilden. Für kleine Wahrscheinlichkeiten  $p$  lässt sich der Konsolidierungsprozess als Poisson-Prozess modellieren. Nach [HENZ10, S. 189–191] gilt damit approximativ für die Wahrscheinlichkeit  $P(X = k)$ , dass genau  $k$  Poren im Tapelegeprozess auftreten:

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!} \tag{4.26}$$

wobei  $X$  die Anzahl der auftretenden diskreten Poren ist und die Binomialvariable  $Y$  approximiert. Der Poisson-Parameter  $\lambda$  ist der Erwartungswert von  $X$ , also die zu erwartende mittlere Anzahl der auftretenden Poren pro abgelegter Tapelänge. Basierend auf dem zuvor genannten Beispiel sei die Porenlänge gleich der Porenhöhe  $H_P = L_P = 22,5 \mu\text{m}$  sowie  $\varphi_{p,inter} = 1 \%$ . Damit ergibt sich der Erwartungswert zu  $\lambda \approx 2963$  [Poren/(1m Tape)] und die Auftrittswahrscheinlichkeit errechnet sich zu  $p \approx 0,067$ . Ziel ist nun die Abschätzung, wie robust die Verteilung der Poren im Prozess ist. In einem Modellbeispiel bestehe ein typisches Bauteil aus bis zu 1000 einzelnen Tapes. Das geforderte Qualitätsniveau des Bauteils sei  $6\sigma$ . Dann muss die Prozessqualität des Konsolidierungsprozesses um den Faktor  $10^3$  größer sein. Nach Abbildung 4.17 muss diese somit im Bereich von  $7\sigma$  liegen.

Die Poisson-Verteilung des Einzelprozesses ermöglicht nun, die Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteils abzuschätzen. Um die Effekte unterschiedlicher Porengrößen zu illustrieren, ist in Abbildung 4.18 für den hier betrachteten Fall die Prozessstabilität in Abhängigkeit der Porengröße dargestellt. Ein Erwartungswert von  $\lambda = 10$  bedeutet, dass die Poren so groß sind, das bereits 10 Poren zu einem Porengehalt von  $\varphi_{p,inter} = 1 \%$  führen. Es zeigt sich also, dass bei kleiner Porengröße, was einem hohen Erwartungswert  $\lambda$  entspricht, die Streuung des Prozesses sehr gering ist. So lässt sich

für  $\lambda = 3000$ , was in etwa der Porengröße von  $H_P = L_P = 22,5 \mu\text{m}$  entspricht, und einem mittleren Porengehalt von  $\bar{\varphi}_{p,inter} = 1\%$  ein maximal zulässiger Porengehalt von  $1,13\%$  mit einer Prozessstabilität von  $7\sigma$  erreichen.



**Bild 4.18:** Approximation der in-situ Konsolidierung als Poisson-Prozess unter Berücksichtigung verschiedener Porengrößen

*Approximation of the in-situ consolidation as Poisson process taking into account different sizes of void*

In grober Näherung lassen sich so auch Fehler höherer Ordnung abschätzen. So ergibt sich der Erwartungswert für die Anzahl von zwei direkt benachbart auftretenden Poren zu  $n * p^2$ . Im betrachteten Zahlenbeispiel mit  $L_P = 22,5 \mu\text{m}$  gilt bereits für das Auftreten von vier benachbarten Poren, was einer unkonsolidierten Länge von  $L_{P,4} = 90 \mu\text{m}$  entspricht, ein Erwartungswert von  $\lambda_4 < 1$ , sodass ein Eintreten unwahrscheinlich ist.

Dieses Modell zeigt, dass zufällig auftretende Poren im Konsolidierungsprozess kein Problem für einen stabilen Prozess darstellen, sofern es sich um kleine Poren in hoher Anzahl handelt. Der Prozess muss so gestaltet sein, dass keine großen unkonsolidierten Bereiche entstehen. Dies bedeutet, dass ein möglichst konstanter Prozessablauf gewährleistet werden muss.

Damit ist sowohl für den Verfügbarkeitsgrad als auch für die Qualitätsverluste anhand theoretischer Modelle nachgewiesen, dass das Tapelegen mit in-situ Konsolidierung prinzipiell einen robusten Prozess mit wirtschaftlicher OEE ermöglicht. Dies ist im weiteren Verlauf experimentell zu validieren.

## 4.5 Fazit der Modellbildung

### *Conclusion of modelling*

Die Betrachtung der Prozesskette aus Sicht des Wertschöpfungsmanagements hebt die Bedeutung der Auswahl des Halbzeugs hervor. Im Sinne einer hohen Flexibilität bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit sollte die Halbzeugproduktion vor den Entkopplungspunkten der Wertschöpfungskette liegen, nach denen eine diskrete Bauteilfertigung stattfindet. Dies wird durch die Wahl von unidirektionalen Tapes in besonderem Maße erfüllt. Bei der Weiterverarbeitung von FVK-Halbzeugen sind aufgrund des vorgestellten endogenen Leichtbaueffekts additive Verfahren zu bevorzugen.

Grundlage für eine Optimierung der gesamten Prozesskette bilden die erarbeiteten physikalischen Modelle der einzelnen Prozessschritte Imprägnieren, Ablegen und Temperieren. Bei gegebenen Materialparametern hat die Halbzeugdicke einen entscheidenden Einfluss. Da die gewählte Halbzeugdicke die Prozesszeit der einzelnen Schritte gegenläufig beeinflusst, ist eine globale Optimierung der Prozesskette erforderlich. Ein quantitatives Beispiel verdeutlicht, dass die Steigerung der Ablageproduktivität die Verwendung von dünneren Tapes wirtschaftlich macht. Bezüglich der Effizienz des Materialeinsatzes sind schmale Halbzeuge zu bevorzugen. Zusätzlich bietet das Tapelegen mit in-situ Konsolidierung großes Potenzial, die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Stapeln von Tapes mit Nachkonsolidierung zu erhöhen.

Neben den theoretischen Modellen zur Berechnung der Prozessdauer und Produktivität werden potentielle, real auftretende Anlagenverluste durch eine Abschätzung der Gesamtanlageneffektivität berücksichtigt. Für eine hohe Verfügbarkeit des Systems bei hoher Flexibilität und Produktivität lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Einfache Skalierbarkeit der Tapeanzahl, z. B.  $n_{sys}^T = 1-10$
- Große Flexibilität bzgl. der zu verarbeitenden Tapeabmaße (Breite und Dicke)
- Robustes und kostengünstiges Maschinensystem (einfach vervielfältigbar)
- Hohe Ablageproduktivität, z. B. durch Verringerung von Nebenzeiten

Um hohe Qualitätsverluste ausschließen zu können, ist die in-situ Konsolidierung in einem statistischen Prozessmodell abgebildet, das einen stabilen Prozess bei konstanten Prozessbedingungen vorhersagt. Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen für die Prozess- und Systemgestaltung:

- Konstante Prozessparameter, insbesondere Erwärmung und Druckverteilung
- Vermeidung von Geschwindigkeitsschwankungen
- Konstante Materialeigenschaften

Auf Basis dieser Kriterien wird ein entsprechendes Maschinensystem zur experimentellen Validierung der Modellergebnisse aufgebaut. Dieses ist in Kapitel 5 beschreiben.



## 5 Entwicklung einer Produktionsanlage zur Laminatfertigung

### *Development of a production machine for the manufacturing of laminates*

Die Modellierung verschiedener Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen aus Thermoplast-FVK zeigt, dass die Ablage von UD-Tapes mit in-situ Konsolidierung ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bietet. Für das Erreichen einer hohen Prozessstabilität sind möglichst robuste Einzelsysteme erforderlich. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass wenige Systeme zur in-situ Tapeverarbeitung existieren. Diese sind meist auf eine Fertigung von 3D-Bauteilgeometrien ausgerichtet. Daher soll im Folgenden eine Systemtechnik erforscht werden, die für die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten, ebenen Laminaten optimiert ist. Ziel ist es, die Flexibilität, die der Lagenaufbau aus Tapes bietet, mit der hohen Wirtschaftlichkeit einer kurzen, integrierten Prozesskette zu verknüpfen.

Dazu werden gemäß VDI 2221 aus den gewonnenen Erkenntnissen die Anforderungen definiert und Lösungen für die einzelnen Funktionen ermittelt [VDI93]. Für die wesentlichen Module, d. h. Schneiden und Tapezufuhr sowie Erwärmung und Konsolidierung, werden die ausgewählten Lösungen zunächst anhand von Prüfständen validiert. Alle Einzellösungen werden zu einer Gesamtanlage zusammengefügt, welche die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ermöglicht.

### 5.1 Konzeption der Anlagentechnik

#### *Conceptual design of the production machine*

Die Konzeption der Anlagentechnik umfasst zunächst die Definition der Anforderungen und schließt mit der Auswahl von Funktionen und möglichen Lösungsprinzipien ab. Wesentlicher Aspekt der Konzeption ist dabei, einen einfachen und robusten Prozess der Tapeablage mit in-situ Konsolidierung zu ermöglichen. Daher sind technische Lösungen zu finden, die eine integrierte Realisierung der Prozessschritte Ablegen und Konsolidieren in einer Anlage erlauben.

#### 5.1.1 Anforderungsdefinition

##### *Definition of requirements*

Der Zweck der Anlage ist die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus thermoplastischen Tapes. Der Fokus soll auf einem robusten Konsolidierungsprozess liegen, der gute Laminatqualitäten ohne Nachkonsolidieren ermöglicht. Gleichzeitig soll die Anlagentechnologie eine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit besitzen. Die abgeleiteten Anforderungen an eine wirtschaftliche Fertigung, kurze Nebenzeiten, Ablage mehrerer Tapes und geringer Verschnitt bei gleichzeitig geringen Investitionskosten sind zu berücksichtigen. Die grundlegenden Anforderungen sind in der Anforderungsliste, Tabelle 5.1, zusammengefasst.

**Tabelle 5.1:** Anforderungsliste*List of Requirements*

F/W*	Nr.	Anforderungen an die Anlage zur Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten	Zielwert
		<u>Allgemeines</u>	
F	1.1	Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus UD-Tapes mittels in-situ Konsolidierung	
F	1.2	Einfache Skalierbarkeit und hohe Flexibilität bei geringen Investitionskosten	
W	1.3	Reduzierte Nebenzeiten und hohe Robustheit	
		<u>Geometrie</u>	
F	2.1	Zusammenhängendes Maschinensystem mit geringem Flächenbedarf	$2 \times 4 \text{ m}^2$
F	2.2	Standard Laminatgröße zur Weiterverarbeitung im Thermoformen	Min. $500 \times 500 \times 3 \text{ mm}^3$
W	2.3	Maßgenauigkeit des Laminats	$\pm 1 \text{ mm}$
F		<u>Kinematik:</u>	
F	3.1	Theoretische Verfah- und Ablegegeschwindigkeit $v_T$	$1 \text{ m/s}$
F	3.2	Beschleunigung	$10 \text{ m/s}^2$
W	3.3	Genauigkeit der Achsen zur Positionierung und Winkelorientierung des Laminats	$0,1 \text{ mm}$ bzw. $0,1^\circ$
		<u>Kräfte</u>	
F	4.1	Ausreichende Andruckkraft zur Herstellung des Lagenkontakts (Konsolidierungsdruck $p_c$ )	$1 \text{ bar}$
		<u>Gewicht</u>	
W	5.1	Reduzierung der bewegten Massen	
		<u>Stoff</u>	
F	6.1	Vollständig imprägnierte CF- und GF-Tapes	
F	6.2	Matrixmaterial: z. B. PP, PE, PA; Daraus resultierende max. Verarbeitungstemperatur $T$	$300 \text{ }^\circ\text{C}$
W	6.3	Standardisierte Tapebreite $b_T$	z. B. $25 \text{ mm}$
W	6.4	Tapedicke $h_T$	$0,1\text{--}0,4 \text{ mm}$
W	6.5	Faservolumengehalt $\varphi_f$	bis $55 \%$
F	6.5	Skalierbare Tapeanzahl $n_T^{\text{sys}}$	mind. $3$
		<u>Energie</u>	
F	7.1	Ausreichende Prozessenergie für Konsolidierung bei $v_T$	$> 200 \text{ mm/s}$
F	7.2	Einsatz von elektrischer Energie, Druckluft, Kühlwasser und deren energieeffizienter Verwendung	
		<u>Sicherheit</u>	
F	8.1	Berücksichtigung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG	

Die Anforderungen sind dabei nach den von PAHL/BEITZ empfohlenen Hauptmerkmalen strukturiert [PAHL07, S. 220]. Alle für den Prozess notwendigen Komponenten sollen in die Anlage integriert sein. Dies beinhaltet auch die Kinematik und die Steuerung. Die Freiheitsgrade eines Industrieroboters sind nicht erforderlich, sodass nicht nur ein Endeffektor entwickelt werden soll. Die konkreten Anforderungen an die einzelnen Module sind vom gewählten Anlagenkonzept abhängig. Die Erarbeitung und Spezifizierung des Konzeptes wird in den anschließenden Kapiteln genauer beschrieben.

### 5.1.2 Funktionen und Lösungsprinzipien

#### *Functions and solution principles*

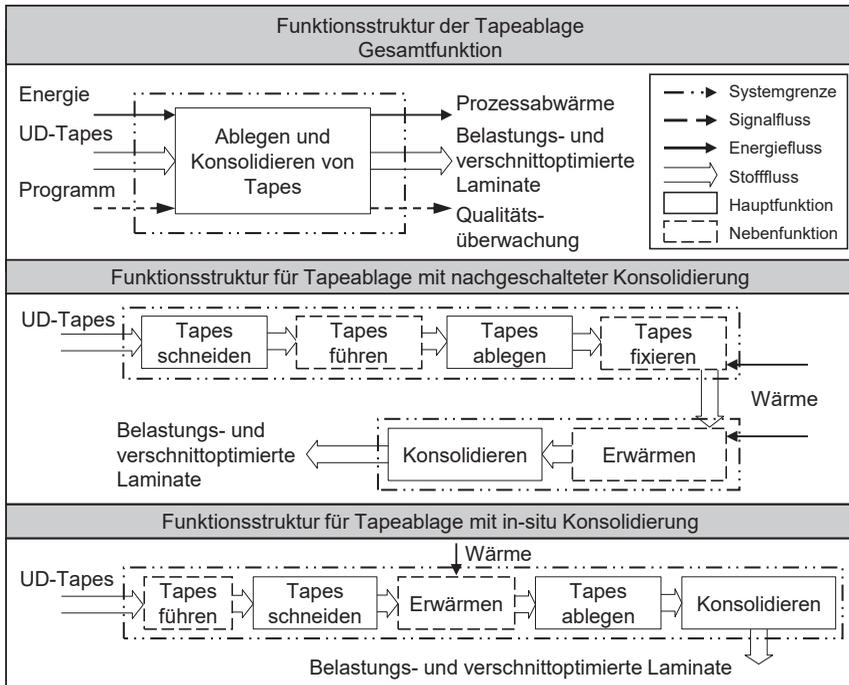
Gemäß dem methodischen Vorgehen zur Anlagenentwicklung werden zunächst die einzelnen Funktionen der Anlage ermittelt und zu verschiedenen Funktionsstrukturen zusammengefügt. Für die gewählte Funktionsstruktur der in-situ Ablage werden anschließend einzelne technische Lösungen konzipiert und theoretisch sowie experimentell validiert bzw. bewertet. Auf eine umfassende Dokumentation der möglichen Funktionsstrukturen sowie verschiedener Konzepte und deren Bewertung soll hier verzichtet werden.

Grundsätzlich dienen alle Funktionen der Erfüllung des Zwecks der Anlage. Dieser lässt sich formulieren als *flexible und skalierbare Fertigung von ebenen belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus thermoplastischen UD-Tapes*. Aus dem Zweck lässt sich die Gesamtfunktion der Anlage ableiten, s. Bild 5.1. Der Hauptfluss ist dabei das UD-Tape, welches zu Laminaten verarbeitet wird. Dazu werden Prozessenergie und Steuersignale, z. B. zur Definition des Lagenaufbaus, benötigt.

Die Gesamtfunktion lässt sich in die wesentlichen Hauptfunktionen *Schneiden*, *Ablegen* und *Konsolidieren* unterteilen. Je nach Variation der Funktionsstruktur sind verschiedene Nebenfunktionen, wie z. B. *Erwärmen* oder *Fixieren*, notwendig.

In Bild 5.1 ist sowohl die Funktionsstruktur für eine Tapeablage mit in-situ Konsolidierung als auch mit nachgeschalteter Konsolidierung abgebildet. Die in-situ Konsolidierung führt zu einer kürzeren Prozesskette aufgrund der Elimination der Hilfsfunktion *Fixieren*. Tapeablage und Konsolidierung finden in einem Schritt statt, sodass die gesamte Prozesskette der Laminatherstellung in einer Anlage abgebildet werden kann.

Zu den einzelnen Funktionen werden verschiedene physikalische Wirkprinzipien und deren technische Abbildung in Funktionsträgern ermittelt. Diese sind für die ausgewählten Funktionen in einem morphologischen Kasten, Tabelle 5.2, dargestellt. Der Stofffluss beginnt mit der Bereitstellung von Tapes auf Spulen oder Bobbins. Um die notwendigen Beschleunigungsvorgänge des Materials während der Ablage zu vereinfachen, wird teils ein Zwischenspeicher eingesetzt. Der eigentliche Antrieb des Tapes erfolgt häufig mittels Reibung. Dabei werden sowohl einfache Rollenpaare (Linienkontakt), umschlungene Rollen sowie flächige Bandabzüge eingesetzt. Das Trennen des Tapes während der Ablage kann entweder mechanisch, d. h. durch Scherschneiden bzw. ultraschallangeregte Messer, oder mittels Laserstrahlschneiden erfolgen.



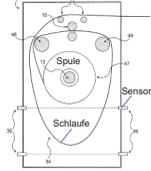
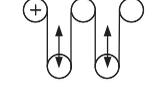
**Bild 5.1:** Gesamtfunktion und variierte Funktionsstrukturen für die Tapeablage  
*Overall function and different function structures for tape placement*

Sowohl das Eingangs- als auch Ausgangsmaterial liegen in festem Zustand vor. Für den Fügevorgang ist ein reversibles Aufschmelzen mit anschließender Erstarrung notwendig. Dem Aufschmelzprozess kommt eine besondere Bedeutung zu, da sich durch die Wahl der Erwärmungstechnologie maßgeblich die Anlageneigenschaften beeinflussen lassen. Zu der Auswahl der Wärmequelle liegen zahlreiche Literaturbetrachtungen vor, vgl. [STIM14, S. 22–24]. Im Wesentlichen kommen Ultraschall, Heißgas sowie Laser- oder Infrarotstrahlung als Erwärmungstechnologien in Frage. In dieser Arbeit soll eine in-situ Konsolidierung bei Ablegegeschwindigkeiten  $v_T > 200 \text{ mm/s}$  realisiert werden, sodass die Wärmequelle entsprechend auszulegen ist.

Die Position und Orientierung der einzelnen Tapebahnen sowie die Ablegebewegung kann über Portalsysteme oder Robotersysteme erfolgen. Grundsätzlich ist dabei zu unterscheiden, ob sich das Werkstück oder das Tapelegesystem bewegt. Die eigentliche Tapeablage auf das Werkstück erfolgt entweder translatorisch oder in einer Abrollbewegung. Die Prozesszone ist dementsprechend entweder flächig oder als Linienkontakt mit Zwickelbereich ausgeprägt. Neben der reinen Positionierung ist bei der Ablage eine Prozesskraft aufzubringen, um die notwendige Konsolidierung zu erreichen. Zusätzlich muss eine Abkühlung des Materials unter Erstarrungstemperatur sichergestellt werden.

**Tabelle 5.2:** Morphologischer Kasten zur Konzeptentwicklung

*Morphological box for conceptual design*

Funktionen		Wirkprinzipien und Funktionsträger					
		1	2	3	4	5	6
1	Tapes speichern und zwischenspeichern (Reduktion der Massenträgheit)	Schlaufen [CRAM08] 		Tänzer 		Welle 	Spule
		2	Tape führen	Schiene	Nuten	Ballige Rolle	Luftdruck/ Vakuum
4	Tapes fördern	Gravitation 	Reibung 	Seilreibung 	Flächenreibung 	Form- & Kraftschluss 	
3	Tapes trennen	Scherschneiden	Ultraschallschneiden	Laserschneiden			
5	Tape erwärmen	Heißgas	Joulesche Wärme / Induktion	Mikrowelle	Reibung / Ultraschall	Laserstrahlung	Infrarotstrahlung
6	- Ablegebewegung - Kinematik - Bewegungsprinzip	Rolle	Linearachse	Portal-system	Serieller Roboter	Bewegter Applikator	Bewegte Ablegeform
7	Tape konsolidieren	Schuh / Platte 	Starre Rolle 	Doppelband 	Flexible Rolle 	Zylinderrollenteppich 	

Je nach Bauteilgeometrie und Prozessgeschwindigkeit können starre oder flexible Andruckrollen oder flächige Systeme verwendet werden. Ein einfacher Andruckschuh hat aufgrund der entstehenden Reibung Nachteile, die sich durch den Einsatz bewegter Andruckbänder oder Rollenteppiche vermeiden lassen.

Zu den hier vorgestellten Prinzipien existieren zusätzlich zahlreiche Varianten, sodass sich ein großer Lösungsraum ergibt. So lassen sich alleine bei der Erwärmung mittels Laserstrahlung verschiedene Konzepte nennen, wie z. B. Dioden- und CO<sub>2</sub>-Laser oder VCSEL [PETE17; KERM15; STIM14]. Die Wirkprinzipien werden zu möglichen Konzepten kombiniert. Die Grundlage der Konzeptbewertung ist es dabei, ein möglichst

einfaches System und einen robusten Prozess zu realisieren. Die ausgewählten Wirkprinzipien werden anschließend in gestaltete Module überführt und validiert. Dazu wird auf die in Kapitel 4 ermittelten Prozessmodelle zurückgegriffen.

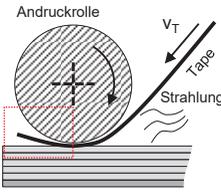
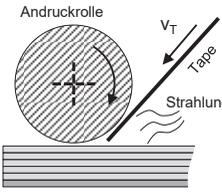
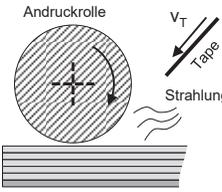
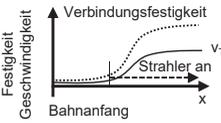
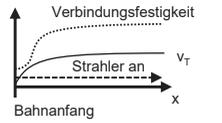
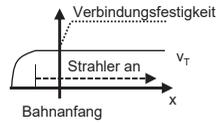
**5.1.3 Kombination zu Konzepten**

*Synthesis of concepts*

Die zuvor vorgestellten Wirkprinzipien für die einzelnen Funktionen lassen sich zu verschiedenen Gesamtkonzepten kombinieren. Um den Anforderungen eines einfachen, robusten Prozesses bei guter Skalierbarkeit gerecht zu werden, wird zunächst eine entsprechende Prozessführung ausgewählt. Anschließend werden die Konzepte weiter konkretisiert, bevor die einzelnen Module entwickelt werden, s. Kapitel 5.2.

**Allgemeine Prozessführung**

Systeme zur Tapeverarbeitung mit in-situ Konsolidierung verfügen meist über eine Andruckrolle, um auch komplexere Geometrien fertigen zu können, s. Kapitel 2.3.3. Bei der Herstellung von ebenen Laminaten treten hingegen keine Änderungen der geometrischen Randbedingungen, wie z. B. beim Umfahren von Radien oder asymmetrischen Wickelgeometrien, auf. Die wesentliche Herausforderung ist hingegen die Prozessführung beim Starten und Stoppen am Bahnanfang bzw. -ende. An diesen Stellen liegt ein instationärer Prozess vor, bspw. für die Erwärmung des Tapes. Dieser erfordert eine Anpassung der Prozessparameter, die sich aber nur schwerlich in der vorhandenen Zeit regeln lassen. Eine bekannte Prozessführung für den Start einer Bahn ist das Vorschieben eines nicht erwärmten Tapes. Die Andruckrolle wird auf das kalte Tape abgesetzt, sodass keine Konsolidierung am Bahnanfang erzielt wird, s. Bild 5.2.

	Ablegen ohne konsolidierte Tape-Enden [FORB13] 	Startprozess mit instationärem Erwärmungsprozess [BERE02]	Synchronisierter Startprozess mit stationärer Erwärmung (Gewähltes Konzept)
Startposition			
Prozess			

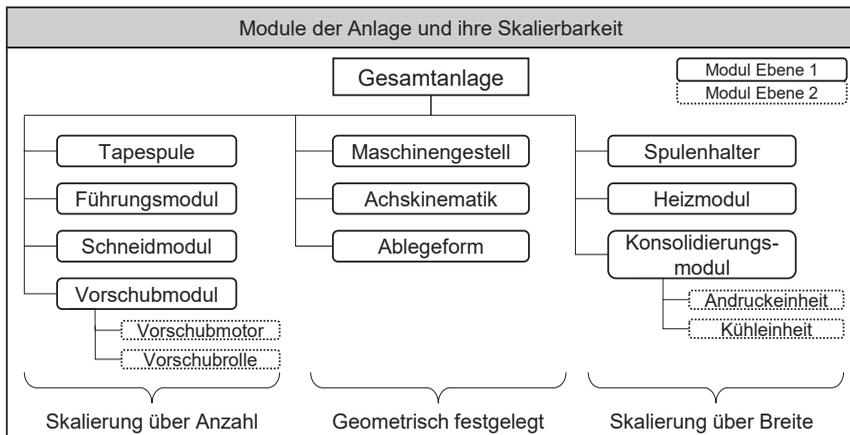
**Bild 5.2:** Prozessführung zu Beginn einer Tape-Bahn, vgl. [BERE02, S. 82; FORB13] *Starting sequence of tape path*

BERESHEIM beschreibt einen verbesserten Prozess, bei dem zunächst die Rolle abgesetzt wird und das Tape bis zum Zwickelpunkt vorgeschoben wird. Das Tape wird somit bereits an seiner Schnittkante erwärmt, jedoch sind keine genauen Angaben zu den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnissen bekannt. [BERE02, S. 81] Bei Beschleunigung des Tapes und gleichzeitiger Erwärmung liegt jedoch ein instationärer Prozess vor. Die Konsolidierungsqualität am Bahnanfang ist daher nicht optimal. Für einen einfachen und robusten Prozess ist es somit erforderlich, dass das Tape in der kompletten Erwärmungszone und Konsolidierungsstrecke mit konstanter Geschwindigkeit abgelegt wird, s. Bild 5.2 rechts.

Dieser Prozessablauf soll in dieser Arbeit umgesetzt werden. Dazu ist ein mit der Ablegekinematik synchronisierter Antrieb des Tapes erforderlich, da das Tape sowohl Geschwindigkeits-synchron als auch am richtigen Zeitpunkt bzw. Ort des Bahnanfangs mit dem Substrat in Kontakt treten muss.

### Skalierbarkeit des Materialdurchsatzes

Die einfache Skalierbarkeit der Ablegerate wird über eine Aufteilung des Systems in verschiedene Module realisiert. In Kapitel 4.2.2 wurde bereits die Möglichkeit einer Produktivitätssteigerung durch die Skalierung der Anzahl an gleichzeitig verarbeiteten Tapes und der Tapebreite diskutiert. Die entsprechende Modulaufteilung ist in Bild 5.3 dargestellt. Prinzipiell lässt sich der Aufbau danach unterscheiden, ob ein Ablegemodul mehrere Tapes verarbeiten kann oder ob mehrere, identische Einzelablegemodule mit je einer Andruck- und Heizeinheit verwendet werden. Zur Vermeidung von Randeffekten müssen Heizeinheit und Andruckrolle breiter als das Tape dimensioniert werden, vgl. Kapitel 5.2.1. Daher ergeben sich bei einem Mehrfachmodul mit nur einer Heiz- und Andruckeinheit Kostenvorteile gegenüber mehreren Einzelsystemen.



**Bild 5.3:** Modulare Gestaltung der Anlage und Skalierung der einzelnen Module  
*Modular structure of the system and its scalability*

Einige Module, wie z. B. das Maschinengestell und die Ablegeform sind nicht direkt von der Tapebreite und -anzahl abhängig, sondern werden vielmehr über die zu fertigende Bauteilgröße geometrisch festgelegt.

Die Auslegung der Module wird methodisch auf den Grundlagen der physikalischen Prozessmodelle, vgl. Kapitel 2 und Kapitel 4, durchgeführt. Zusätzlich werden die wesentlichen Module und Funktionen, d. h. *Führen* und *Schneiden*, *Erwärmen*, *Konsolidieren* und *Ablegen*, in Versuchen experimentell validiert.

## 5.2 Methodisches Gestalten und Validierung der Hauptmodule

### *Methodical design and validation of the main modules*

Die gegliederten einzelnen Module sollen so gestaltet werden, dass eine optimale Prozessführung möglich ist. Für die Gestaltung jedes wesentlichen Moduls wird dazu ein methodisches Vorgehen angewandt, das die theoretischen Anforderungen in physikalische Wirkprinzipien überträgt. Als Grundlage dazu dienen Prozesssimulationen und Berechnungen, die auf den in Kapitel 4.2 vorgestellten Modellen beruhen.

### 5.2.1 Heizmodul

#### *Heating module*

Bei einer allgemeineren Bewertung von Heizquellen für die in-situ Konsolidierung wird oft die Laserstrahlung als optimale Technologie ausgewählt. Insbesondere eine schnelle Regelbarkeit, die hohe Prozessgeschwindigkeiten bei der Fertigung von 3D-Konturen ermöglicht, und eine hohe Energieintensität machen den Laser für viele Anwendungen zur bevorzugten Wärmequelle. Gleichzeitig jedoch betragen die notwendigen Investitionskosten mehr als das Zehnfache eines Infrarotstrahlers, vgl. [STIM14, S. 23]. Führt man diese Bewertung für die vorliegenden Anforderungen einer einfachen Prozessführung, s. Kapitel 5.1.3, durch, verlieren die Bewertungskriterien schnelle Regelbarkeit und hohe Intensität an Bedeutung, da nur 2D-Strukturen mit konstanter Einstrahlgeometrie und konstanten Prozessgeschwindigkeiten adressiert werden. Heißgas wird aufgrund des zusätzlich notwendigen Energie- bzw. Stoffträgers ausgeschlossen, sodass elektrisch betriebene IR-Strahler die bevorzugte Lösung sind. Die Erwärmung von Tapes mit IR-Strahlern soll daher im Folgenden genauer betrachtet werden.

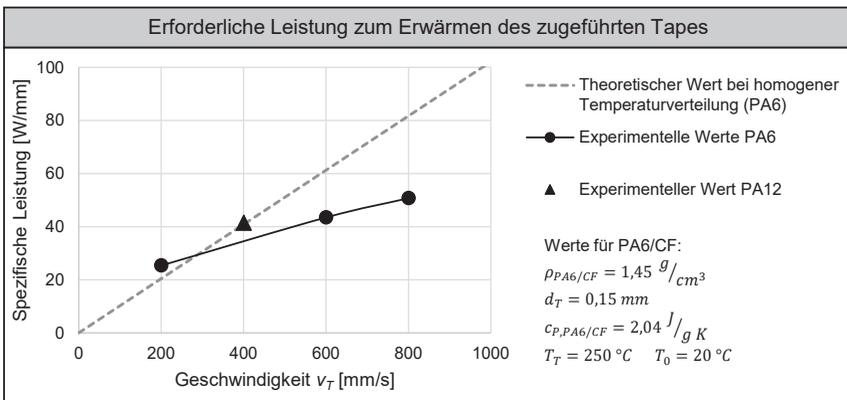
Beim Durchlaufen der Strahlerzone wird einseitig der Wärmestrom  $\dot{Q}$  in das Tape eingekoppelt. Nach GROUVE ist dabei die Wärmeleitung in Ablegerichtung wegen der hohen Geschwindigkeit, mit der das Tape die Strahlerzone durchläuft, vernachlässigbar. Ebenso können bei über der Tapebreite konstanter Intensitätsverteilung Randeffekte vernachlässigt werden, sodass einzig der Temperaturgradient in Dickenrichtung den Prozess dominiert [GROU12, S. 30]. Prinzipiell sind damit bekannte Modelle der Lasermaterialbearbeitung auf den Tapelegeprozess anwendbar. Aufgrund des kontinuierlich bewegten Materials werden jedoch nicht die Parameter Fluenz und Pulsdauer verwendet. Vielmehr ergeben sich diese aus der Einstrahllänge, der Ablegegeschwindigkeit und der auf das Tape projizierten Intensität. Für die Auslegung des IR-Strahlers

ist somit eine homogene Intensitätsverteilung senkrecht zur Ablegerichtung sowie der spezifische Wärmestrom bezogen auf die Tapebreite  $\dot{Q}/b_T$  maßgebend.

Die notwendige spezifische Leistung des Heizmoduls lässt sich unter Annahme einer vollständigen Erwärmung mit homogener Temperatur über die gesamte Tapedicke, wie es nur bei langsamen Prozessgeschwindigkeiten annähernd der Fall ist, nach oben abschätzen zu:

$$\frac{\dot{Q}}{b_T} = \rho c_p h_T v_T (T_T - T_0) \quad (5.1)$$

Mit den Materialwerten für PA6/CF und einer Prozesstemperatur von  $T_T = 250 \text{ °C}$  und  $T_0 = 20 \text{ °C}$  sowie einer Prozessgeschwindigkeit von  $v_T = 200 \text{ mm/s}$  ergibt sich daraus ein maximal notwendiger spezifischer Wärmestrom von  $20 \text{ W/mm}$  zur Erwärmung des zugeführten Tapes. In Bild 5.4 ist der lineare Verlauf der nach oben abgeschätzten Leistung in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit dargestellt. Aus Untersuchungen zum Laser-unterstützten Tapelegen von PA6 und PA12 lassen sich experimentell ermittelte Werte für die spezifische Leistung ableiten, vgl. [STEY13; BREC16a]. Für eine Prozessgeschwindigkeit von  $200 \text{ mm/s}$  liegt die experimentell ermittelte spezifische Leistung bei  $25 \text{ W/mm}$ . Unter Berücksichtigung, dass es sich dabei um den Sollwert der Laserleistung handelt, von dem noch Streustrahlungs- und Konduktionsverluste abgezogen werden müssen, liegt eine sehr gute Übereinstimmung von theoretischer Abschätzung und experimentellen Ergebnissen vor.



**Bild 5.4:** Notwendige Heizleistung in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit; Datenquelle: [STEY13, S. 125; BREC16a]

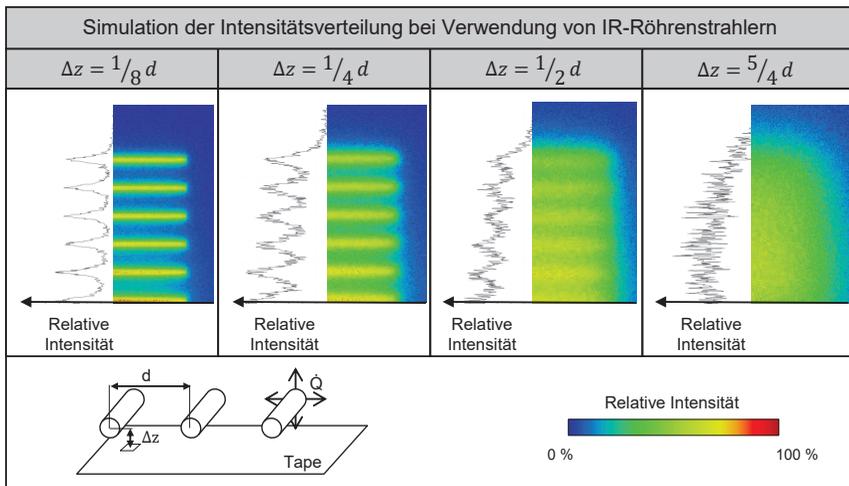
*Relationship of process speed and required heat input*

Für höhere Prozessgeschwindigkeiten steigt die real benötigte Leistung nur degressiv an. Dies ist zum einen darin begründet, dass der relative Verlustanteil durch Konduktion und Konvektion abnimmt. Zum anderen nimmt der Temperaturgradient durch die kürzere Bestrahlungsdauer in Dickenrichtung zu, sofern die Einstrahlänge nicht erhöht

wird. Die Prozesstemperatur wird an der bestrahlten Tapeoberfläche erreicht, eine Erwärmung der Rückseite durch die Wärmeleitung findet aber nur noch in geringerem Maße statt [WEIL17; SONM97].

Bei dem gewählten Konzept der möglichst stationären Prozessführung werden keine hohen Anforderungen an Regelgeschwindigkeiten gestellt, jedoch sollte sich der Strahler schnell an- und ausschalten lassen. Langwellige IR-Strahler benötigen erhebliche Aufheiz- und Abkühlzeiten. Daher sind kurzwellige IR-Strahler einzusetzen, die Aufheizzeiten von ca. 1 s aufweisen. Diese Strahler liegen meist als Quarzröhre mit Heizdraht und integriertem Reflektor vor. Die höchste Intensität bietet ein Strahler vom Typ *Optron 600.1152* mit 1600 W Leistung bei 155 mm Heizfadenlänge, was einem spezifischen Wärmestrom von 10,3 W/mm entspricht [OPTR19].

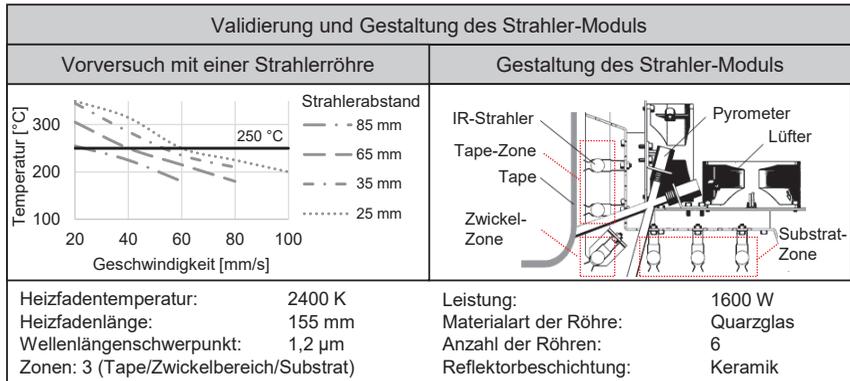
Um eine Prozesssicherheit bei Ablegegeschwindigkeiten von  $v_T > 200 \text{ mm/s}$  zu erreichen, sind daher mehrere Strahler notwendig. Die Strahler sind senkrecht zur Vorschubrichtung des Tapes anzuordnen, um homogene Einstrahlbedingungen zu gewährleisten. Dadurch ergibt sich jedoch in Vorschubrichtung eine inhomogene Intensitätsverteilung. Die Ausprägung wird durch ein Ray-Tracing-Modell, implementiert mittels der Software *Zemax*, beurteilt. Dazu wird die Intensitätsverteilung von Linienstrahlern in Abhängigkeit des Abstandes  $\Delta z$  zum Tape betrachtet, s. Bild 5.5.



**Bild 5.5:** Bewertung der Homogenität der Intensitätsverteilung eines IR-Heizmoduls  
*Evaluation of homogeneity of the intensity distribution of the IR-heater*

Bereits bei einem Strahlerabstand zum Tape  $\Delta z$ , welcher der Hälfte des Abstands  $d$  der Strahler zueinander beträgt, treten nur noch geringe Intensitätsspitzen auf. Für  $\Delta z = 1,25 d$  ist das Intensitätsprofil nahezu homogen. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch der Anteil an Streustrahlung. Daher ist es empfehlenswert, die IR-Strahler nicht zu weit entfernt vom einlaufenden Tape zu platzieren.

Um die Einsatztauglichkeit eines kurzwelligigen IR-Strahlers zu validieren, wird ein Prüfstandsversuch durchgeführt. Dazu wird ein PA/CF-Tape mit variierten Geschwindigkeiten und Abständen an einem Einzelstrahler vorbeigeführt. Die erzielte Oberflächentemperatur des Tapes wird  $50\text{ mm}$  hinter dem Einstrahlungsbereich gemessen. Es zeigt sich, dass bei  $\Delta z = 25\text{ mm}$  bis zu einer Geschwindigkeit von  $v_T = 60\text{ mm/s}$  die Verarbeitungstemperatur von  $250\text{ °C}$  an der Tapeoberfläche erreicht werden kann, s. Bild 5.6 links. Zusammenfassend lassen die Berechnungen und Vorversuche erwarten, dass mit mindestens zwei Strahlern zur Erwärmung des zugeführten Tapes und geringen Strahlerabständen Prozessgeschwindigkeiten  $v_T > 200\text{ mm/s}$  möglich sind.



**Bild 5.6:** Links: Validierung des Erwärmungsmodells anhand von Vorversuchen; Rechts: Entwurf des Strahler-Moduls mit sechs IR-Strahlern

*Left: Experimental validation of the model for tape heating; Right: Conceptual design of the heating module with six IR-emitters*

Das Strahler-Modul wird so gestaltet, dass das zugeführte Tape von drei Strahlern erwärmt wird. Um den Abstand von Einstrahlzone und Konsolidierungsprozess so gering wie möglich zu halten, wird davon ein Strahler in den Zwickelbereich gerichtet. Die Erwärmung des Substrats wird durch drei Strahler und eine daraus resultierende, lange Einstrahlänge gewährleistet. Damit wird der im Vergleich zum Tape deutlich größeren möglichen Dicke des Substrats Rechnung getragen. Die drei Zonen - Tape, Zwickelbereich und Substrat - sind jeweils getrennt voneinander ansteuerbar. Für eine Prozessüberwachung werden Pyrometer zur Temperaturmessung des Substrats und Tapes im Strahlermodul integriert. Jedoch erweisen sich die Messergebnisse aufgrund des großen emittierten Wellenlängenbereichs der IR-Strahler, der in den für Temperaturmessungen verwendeten Spektralbereich von  $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$  hineinreicht, während der Prozessentwicklung, s. Kapitel 6, als unzuverlässig. Der Aufbau des Strahlermoduls ist in Bild 5.6 rechts zusammengefasst.

Aufgrund der geringeren Intensität von IR-Strahlern im Vergleich zu Laserstrahlen ergibt sich ein größerer notwendiger Bauraum und damit eine größere Einstrahlänge. Nach den zuvor diskutierten Erkenntnissen von SONMEZ führt dies dazu, dass die Wär-

meeindringtiefe steigt [SONM97]. WEILER stellt dazu zahlreiche vereinfachende analytische Berechnungsmodelle auf [WEIL17]. Je tiefer das Material aufgeschmolzen wird, desto höher ist der Energiebedarf. Gleichzeitig bietet dies aber auch das Potenzial für eine robustere Prozessführung, da durch die langsamere Abkühlung eine längere Prozesszeit für die Konsolidierung zur Verfügung steht. Die Validierung des Strahler-Moduls erfolgt zusammen mit der Konsolidierungs- und Schneideinheit in Prüfstandsversuchen beim Herstellen von mehrlagigen Laminatstreifen, s. Kapitel 5.2.3.

### 5.2.2 Schneid- und Vorschubeinheit

#### *Cutting module and tape-feed unit*

Die geforderte Verschnittreduzierung macht ein präzises Schneiden notwendig. Die gewählte Prozessführung, s. Kapitel 5.1, führt dazu, dass das Schneiden und Vorschieben synchronisiert mit dem bewegten Band stattfinden muss (engl.: cut and add on the fly). Das Tape wird also bei voller Vorschubgeschwindigkeit geschnitten und ebenso bei Bahnanfang zugeführt. Daher müssen Schneid- und Vorschubeinheit eng aufeinander abgestimmt werden.

#### Schneideinheit

Zunächst soll der Schneidprozess untersucht werden. Um eine Schnittgenauigkeit von  $\pm 1 \text{ mm}$  zu erreichen, ist bei der theoretisch möglichen Prozessgeschwindigkeit von  $1 \text{ m/s}$  ein Zeitraum von nur  $2 \text{ ms}$  einzuhalten. Am Fraunhofer IPT liegen langjährige Erkenntnisse zu verschiedenen Messergeometrien vor, s. Bild 5.7. Generell sollte der Schneidspalt sehr gering ausfallen. Ein linear angetriebenes Schneidmesser bietet gute Schneideigenschaften bei vertretbarem Aufwand. Zusätzlich lassen sich Schneidkraft und Messerstandzeit durch die Gestaltung der Schneidkante und Werkstoffauswahl an das jeweilige Material anpassen.

Vorversuche zeigen, dass für ein  $25 \text{ mm}$  breites Tape des Typs *Ticona PA6 CF 60* je nach Messergeometrie bis zu  $220 \text{ N}$  Schnittkraft notwendig sind. Wegen des gewählten Messerwinkels von  $4^\circ$  zum Erreichen eines ziehenden Schnitts ist ein Hub von mehr als  $2 \text{ mm}$  erforderlich. Diese Anforderungen sind mit Piezoaktoren oder elektrischen Tauchspulen nicht ohne weiteres erreichbar. Aufgrund der geringen Kosten und der guten Skalierbarkeit wird ein Pneumatikzylinder als Aktuator ausgewählt. Die pneumatische Ansteuerung wird durch Schnellschaltventile des Typs *Festo MHE2* realisiert, um die Dynamikanforderungen zu erfüllen. Diese weisen eine Schaltzeit unter  $2 \text{ ms}$  bei einer Wiederholgenauigkeit von weniger als  $0,2 \text{ ms}$  auf.

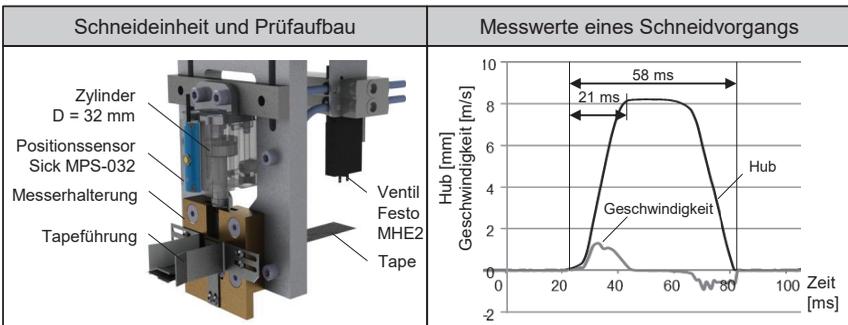
Schlagmesser	Rollmesser	Messerwalze	Schneidmesser	
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Definierte Schnitttiefe</li> <li>- Hohe Schnittkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringe Schnittkraft</li> <li>- Zusätzliche Kinematik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Definierte Schnitttiefe</li> <li>- Synchronisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringe Schnittkraft</li> <li>+ Einfach</li> </ul>	

**Bild 5.7:** Auswahl eines Schneidmessers anhand am Fraunhofer IPT vorhandener Erfahrungswerte

*Selection of a cutting knife based on Fraunhofer IPT's knowledge*

Diese Zeiten liegen deutlich unter den normalen NC Abtastzeiten, sodass sich ebenso Herausforderungen für die Steuerungsarchitektur und -hardware ergeben, vgl. [DEVL07]. Das Hartmetallmesser mit einer Breite von 30 mm wird in einem Messingblock geführt und ist direkt an einem Kompaktzylinder mit 10 mm Hub befestigt. Eine Simulation mit der Software Festo GSED berechnet für diese Anordnung eine Hubzeit von 20 ms.

Zur Validierung der Schneideinheit werden Prüfstandsversuche durchgeführt. Dazu wird der Zylinder mit einem Positionssensor ausgestattet, s. Bild 5.8. Die Datenaufzeichnung findet mittels eines NI Compact Rio 9075 FPGA, der mit einem 100 kHz A/D-Wandler bestückt ist, statt. Das Tape kann mit einem vorliegenden Systemdruck von 6 bar erfolgreich geschnitten werden.



**Bild 5.8:** Links: Konstruktion des Schneidmoduls und Aufbau des Prüfstands zur Validierung; Rechts: Messwerte des Zylinderhubs und der Zylindergeschwindigkeit

*Left: Design of the cutting module and experimental setup;*

*Right: Measured data for cutting velocity and position of the cylinder*

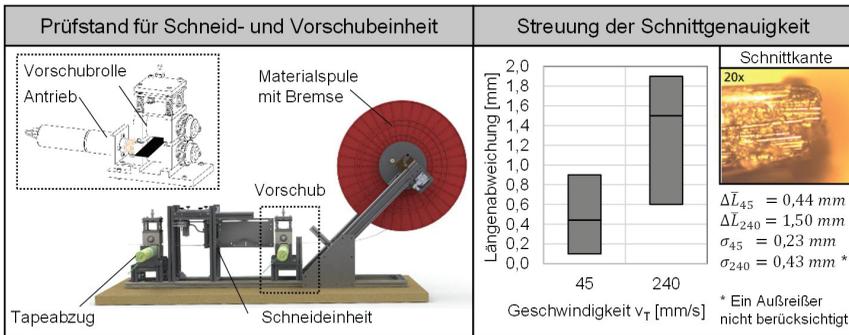
Die Auswertung des Positionssignals zeigt, dass der Hub von  $8\text{ mm}$  bis zu einem externen Anschlag innerhalb von  $21\text{ ms}$  zurückgelegt wird. Bei der Betrachtung des abgeleiteten Geschwindigkeitssignals fällt auf, dass das Messer etwa in der Mitte des Hubes eine negative Beschleunigung erfährt, sich dann aber mit wieder ansteigender Geschwindigkeit bewegt, bevor es die Endposition erreicht. Dies kann als Beginn des Schneidvorgangs, bei dem das Messer auf das Tape trifft, interpretiert werden.

Die kinetische Energie des Messers hat somit einen Einfluss auf den Schneidvorgang. Daher sollte die Beschleunigungsstrecke des Messers nicht zu kurz gewählt werden. Nach einer im Steuerungsprogramm vorgegebenen Haltezeit schließt sich eine ähnlich lang dauernde Rückbewegung an. Nach  $58\text{ ms}$  befindet sich das Messer in seiner Ausgangsposition und ein Vorschieben des Tapes ist wieder möglich.

### **Vorschubeinheit**

Die Anforderungen an die Vorschubeinheit ergeben sich direkt aus dem vorgesehenen Prozessablauf. Insbesondere die Wechselwirkung zwischen Schneiden und Stoppen des Vorschubs führt zu hohen Anforderungen an die Dynamik des Vorschubs. Das Schneidmesser wird in das sich bewegende Tape eingefahren, sodass dabei die Tapeführung blockiert wird. Der Tapevorschub muss entsprechend schnell stoppen, ohne dabei vor dem Schnittzeitpunkt das Tape zu stark abzubremsen. Dies würde zu hoher Tapespannung und ggf. Beeinflussung des Konsolidierprozesses führen. Um möglichst hohe Beschleunigungen bei gleichzeitig einfachem Systemaufbau zu realisieren, wird das Tape durch ein mit Elastomer beschichtetes Rollenpaar geführt, welches mittels eines Servomotors angetrieben wird. Die Anpresskraft kann über eine Federvorspannung eingestellt werden. Zusätzlich verfügt die Materialspule über eine pneumatisch betätigte Bremse, um ein unkontrolliertes, trägheitsabhängiges Abspulen der Rolle zu verhindern. Aufgrund der begrenzten Beschleunigung entsteht eine überschüssige Tapelänge, die z. B. aktiv durch eine Tänzereinheit oder passiv durch ein elastisches Ausbeulen des Tapes zwischengespeichert werden kann. Das Aktivieren des Vorschubs, also das Beschleunigen des Tapes für eine neue Bahn, stellt ähnliche Anforderungen. Sollte die Reibkraft nicht ausreichen Materialspulen mit hoher Trägheit in Relation zur Ablegegeschwindigkeit hinreichend zu beschleunigen, kann ein Bandpuffer vorgesehen werden. Bei dem in Bild 5.9 dargestellten Prüfstandsversuch ist dies jedoch nicht notwendig.

Zur Validierung des Konzepts werden einzelne Tapestücke geschnitten und vermessen. Dabei wird der Ablegeprozess durch eine zweite Vorschubeinheit, die das geschnittene Tape mit konstanter Geschwindigkeit abzieht, simuliert. Die Schnittgenauigkeit beträgt bei langsamer Tapegeschwindigkeit  $v_T = 45\text{ mm/s}$  ca.  $0,8\text{ mm}$  und  $1,3\text{ mm}$  bei  $v_T = 240\text{ mm/s}$ . Generell sind die geschnittenen Tapestücke wegen der Totzeit der Schaltvorgänge länger als eingestellt, was sich aber in einer Anlage steuerungstechnisch kompensieren lässt. Die geforderte Schnittgenauigkeit von  $\pm 1\text{ mm}$  kann somit eingehalten werden. Eine mikroskopische Untersuchung der Schnittkante zeigt keine wesentliche Schädigung des Tapes.



**Bild 5.9:** Versuchsaufbau und Ergebnisse zur Validierung des Schneidvorgangs  
*Set-up and results of the cutting unit's experimental validation*

### 5.2.3 Konsolidierungsmodul

#### *Consolidation module*

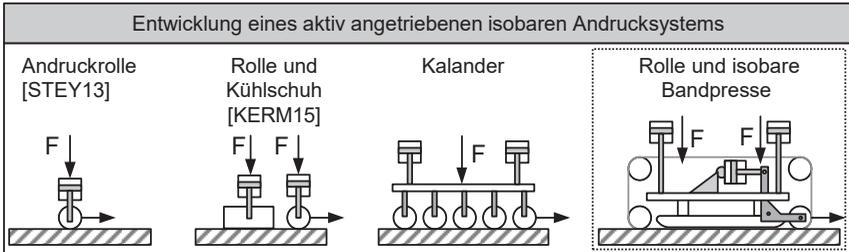
In Kapitel 4.2 wird der Konsolidierungsprozess, bestehend aus der Erzeugung eines vollständigen Lagenkontaktes und der anschließenden Interdiffusion zum Erreichen der Verbindungsfestigkeit, ausführlich beschrieben. Die Verwendung eines rollenförmigen Tapeeinlaufs hat sich in der Praxis bewährt, sodass dieses Konzept auch in der hier zu entwickelnden Anlage verwendet wird. Deutlich geringere Beachtung wird jedoch bisher dem Prozessverlauf hinter dem Zwickelbereich gewidmet. Bei Wickelsystemen oder Anlagen zur 3D-Ablage wird wegen der geometrischen Randbedingungen auf nachgeschaltete Anlagenelemente verzichtet. STOKES-GRIFFIN weist darauf hin, dass der Abkühlprozess entscheidend die Laminatqualität beeinflusst. Aufgrund seines mehrlagigen Aufbaus beeinflusst die Temperaturverteilung im Substrat deutlich stärker den Abkühlvorgang als die des zugeführten Tapes. Zusätzlich ist der Temperaturgradient im Substrat mit zunehmender Lagenanzahl deutlich stärker ausgeprägt als im dünnen Tape. [STOK15]

Die Abkühlung des Substrats soll unter Druck erfolgen, um ein Porenwachstum auszuschließen [TIER03]. KERMER-MEYER hat die positiven Auswirkungen einer aktiven Kühlung nach der Andruckeinheit sowie einer temperierten Ablegeform sowohl auf die Maßhaltigkeit als auch auf die mechanischen Eigenschaften des Laminats nachgewiesen [KERM15, S. 95]. Daher wird ein Konsolidierungssystem entwickelt, was folgende Anforderungen miteinander vereint:

- Rollenförmiger Zwickelbereich
- Kontrollierte Temperierung des Substrats hinter dem Zwickelbereich
- Abkühlen unter Druck

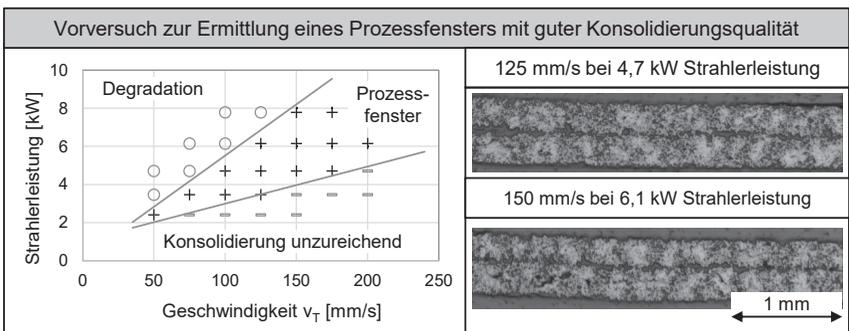
Um eine Abkühlung unter Druck hinter dem Zwickelbereich zu ermöglichen, scheidet ein wie von KERMER-MEYER realisierter Andruckschuh wegen der entstehenden Gleitreibung als Lösungsmöglichkeit aus. Die entstehende Scherspannung im Laminat

kann beim Abkühlen zu Eigenspannungen führen, vgl. [STEY13, S. 105]. Daher wird aus den möglichen Konzepten ein System, das über ein aktiv angetriebenes, umlaufendes Stahlband verfügt, ausgewählt, s. Bild 5.10. Das Stahlband trennt dabei den Kühlschuh vom Laminat.



**Bild 5.10:** Ausgewählte Konstruktion für das Konsolidierungsmodul  
*Selected design of the consolidation module*

Um die Konsolidierungsqualität des IR-basierten Prozesses zu validieren, wird der in Bild 5.9 dargestellte Prüfstand um eine Andruckrolle, zunächst ohne umlaufendes Stahlband und Kühlschuh, sowie die IR-Strahlereinheit erweitert. Die Ablegebewegung wird durch eine Linearachse realisiert. Dieser erweiterte Prüfstand wird für die experimentelle Ermittlung des Prozessfensters herangezogen. Dazu wird für Ablegeschwindigkeiten von  $v_r = 50 \text{ mm/s}$  bis  $v_r = 200 \text{ mm/s}$  die Strahlerleistung zwischen 20 % und 80 %, entsprechend 2,4 kW und 7,8 kW variiert. Die Konsolidierungsqualität wird sowohl durch Schälversuche als auch durch die Auswertung von Schlibbildern beurteilt. Zusätzlich wird der Prozess hinsichtlich sichtbarer Überhitzung des zugeführten Tapes beobachtet, um somit Prozessparameter, die zu einer Degradation des Polymers führen können, auszuschließen. Die Ergebnisse sind in Bild 5.11 dargestellt.



**Bild 5.11:** Konsolidierungsqualität in Abhängigkeit der Prozessparameter Geschwindigkeit und Strahlerleistung  
*Consolidation quality depending on process speed and heating power*

Während bei einer Prozessgeschwindigkeit von  $v_T = 50 \text{ mm/s}$  bereits  $3,5 \text{ kW}$  Heizleistung zu einer thermischen Schädigung führen, tritt diese bei  $v_T = 150 \text{ mm/s}$  selbst bei der maximal eingestellten Strahlerleistung von  $7,8 \text{ kW}$  nicht auf. Bei der höchsten untersuchten Ablegegeschwindigkeit von  $v_T = 200 \text{ mm/s}$  reicht eine Strahlerleistung von  $4,7 \text{ kW}$  nicht für eine hinreichende Konsolidierungsqualität aus. Im nächsten Prozesspunkt mit  $6,1 \text{ kW}$  liegt jedoch anscheinend eine gute Konsolidierung vor. Generell ist festzustellen, dass sich das mögliche Prozessfenster mit höherer Ablegegeschwindigkeit vergrößert, da für eine thermische Schädigung des Polymers sehr hohe Leistungen benötigt werden. Zwei exemplarisch ausgewählte Schlibfbilder zeigen, dass nahezu keine interlaminaeren Poren in der Fügezone entstehen. In dem ausgewählten Prozesspunkt bei  $v_T = 150 \text{ mm/s}$  und  $65 \%$  Strahlerleistung treten jedoch vereinzelt Poren in der Substratschicht auf. Dies verdeutlicht, warum bei einer detaillierteren Prozessuntersuchung die Heizleistungen in den verschiedenen Prozesszonen unabhängig voneinander einzustellen sind. Mit der Gesamtanlage, die zusätzlich über eine temperierte Ablegeform und das zuvor vorgestellte Konsolidierungskonzept, Bild 5.10 rechts, verfügt, wird eine detaillierte Prozessuntersuchung zur Quantifizierung der Prozessparameter und Lamineigenschaften durchgeführt, s. Kapitel 6.

### 5.3 Aufbau der Gesamtanlage

#### *Set-up of the overall production machine*

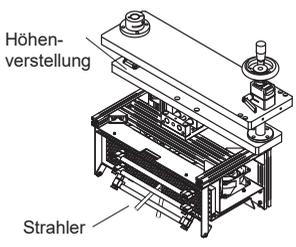
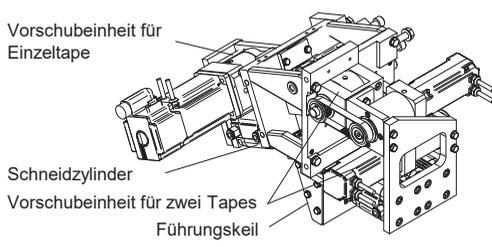
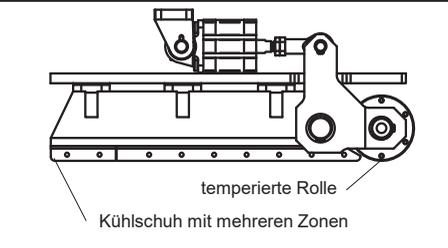
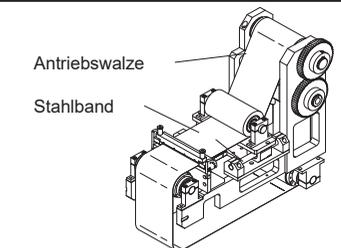
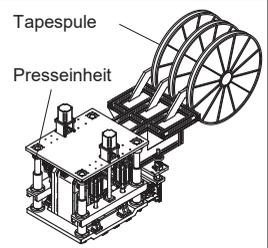
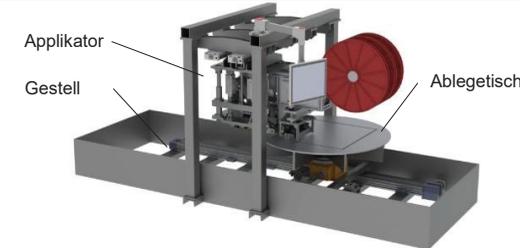
Für die einzelnen Hauptfunktionen liegen die vorgestellten und validierten Konzepte vor. Diese werden zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt, welches anschließend konstruiert und aufgebaut wird. Ergebnis ist eine prototypische Gesamtanlage, mit der die Prozesstauglichkeit der Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten im IR-unterstützten Tapelegeverfahren mit in-situ Konsolidierung verifiziert werden kann.

#### 5.3.1 Einzelmodule und Gesamtkonzept

##### *Single modules and overall concept*

Aus den in Kapitel 5.2 ermittelten Teillösungen werden entsprechende Funktionsmodule abgeleitet. Die Konstruktionen der Module sind in Bild 5.12 dargestellt. Das bereits vorgestellte IR-Strahlermodul wird weitestgehend beibehalten. Die Ergänzung einer Positionsverstellung erlaubt es, den Strahlerabstand zur Bestimmung des optimalen Prozesspunkts einzustellen. Die Konsolidiereinheit besteht aus einer Andruckrolle sowie einem in mehrere Zonen unterteilten Kühlschuh, der ein Abkühlen unter Druck ermöglicht. Die Andruckrolle und der Kühlschuh werden von einem umlaufenden, aktiv angetriebenen Stahlband vom Tapematerial getrennt.

Der Einlaufbereich des Stahlbandes zur Andruckrolle führt dabei das Tape senkrecht zur Substratoberfläche, sodass beim Zuführen des biegeschaffenen Tapes das freie Tapeende von der Gravitation nicht umgelenkt wird.

Entwurf der einzelnen Module, Baugruppen und der Gesamtanlage	
Erwärmen: IR-Strahler	Tape schneiden und fördern: Kombinierte Schneid- und Vorschubeinheit
	
Andruckeinheit: Stahlband	Konsolidieren: Rolle und Kühlschuh
	
Applikator Baugruppe	Gesamtentwurf
	

**Bild 5.12:** Entwurf der einzelnen Module des Ablegesystems und Gesamtentwurf  
*Concepts of the single modules and of the tape laying system*

Schneid- und Vorschubeinheit sind so miteinander kombiniert, dass drei Tapes unabhängig voneinander vorgeschoben und geschnitten werden können. Dies wird dadurch erreicht, dass das mittlere Tape in einer anderen Ebene zugeführt und geschnitten wird. Dadurch ergibt sich eine V-förmige Anordnung der Tapes. Alle drei Tapes werden in einem keilförmigen Führungsblock zum umlaufenden Stahlband geführt. Ab dort durchlaufen sie parallel zueinander die Aufheizzone.

Die Andruckeinheit wird durch einen Pneumatikzylinder angepresst. Die mögliche Presskraft beträgt dabei  $5000\text{ N}$ . Die genannten Module werden zu einer Applikator-Baugruppe zusammengefasst, welche ebenfalls die Materialspulen enthält. Prinzipiell lassen sich daraus verschiedene Gesamtkonzepte realisieren. Für einen angestrebten

Bauteildurchmesser von 1,2 m und der Forderung, den Applikator bzgl. einer höheren Tapeanzahl oder größerer Tapebreite skalieren zu können, ist das Konzept mit einem beweglichen Ablagetisch vorzuziehen. Dabei führt der beheizte Tisch die Ablegebewegung durch. Zusätzlich wird die Faserorientierung über eine Rotation des Tisches ermöglicht. Der Tapelege-Applikator wird lediglich senkrecht zur Ablegebewegung bewegt. Nach jedem Ablegehub wird der Applikator zur Position der nächsten Tapebahn verfahren. Um die steigende Substratdicke mit jeder fertiggestellten Einzellage ausgleichen zu können, kann der Applikatorabstand zum Tisch um die entsprechende Lagendicke nach oben verfahren werden.

### 5.3.2 Gesamtanlage

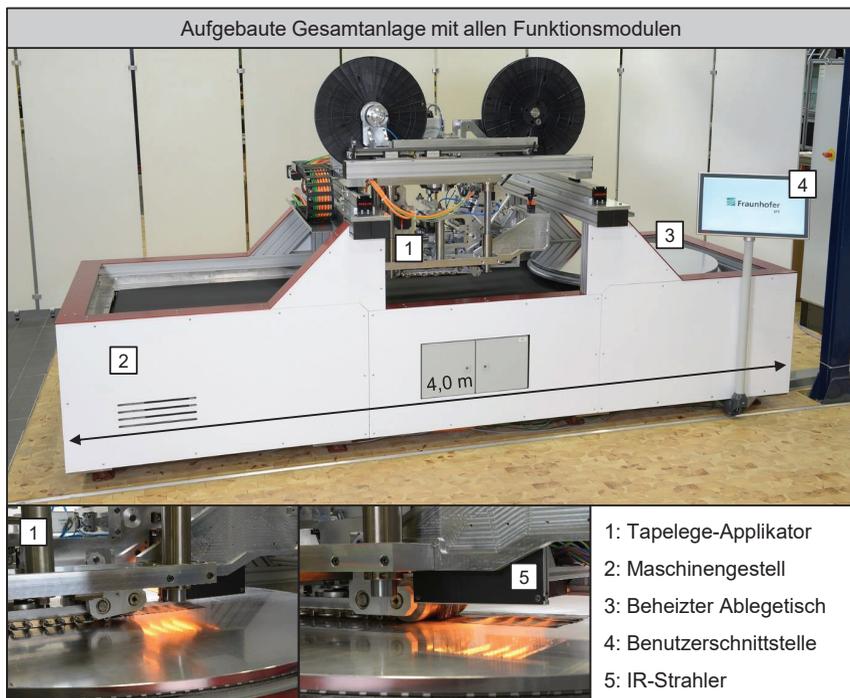
#### *Overall production machine*

Ausgehend von dem in Bild 5.12 vorgestellten Gesamtkonzept wird die prototypische Anlage konstruiert und aufgebaut. Dabei werden alle Achsen und aktiven Elemente, bspw. der IR-Strahler und die Pneumatikventile, zentral durch ein Steuerungssystem, basierend auf *TwinCat 3.1* der *Beckhoff Automation GmbH* angesteuert. Es handelt sich somit um eine Anlage mit acht NC-Achsen, wovon die Y-Achse aus zwei steuerungstechnisch gekoppelten, einzelnen Linearachsen besteht. Die Rotationsachsen B, B1, B2 und B3 für den Antrieb des Stahlbandes bzw. den Tapevorschub werden dabei hinsichtlich Geschwindigkeit mit der X-Achse synchronisiert, welche die Ablegebewegung durchführt. Die Tapeachsen B1–B3 werden zusätzlich positionsgeregelt betrieben, sodass Anfang und Ende der Bahn mit der gewünschten Laminatposition übereinstimmen. Für die Synchronisierung wird die in *TwinCat 3.1* bereitgestellte Bibliothek *fliegende Säge* verwendet. Das Aufrufen der einzelnen Funktionen, z. B. Schneiden und Strahleransteuerung erfolgt über entsprechende Parameter im G-Code. Die NC-Achsen und ihre Funktion sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

**Tabelle 5.3:** NC-Achsen  
*NC Axes*

Achse	X	Y (Y1; Y2)	B	B1, B2, B3	C	Z
Art	Linear	Linear	Rotation	Rotation	Rotation	Linear
Funktion	Ablegebewegung des Tisches	Verfahrensbewegung quer zur Ablagerichtung	Antrieb des Stahlbandes	Vorschub der Tapes	Ablegetisch	Höhen-einstellung des Applikators
Synchronisierung	<i>Master</i>	-	X-Achse	X-Achse	-	-

Das Gestell der prototypischen Gesamtanlage, s. Bild 5.13, ist aus Aluminium-Strangprofilen gefertigt, um evtl. spätere Änderungen zu ermöglichen. Für einen Serieneinsatz sollte eine Schweißkonstruktion gewählt werden, um die Kosten zu reduzieren und die Steifigkeit des Systems zu erhöhen. Die Abmaße der Anlage betragen  $4,0 \times 1,4 \text{ m}^2$  bei einer nutzbaren Tischfläche mit einem Durchmesser von  $1,2 \text{ m}$ . Die Achslängen sind so gewählt, dass eine Tapeablage auf dem gesamten Ablegetisch möglich ist. Um die Beschleunigungsvorgänge außerhalb des Ablegeprozesses zu ermöglichen, kann der Ablegetisch sowohl in positiver als auch in negativer x-Richtung komplett neben den Bandapplikator verfahren werden. Dies ermöglicht gleichzeitig eine einfache Entnahme des fertigen Laminats.



**Bild 5.13:** Am Fraunhofer IPT aufgebauter Prototyp einer Anlage zum IR-unterstützten Tapelegen mit in-situ Konsolidierung

*Machine prototype at Fraunhofer IPT for IR-based tape laying with in-situ consolidation*

## 5.4 Fazit der Anlagenkonstruktion

### *Conclusion of the production machine development and design*

Zusammenfassend konnte durch eine methodische Analyse der physikalischen Prozesse eine Systemtechnik entwickelt werden, welche die gestellten Anforderungen erfüllt und die Untersuchung der Herstellung belastungs- und verschnittoptimierter Laminat ermöglicht. Die Integration aller Module in ein Gesamtsystem und eine zentrale Steuerungsumgebung führen zusammen mit der gewählten Prozessführung zu einem gegenüber dem Stand der Technik kompakteren und kostengünstigeren System, das für die Herstellung ebener Laminat durch in-situ Konsolidierung optimiert ist. Diese prototypische Anlage wird zur Prozessentwicklung und Laminatfertigung, vgl. Kapitel 6, herangezogen, sodass die Forschungsthese bzgl. der Fertigung von Laminaten im IR-basierten Tapelegen mit in-situ Konsolidierung verifiziert werden kann.

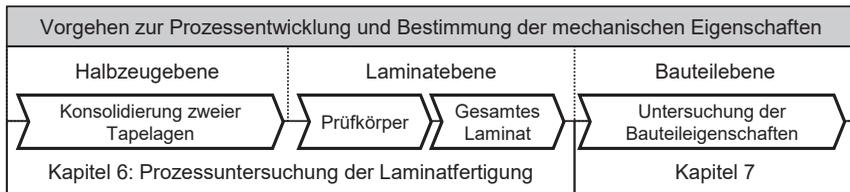


## 6 Prozessuntersuchung der Laminatfertigung

### *Process development of laminate manufacturing*

Die entwickelte Systemtechnik ermöglicht es, eine Untersuchung der Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten mit in-situ Konsolidierung durchzuführen. Ziel ist es, die optimalen Prozessparameter zu bestimmen und die erzielbaren mechanischen Eigenschaften der Laminats zu ermitteln.

Die erreichbaren Eigenschaften des Laminats werden sowohl durch das verwendete Ausgangsmaterial als auch durch den Konsolidierungsprozess beeinflusst. Zusätzlich werden die makroskopischen Laminateneigenschaften durch weitere Effekte und Parameter, wie z. B. Schnittgenauigkeit und Maßhaltigkeit, bestimmt. Daher wird ein mehrstufiges Vorgehen zur Prozessentwicklung gewählt, s. Bild 6.1. Zunächst werden in einer grundlegenden Prozessuntersuchung die Prozessparameter zum Konsolidieren zweier Tapelagen bestimmt, Kapitel 6.1, bevor die Laminateneigenschaften anhand von Prüfkörpern und einer makroskopischen Betrachtung des Gesamtlaminats ermittelt werden, Kapitel 6.2. Die Laminatfertigung bildet die Grundlage für die Bauteilherstellung, d. h. das Thermoformen der Laminats zu dreidimensionalen Strukturen. Die entsprechenden Untersuchungen werden in Kapitel 7 beschrieben.

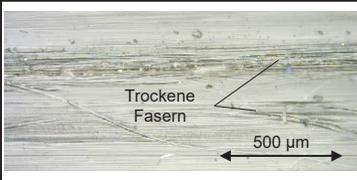
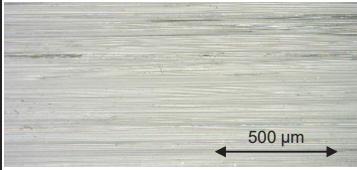


**Bild 6.1:** Gliederung der Prozessentwicklung und Materialcharakterisierung  
*Outline of process development and material characterization*

### 6.1 Prozessentwicklung auf Tapeebene

#### *Process development on tape level*

Die Prozessentwicklung beginnt mit der Untersuchung eines zweilagigen Laminats. Dazu werden zwei Tapes direkt aufeinander abgelegt und konsolidiert. Dies ist der grundlegende Prozess, der bei der Fertigung eines Gesamtlaminats vielfach wiederholt wird. Dabei ändern sich die Randbedingungen beispielsweise hinsichtlich relativer Faserorientierung und Substratdicke, sodass diesbezüglich weitere Parameteranpassungen durchgeführt werden müssen. Zur Bewertung des grundlegenden Konsolidierungsprozesses zweier Tapelagen werden verschiedene Verfahren herangezogen. Der Porenanteil und die Verteilung der Poren lassen sich durch Querschliffe ermitteln. Dadurch kann auf den Grad des Lagenkontakts  $D_{IC}$  geschlossen werden. Für eine Charakterisierung der Konsolidierung wird hingegen die Energiefreisetzungsrate bei Schäl- oder Keiltests bestimmt, s. [STIM14; STEY13].

Eigenschaften des Versuchsmaterials CELSTRAN® CFR-TP PA6 CF60-01					
Polymermatrix	Polyamid 6	Beschädigtes Material (aussortiert)			
	$T_g = 57 \text{ °C}$				
	$T_m = 220 \text{ °C}$				
Faser	Kohlenstofffaser				
Breite	$b_T = 25 \text{ mm}$			Gute Materialqualität (verwendet)	
Dicke	$h_T = 0,13 \text{ mm [0,25 mm]}$				
Faservolumenanteil	$\varphi_f = 48 \text{ % [49 %]}$				
Biegefestigkeit	$\sigma_{BII} = 1041 \text{ MPa [806 MPa]}$				
Biegemodul	$E_{BII} = 98,1 \text{ GPa [64 GPa]}$				
Dichte	$\rho = 1,447 \text{ g/cm}^3$			Real gemessene Tapedicke $h_T = 0,15 \text{ mm}$	

**Bild 6.2:** Eigenschaften des verwendeten Tape-Halbzeugs, vgl. [CELA14; TICO09]  
*Properties of the processed tape material*

Als Halbzeug für alle weiteren Versuche kommt Tape des Typs *Celstran® CFR-TP PA6 CF60-01* zum Einsatz. In Bild 6.2 sind die Eigenschaften des Materials zusammengefasst. Die gemessene Tapedicke beträgt  $h_T = 0,15 \text{ mm}$ . Vom Hersteller sind Datenblätter für Dicken von  $0,13 \text{ mm}$  und  $0,25 \text{ mm}$  verfügbar, in denen verschiedene mechanischen Eigenschaftswerte genannt sind [CELA14; TICO09]. Allgemein ist anzumerken, dass sich noch keine spezifischen Qualitätsstandards für Tapes gebildet haben und bei vielen Herstellern zwischen verschiedenen Materialchargen schwankende Eigenschaften vorliegen. Die Bestimmung der Materialeigenschaften wird an Prüfkörpern durchgeführt, die aus mehrlagigen Laminaten herausgeschnitten werden [DIN 11; DIN 97]. Dadurch hat der notwendige Herstellungsprozess der Prüfkörper bereits einen Einfluss auf die Materialcharakterisierung.

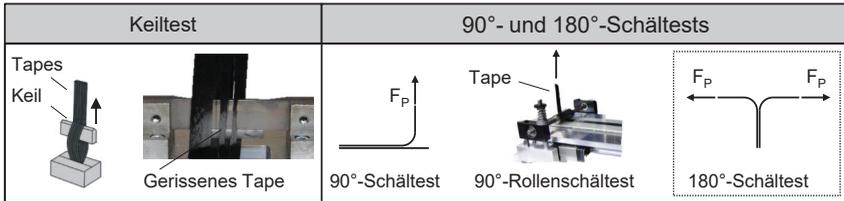
### 6.1.1 Aufbau des Schältests

#### *Set-up of the peel test*

Um eine möglichst unverfälschte Aussage über die Güte des Konsolidierungsprozesses zu erhalten, soll die Festigkeit der Fügezone zwischen zwei Tapes quantifiziert werden. Dazu eignen sich Schäl- oder Keiltests. In der Textil- und Kunststofftechnologie sind verschiedene Schälversuche, z. B. Winkel- oder Rollenschälversuche bekannt, die auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen sind, vgl. [GRIE07, S. 108].

Für die Tapeverarbeitung haben sich entsprechende Verfahren etabliert, bei denen die Fügefestigkeit der Matrix zwischen zwei miteinander konsolidierten Tapes untersucht wird, vgl. [GROU12, S. 49]. Dazu werden zwei einzelne Tapeestreifen zu einem zweilagigen Prüflaminat mit unidirektionaler Faserorientierung konsolidiert. Das so entstehende Laminat besitzt in diesem Fall eine Dicke von weniger als  $0,3 \text{ mm}$ . Dementsprechend weist dieser Prüfkörper eine niedrige Biegesteifigkeit auf, sodass keine genormten Biege- oder Scherprüfungen in Betracht kommen. Als Gütemaß wird stattdessen

die Energiefreisetzungsrate bzw. der Schälwiderstand beim Auftrennen der Ver-  
schweißung herangezogen. Die verschiedenen Testverfahren sind in Bild 6.3 darge-  
stellt.



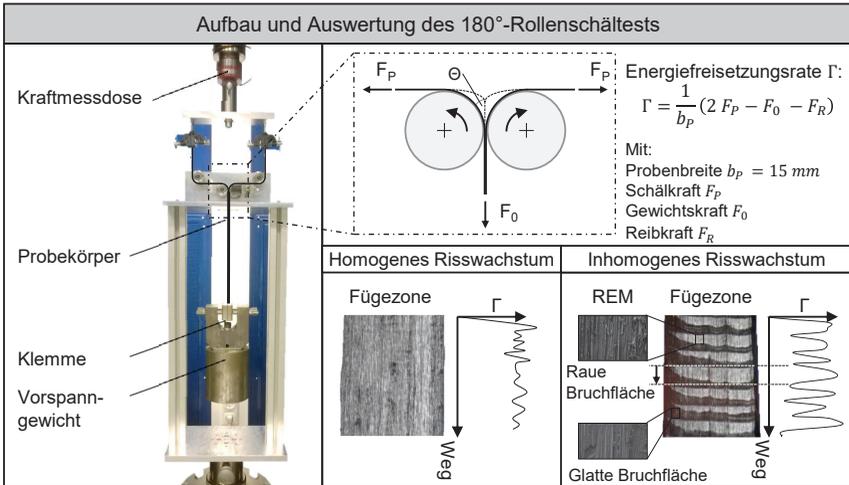
**Bild 6.3:** Zerstörende Prüfverfahren zur Bestimmung der Konsolidierungsqualität  
*Destructive tests for determining the consolidation quality*

STEYER verwendet zur Bewertung der Konsolidierung einen Keiltest, der ursprünglich zur Ermittlung des Schälwiderstandes von Klebstoffen entwickelt wurde [STEY13, S. 117]. Erste Vorversuche zeigen, dass die im IR-unterstützten Tapelegen hergestellten Probekörper bzw. das in dieser Arbeit verwendete Tape-Material mit PA6-Matrix nicht für dieses Testverfahren geeignet sind. Der durch den Keil induzierte Riss breitet sich häufig außerhalb der Fügezone aus, sodass die Tapes einreißen, s. Bild 6.3 links. Dadurch ergeben sich ungültige, nicht aussagekräftige Messergebnisse.

Ein weiteres mögliches Prüfverfahren ist der Schältest, bei dem ein Band im 90°-Winkel von einem Substrat abgezogen wird. Dieser wird häufig zur Bestimmung der Adhäsionskräfte von Klebstoffen verwendet. Der Test ist so aufgebaut, dass eine reine Normalbeanspruchung vorliegt, die in Abhängigkeit der Risszähigkeit des Werkstoffs zu einer Rissausbreitung in der Fügezone führt. Als Maß für die Risszähigkeit wird die Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  herangezogen, die proportional zur gemessenen Schälkraft  $F_P$  ist. Im hier vorliegenden Fall liegen verhältnismäßig hohe Kohäsionskräfte und somit große Schälwinkel  $\theta$  vor, sodass das UD-Tape aufgrund der geringen maximalen Bruchdehnung brechen würde. Daher wird für UD-Tapes eine Rolle verwendet, die den Biegeradius des Tapes begrenzt. Gleichzeitig ergibt sich daraus eine einfachere Berechnung der Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$ , da sich die geometrischen Bedingungen vorgeben lassen und sich ein konstanter Schälwinkel  $\theta$  einstellt (Formel 6.1). Dazu wird der Prüfkörper mit einer Vorspannkraft  $F_0$ , die in Prüfkörperrichtung mittels einer Gewichtskraft aufgebracht wird, gegen die Rolle gezogen. [KAWA04]

Der 90°-Rollenschältest wird insbesondere zur Bestimmung der Konsolidierungsqualität beim lokalen Verstärken von Substraten mittels UD-Tapes verwendet, vgl. [BREC14; GROU12, S. 52–54]. Für die Untersuchung eines zweilagigen Laminats ist dieser Aufbau jedoch aufgrund der geringen Steifigkeit der Substratlage nicht ohne aufwändige Modifikationen, wie z. B. das Festkleben der Substratlage auf einem steifem Trägermaterial, geeignet. Daher wurde am Fraunhofer IPT ein 180°-Rollenschältest entwickelt, s. Bild 6.4. Es handelt sich dabei um einen symmetrischen Aufbau, bei dem beide Tapes mit der Schälkraft  $F_P$  beaufschlagt werden. Der Schältest ist in einer Prüfmaschine vom Typ *ZwickRoell Z250* aufgebaut. Das Unternehmen *Airbus Defense*

& Space verwendet einen ähnlichen Prüfstand zum Ermitteln der Konsolidierungsqualität beim Wickeln von Drucktanks, jedoch mit einem von  $180^\circ$  abweichenden Umschlingungswinkel und zusätzlichen Andruckrollen, vgl. [PÉRÈ14].



**Bild 6.4:** Schältest-Verfahren zur Untersuchung der Konsolidierungsqualität eine Laminats aus zwei Tape-Lagen

*Peel test for evaluation of the consolidation quality of a two-layer tape laminate*

In Anlehnung an [KAWA04] ergibt sich aus Symmetriegründen die Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  zu:

$$\Gamma = \frac{1}{b_P} (2 F_P - F_0 - F_R) \quad (6.1)$$

Die Vorspannkraft  $F_0$  und die Reibkraft  $F_R$  lassen sich durch eine Messfahrt mit zwei nicht verschweißten Tapes ermitteln. Es ist auf die Verwendung einer ausreichend hohen Vorspannkraft  $F_0$  zu achten. Ähnlich wie beim  $90^\circ$ -Schältest sorgt die Vorspannkraft dafür, dass beide Tapes an den Rollen anliegen und sich ein kleiner und konstanter Schälwinkel einstellt [SU16].

Sollte die Vorspannkraft  $F_0$  im Vergleich zur Schälkraft  $F_P$  zu gering sein, wandert die Rissfront von den Rollen entgegen der Schälrichtung weg, sodass die beiden Tapes nicht mehr an den Rollen anliegen und sich die geometrischen Bedingungen ändern, s. Bild 6.4 rechts oben. Der Schälwinkel  $\theta$  vergrößert sich solange, bis die Risszähigkeit überschritten ist und ein sehr schnelles Risswachstum auftritt. Dadurch sinkt der Schälwinkel wieder ab. Bei konstanter, langsamer Rissausbreitung liegt nach dem Test ein homogenes Bruchbild in der Fügezone bzw. an den Tapeoberflächen vor, s. Bild 6.4 unten. Die Energiefreisetzungsrate ändert sich nach einer Einfahrstrecke über die Testdauer nur geringfügig. Das schlagartige Risswachstum führt hingegen zu

einem inhomogenen Bruchbild und einer starken Schwankung der Energiefreisetzungsrates. Die Bereiche des schnellen Rissfortschritts weisen eine verhältnismäßig glatte Oberfläche auf, die mit einer geringen gemessenen Schälkraft bzw. Energiefreisetzungsrates  $\Gamma$  korreliert. Mit ausreichender Vorspannkraft ist der Test für das vorliegende Material geeignet und wird für die folgende Prozessuntersuchung verwendet.

### 6.1.2 Prozessuntersuchung

#### *Process investigation*

Ziel der Prozessuntersuchung ist es, den Einfluss der Parameter auf die Konsolidierungsqualität zu ermitteln und dadurch die Prozessfähigkeit des IR-basierten Tapelegens nachzuweisen. Dazu ist zunächst eine Versuchsplanung notwendig, bevor die zweilagigen Testlaminare gefertigt und mit Hilfe der zuvor präsentierten Verfahren charakterisiert werden können.

#### **Versuchsplanung**

In Kapitel 4 sind bereits die verschiedenen physikalischen Prozesse beschrieben, die zusammen mit den Materialeigenschaften und der Prozessführung die Konsolidierungsqualität bestimmen. Um bei der Vielzahl an Parametern eine effiziente Versuchsreihe durchzuführen, in der mehrere Einflussfaktoren untersucht werden können, wird auf die statistische Versuchsplanung zurückgegriffen. Diese Planungsmethode ermöglicht eine gleichzeitige Variation mehrerer Faktoren, ohne dass die Zuordnung der Effekte verloren geht. Des Weiteren lässt sich der Einfluss der verschiedenen Parameter quantifizieren. [SIEB17, S. 27–32]

Als zu untersuchende Prozessparameter werden die Strahlerleistungen  $P_{\text{Substrat}}$ ,  $P_{\text{Tape}}$  und  $P_{\text{Zwicke}}$  sowie der Strahlerabstand  $\Delta z$  als auch die Ablegegeschwindigkeit  $v_T$  gewählt. Für jeden variierten Parameter werden zwei Stufen vorgesehen, jeweils eine unter- bzw. oberhalb des Zentralpunkts. Die statistische Versuchsplanung ermöglicht die Erstellung eines teilfaktoriellen Versuchsplans mit  $2^4$  Versuchspunkten, s. Tabelle 6.1. Die Prozessparameter Werkzeugtemperatur  $T_W$ , Konsolidierungskraft  $F_K$  sowie der Konsolidierungsspalt werden konstant gehalten.

Der Zentralpunkt wird wie die konstanten Parameter anhand von Vorversuchen sowie Literaturwerten festgelegt. Der Konsolidierungsspalt gibt den minimalen Abstand zwischen dem Kühlschuh und der Werkzeugoberfläche bzw. der obersten Substratlage an. Die Höhe ist so gewählt, dass sie unter der gemessenen Tapedicke  $h_T = 0,15 \text{ mm}$  liegt. Um einen Einfluss eventuell vorliegender zeitlicher Trends auszuschließen, wird die Versuchsreihenfolge des teilfaktoriellen Versuchsplans zufällig gewählt.

**Tabelle 6.1:** Parameterwerte für den Versuchsplan*Parameter values for the experiment*

Parameter	Versuchsraum			Einheit
	-	Zentralpunkt	+	
Strahlerleistung $P_{Substrat}$	15,5	17,0 ( $\pm 55\%$ )	18,5	[W/mm]
Strahlerleistung $P_{Tape}$	13,4	14,4 ( $\pm 70\%$ )	15,5	[W/mm]
Strahlerleistung $P_{Zwickel}$	9,3	9,8 ( $\pm 95\%$ )	10,3	[W/mm]
Strahlerabstand $\Delta z$	30	35	40	[mm]
Prozessgeschwindigkeit $v_T$	200	225	250	[mm/s]
Konstante Parameter	Werkzeugtemperatur: $T_W = 115^\circ\text{C}$ Konsolidierungskraft: $F_K = 920\text{ N}$ Konsolidierungsspalt: $0,14\text{ mm}$			

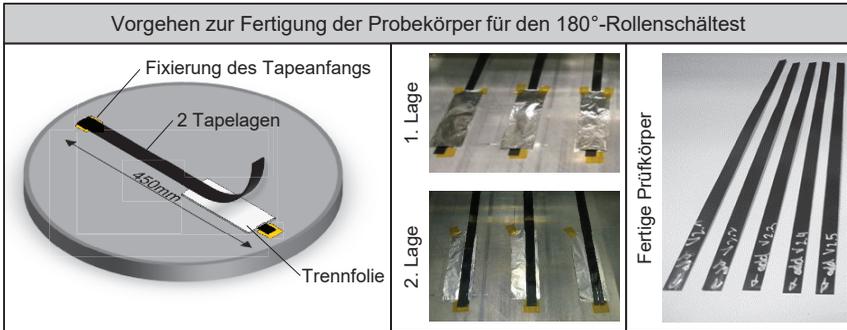
Die Aufstellung der Versuche erfolgt unter Verwendung der Software *Minitab* und ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Die zweistufigen Parameterwerte ober- bzw. unterhalb des Zentralpunkts sind entsprechend mit +/- gekennzeichnet.

**Tabelle 6.2:** Auflistung der einzelnen Versuche*List of experiments*

Versuch	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$P_{Substrat}$	○	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
$P_{Tape}$	○	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
$P_{Zwickel}$	○	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
$\Delta z$	○	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
$v_T$	○	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+

### Versuchsdurchführung

Entsprechend dem Versuchsplan werden für jeden Versuchspunkt  $n = 5$  Probekörper hergestellt. Dazu wird zunächst jeweils das untere Tape auf die Werkzeugform abgelegt. Um Störeinflüsse durch ein Verrutschen der unteren Lage zu verhindern, wird diese am Bahnanfang und -ende mit einer Klebeschicht fixiert, s. Bild 6.5. Am Bahnenende wird auf die erste Lage eine Metallfolie aufgebracht, um eine nicht konsolidierte Strecke zum Einspannen bei der Schälprüfung zu erhalten.



**Bild 6.5:** Fertigung der zweilagigen Prüfkörper mittels der entwickelten Anlagentechnik  
*Manufacturing of the two-layer specimens using the developed machine system*

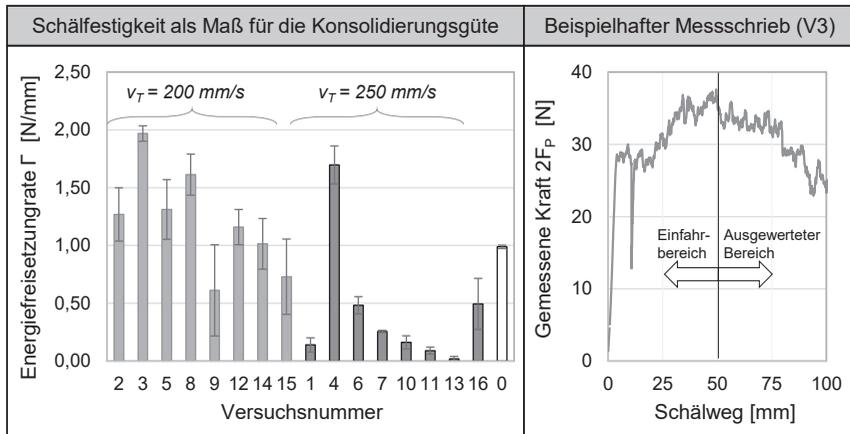
Um Randeffekte durch schwankende Tapebreiten oder unterschiedliche Aufweitungen auszuschließen, werden die Proben auf eine Breite von 15 mm besäumt, bevor sie im 180°-Rollenschälprüfstand getestet werden.

Die Prüfkörper werden mit einer Vorspannkraft  $F_0 = 15,3 \text{ kg}$  belastet. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt  $15 \text{ mm/min}$ . Um möglichst unverfälschte Ergebnisse für die Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  als Gütemaß der Konsolidierungsqualität zu erhalten, werden die Messergebnisse erst nach einer Einfahrstrecke von 50 mm berücksichtigt. Die Messwerte werden gemittelt, wobei Probenbereiche, in denen der oben genannte Effekt einer zu geringen Vorspannkraft auftritt, nicht berücksichtigt werden. Da die Probenlänge mit ca. 450 mm deutlich länger als die notwendige Schällänge ist, können aus verbleibenden Probenenden Querschliffe zur optischen Untersuchung der Konsolidierungsqualität angefertigt werden.

### Auswertung der Versuche

Zunächst wird die mittlere Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  für jeden Versuchspunkt aus den gemessenen Schälkraftverläufen berechnet, s. Bild 6.6. Dabei wird der Mittelwert der fünf Versuche pro Versuchspunkt herangezogen. Zur einfacheren Darstellbarkeit sind die randomisierten Versuchsnummern entsprechend der Ablegegeschwindigkeit sortiert. Die Energiefreisetzungsrate des Zentralpunktes der Versuchsreihe in dieser Arbeit beträgt  $\Gamma(V0) = 0,99 \text{ N/mm}$ . Ähnliche Untersuchungen für das Laser-unterstützten Wickeln von CF/PEEK-Tape ergeben eine Energiefreisetzungsrate von  $\Gamma(\text{PEEK}) = 2 \text{ N/mm}$  [DAGH18].

Sechs der Versuche mit verringerter Ablegegeschwindigkeit weisen eine höhere Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  als  $\Gamma(V0)$  auf. Im Mittel liegt die Energiefreisetzungsrate  $\Gamma(200 \text{ mm/s})$  der acht Versuche bei  $1,21 \text{ N/mm}$ . Bei den Versuchen mit gesteigerter Ablegegeschwindigkeit weist lediglich der Versuch V4 ein Ergebnis auf, dass über  $\Gamma(V0)$  liegt. Alle anderen sieben Tests führen zu Freisetzungsraten  $\Gamma$  von weniger als  $0,5 \text{ N/mm}$ . Im Schnitt beträgt die Energiefreisetzungsrate  $\Gamma(250 \text{ mm/s}) = 0,42 \text{ N/mm}$ . Teilweise ist die gemessene Energiefreisetzungsrate  $\Gamma$  mit weniger als  $0,1 \text{ N/mm}$  so gering, dass die beiden Tapeschichten kaum miteinander verbunden sind.



**Bild 6.6:** Ergebnisse des  $180^\circ$ -Rollenschältests für die zweilagige Laminats  
*Results of the  $180^\circ$  mandrel peel test for the two-layer laminates*

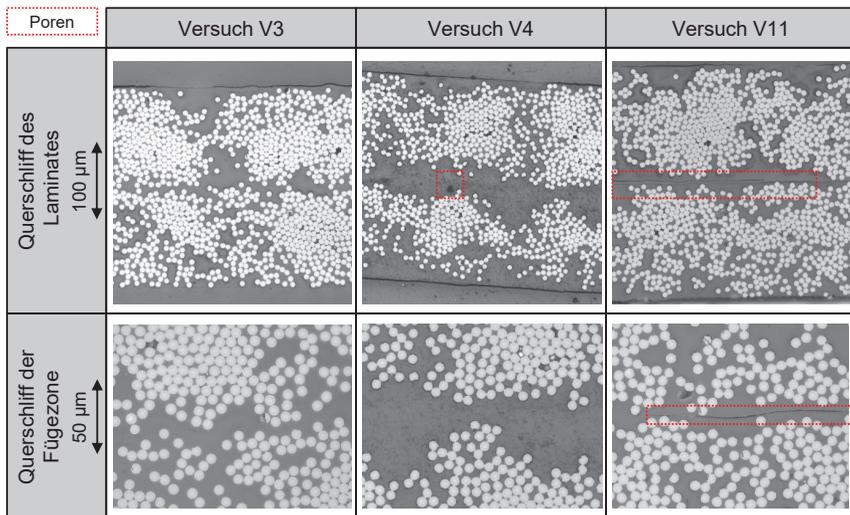
Eine hohe Ablegegeschwindigkeit in Kombination mit der geringsten Gesamtstrahlerleistung, s. V13, führt zu der geringsten Fügefestigkeit aller Versuchspunkte. Von den Parametersätzen mit hoher Ablegegeschwindigkeit weist lediglich V4, der mit einer hohen Gesamtstrahlerleistung und einem niedrigen Strahlerabstand durchgeführt wurde, mit  $\Gamma(V4) = 1,70 \text{ N/mm}$  eine hohe Fügefestigkeit auf. Es ist daher naheliegend, dass bei den anderen Versuchen mit hoher Prozessgeschwindigkeit kein ausreichender Wärmeeintrag stattgefunden hat.

Der Parametersatz V8 mit der höchsten Prozesstemperatur, charakterisiert durch hohe Strahlerleistung bei geringer Geschwindigkeit und kleinem Strahlerabstand, führt mit  $\Gamma(V8) = 1,61 \text{ N/mm}$  zu einer ähnlichen Konsolidierungsgüte. Wird jedoch bei ebenfalls geringer Geschwindigkeit die Tape- und Zwickelenergie reduziert, vgl. V3, so lässt sich die höchste Energiefreisetzungsrate von  $\Gamma(V3) = 1,97 \text{ N/mm}$  erreichen. Gleichzeitig ist die Standardabweichung mit  $0,07 \text{ N/mm}$  sehr gering, sodass es sich ebenfalls um einen stabilen Prozesspunkt handelt. Die maximale Energiefreisetzungsrate wird somit nicht bei dem Parametersatz mit dem höchsten Wärmeeintrag erreicht. Dies verdeutlicht, dass eine zu hohe Prozesstemperatur zu einer Schädigung des Matrixmaterials und damit einer verringerten Konsolidierungsqualität führt.

Zur Beurteilung der Konsolidierungsqualität werden zusätzlich Querschliffe des Laminats angefertigt. Dies ermöglicht insbesondere eine Beurteilung der Ausbildung des Kontaktanteils  $D_{ic}$ . In Bild 6.7 sind die Querschliffe der Versuche V3 und V4 sowie von Versuch V11 exemplarisch dargestellt. Aus dem Ablegeversuch V3 ergibt sich eine sehr homogene Fügezone ohne sichtbare Poren. Zusätzlich ist die Fügezone zwischen den beiden Lagen kaum als matrixreiche Zone erkennbar. Im Querschliff der Probe aus Versuch V4 sind sporadisch einzelne Poren mit Abmaßen in der Größenordnung von  $10 \mu\text{m}$  in der Fügezone erkennbar. Im Wesentlichen liegt aber auch hier

ein vollständiger Lagenkontakt vor. Dies bestätigt die in Kapitel 4.2.2 getroffenen Annahmen eines robusten Konsolidierungsprozesses, falls sich lediglich kleine Poren bilden. Dahingegen ist bei Versuch V11 eine deutliche, großflächige Trennschicht zwischen den beiden Schichten erkennbar. An dieser Stelle hat keine Verschweißung zwischen den beiden Tapes stattgefunden, da kein ausreichender Lagenkontakt gegeben ist.

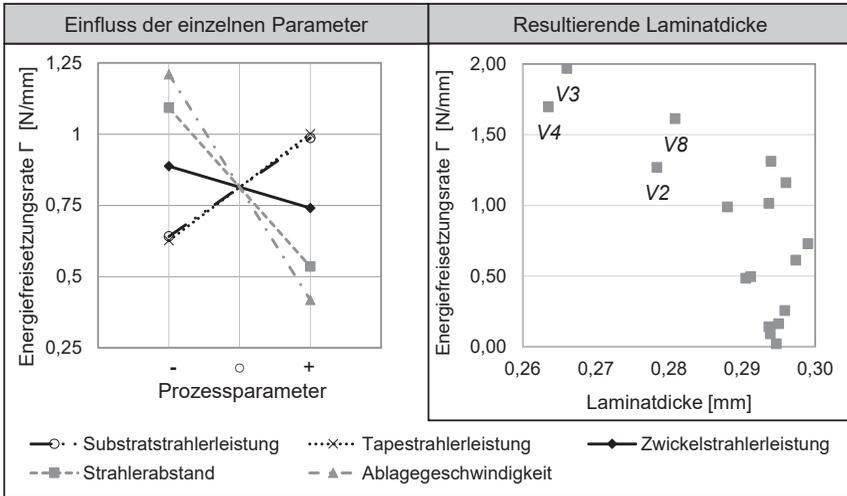
Die Schlißbilder der drei genannten Versuche weisen alle nicht auf die Entstehung intralaminarer Poren hin. Eine Schädigung des Tapes durch Porenwachstum im Tapelegeprozess kann damit für diese Prozessparameter ausgeschlossen werden. Querschliffe von Versuchen, bei denen hohe Energieeinträge vorliegen, zeigen jedoch stärkere Porenbildung. Die Untersuchung der Schlißbilder unterstützt somit die Ergebnisse des  $180^\circ$ -Schältests. Offensichtlich ist, dass ein geringer Lagenkontaktanteil  $D_{IC}$  zu sehr niedrigen Schälwiderständen führt. Eine Unterscheidung der Fügefestigkeiten bei Laminaten mit  $D_{IC}$  nahe 100 %, wie für V3 und V4, ist optisch jedoch nicht möglich. Die festigkeitsbestimmenden Diffusionsvorgänge in der Fügezone können nur durch die zerstörende Prüfung beurteilt und quantifiziert werden.



**Bild 6.7:** Querschliffe der zweilagigen Versuchsproben  
*Cross sections of the specimens with two layers*

### Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Methode der statistischen Versuchsplanung erlaubt es, die Effekte der einzelnen Faktoren zu quantifizieren und miteinander zu vergleichen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Bild 6.8 alle Effekte der Prozessparametervariation in einer Grafik dargestellt. Die Tape- und Substratstrahlerleistung haben einen stark positiven Effekt auf die erzielbare Energiefreisetzungsrates bzw. Konsolidierungsgüte.



**Bild 6.8:** Einfluss der Prozessparameter auf die Konsolidierungsqualität, gemessen anhand der Energiefreisetzungsrate, und Korrelation mit der Tapeaufweitung  
*Influence of the process parameters on consolidation quality, quantified by energy release-rate, and correlation with the widening of the tape*

Ein steigender Strahlerabstand mit einer folglich geringeren effektiven Strahlungsintensität führt zu einer Verschlechterung der Konsolidierungsqualität. Eine steigende Intensität des Zwickelstrahlers hat einen leicht negativen Einfluss. Dabei ist zu beachten, dass der Wert der Zwickelstrahlerleistung zwischen 90 % und 100 % variiert wird und damit im Vergleich zu den anderen Parametern einen hohen Absolutwert aufweist. Den größten negativen Einfluss auf die erzielbare Energiefreisetzungsrate hat die Ablagegeschwindigkeit. Diese Effekte bestätigen die in Kapitel 4.2 entwickelten Modelle, die bei hoher Prozessgeschwindigkeit und geringer Prozess Temperatur eine verringerte Konsolidierungsqualität vorhersagen.

Da eine berührungslose Temperaturmessung aufgrund des Spektralbereichs der Strahler keine zuverlässigen Messergebnisse liefert, wird stattdessen die geometrische Änderung des Tapequerschnitts als Maß des Aufschmelzgrads gemessen. Ein vollständig aufgeschmolzenes Tape weitet sich durch den Druck beim Konsolidieren auf, sodass bei Annahme einer Volumenkonstanz die Dicke des Laminats abnimmt. Bei der Darstellung der Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Laminatdicke wird deutlich, dass eine reduzierte Laminatdicke mit einer höheren Energiefreisetzungsrate korreliert. Als Ausgangsdicke wird dabei von  $2h_T = 0,30 \text{ mm}$  ausgegangen.

Bei beiden Versuchen mit der höchsten resultierenden Energiefreisetzungsrate kommt es ebenfalls zu der größten Tapeaufweitung. Insgesamt weisen nur vier Versuchsparameter eine um mehr als 5 % signifikant verringerte Laminatdicke auf. Die anderen zwölf Parametersätze führen zu keiner deutlichen Tapeaufweitung. Neben den kaum konsolidierten Proben lassen sich darunter aber auch Proben mit 50 % bis 70 % der

maximal erreichbaren Energiefreisetzungsrates finden. Dies zeigt, dass sich mit der entwickelten Anlagentechnik auch teilkonsolidierte Laminatlagen ohne wesentliche Beeinflussung der Tapegeometrie fertigen lassen. Kritisch ist jedoch anzumerken, dass bei der Durchführung des Schältests die unterschiedlichen Laminatdicken und daraus resultierenden Biegesteifigkeiten die Messergebnisse verfälschen können.

Insgesamt ist festzustellen, dass das IR-basierte Tapelegen mit der entwickelten Anlagentechnik eine in-situ Konsolidierung ermöglicht. Dabei kann eine nahezu porenfreie Konsolidierungsqualität erreicht werden. Das in Kapitel 4.4 hergeleitete statistische Modell zur Beurteilung der Prozessqualität kann damit qualitativ bestätigt werden. Die Analyse der Tapeaufweitungen zeigt weiterhin, dass in vielen Versuchspunkten zu wenig Wärmeenergie eingebracht wurde. Daher sollen alle weiteren Versuche mit geringerem Strahlerabstand und erhöhter Werkzeugtemperatur durchgeführt werden. Um die Übertragbarkeit auf die Laminatfertigung unter Berücksichtigung zusätzlicher Parameter und makroskopischer Eigenschaften nachweisen zu können, werden mehrlagige und großflächige Laminatlagen gefertigt. Neben den mechanischen Eigenschaften wird ebenfalls die Maßhaltigkeit charakterisiert. Die zuvor entwickelten Prozessparameter bilden dabei die Grundlage einer erneuten Parameterstudie, welche die geänderten Randbedingungen eines mehrlagigen Laminats berücksichtigt.

## 6.2 Laminatfertigung

### *Manufacturing of laminates*

Die Fertigung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ist die Hauptfunktion der entwickelten Anlagentechnik und soll daher validiert und bewertet werden. Die erreichbaren mechanischen Eigenschaften als wichtiges Kriterium der Laminatqualität lassen sich anhand von standardisierten Prüfkörpern quantifizieren. Als Kenngrößen werden die scheinbare interlaminae Scherfestigkeit ILSS nach DIN 14130 sowie die Biegefestigkeit und -steifigkeit anhand der Dreipunktbiegeprüfung nach DIN 14125 bestimmt. Abschließend wird die makroskopische Laminatqualität der Testlaminatlagen diskutiert. Dabei wird insbesondere die Laminatkrümmung, die Verschnittgenauigkeit und der Porenanteil als Bewertungskriterium herangezogen.

### 6.2.1 Optimierung der Prozess- und Systemparameter

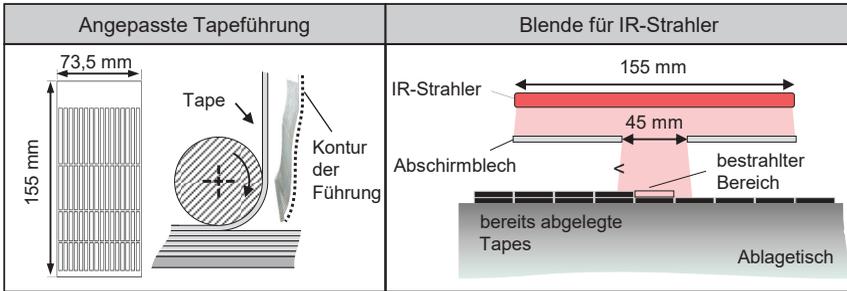
#### *Optimization of the system and process parameters*

In Kapitel 6.1 wurden der grundlegende Prozess des Verschweißens zweier Tapes während der Ablage nachgewiesen und optimierte Prozessparameter ermittelt. Die Fertigung von mehrlagigen Laminaten, bestehend aus einer Vielzahl einzelner Tapes, erfordert eine Anpassung des Systems und der Prozessparameter.

#### **Systemoptimierung**

Zur Vermeidung von Überlappungen oder Lücken zwischen nebeneinander abgelegten Tapes ist eine exakte, parallele Ablage erforderlich. Deswegen wird das Führungssystem, bestehend aus einem Metallgitter, so angepasst, dass das Tape bis in den

Zwickelbereich hineingeführt werden kann, vgl. Bild 6.9 links. Die zu fertigenden Laminats zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften weisen eine Dicke von 2 mm auf, sodass 14 Tape-Lagen konsolidiert werden müssen. Die Breite des IR-Strahlers überragt die Prozesszone der Mono-Tapeablage deutlich, was zu einem hohen Energieeintrag in das Laminat führt. Daher wird der Strahler mit einer Blende versehen, sodass nur die Prozesszone bestrahlt wird, vgl. Bild 6.9 rechts.



**Bild 6.9:** Optimierung der Tafelführung und Strahlergeometrie

*Optimization of the tape guiding unit and heater geometry*

### Optimierte Prozessparameter

Bei der Fertigung eines mehrlagigen Laminats bildet sich ein transientes Temperaturprofil im Substrat aus, das abhängig von Material, Laminatdicke und Aufbau sowie eingebrachter Wärmeenergie bzw. den gewählten Prozessparametern ist, vgl. Kapitel 4.2.2. Nach DI FRANCO kommt dabei insbesondere der Substraterwärmung eine wichtige Rolle zu [DIFR16]. Laut KERMER-MEYER sollte eine Werkzeugtemperatur nahe, aber dennoch unterhalb der Rekristallisationstemperatur eingestellt werden [KERM15, S. 79]. Dies hat zusätzlich den positiven Effekt, dass die Tapes ohne weitere Hilfsmittel auf der beheizten Werkzeugform anhaften und eine weitere Erstlagenfixierung entfallen kann, vgl. [BERE02].

Die verfügbare Kühlstrecke ermöglicht eine ausreichende Abkühlung des Substrats. In Vorversuchen erwies sich eine Temperatur des Andruck- und Kühlsystems von 60 °C als zielführend. Das einlaufende Tape kann mit nahezu maximal möglicher Strahlerleistung  $P_{Tape}$  erwärmt werden. Hohe Substratstrahlerleistungen  $P_{Substrat}$  führen jedoch zu einem zu hohen Energieeintrag in das bereits abgelegte Material, sodass ein Basispunkt von  $P_{Substrat} = 50\%$  gewählt wird. Die in den Vorversuchen ermittelten Basisparameter für die Laminatfertigung sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Der Prozessparameter Substratstrahlerleistung wird zwischen  $P_{Substrat} = 50\%$  und  $P_{Substrat} = 60\%$  im Zuge einer Prozessoptimierung variiert.

**Tabelle 6.3:** Gewählte Parameterwerte für die Laminatfertigung*Set parameter values for the manufacturing of laminates*

Parameter	Werte	Parameter	Werte
Strahlerleistung $P_{\text{Substrat}}$	15,5 / 17,0 / 18,5 W/mm ( $\pm 50\%$ / $55\%$ / $60\%$ )	Rollen- und Kühlschuh- temperatur $T_{\text{Rolle}}$	60 °C
Strahlerleistung $P_{\text{Tape}}$	19,5 W/mm ( $\pm 95\%$ )	Werkzeugtemperatur $T_W$	160 °C
Strahlerleistung $P_{\text{Zwickel}}$	10,3 W/mm ( $\pm 100\%$ )	Tapegeschwindigkeit $v_T$	200 mm/s
Strahlerabstand $\Delta z$	30 mm	Konsolidierungskraft $F_K$	650 N

## 6.2.2 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

*Measurement of the mechanical properties*

Die mechanischen Eigenschaften werden anhand von Dreipunktversuchen zerstörend geprüft. Die Bestimmung der Biegeeigenschaften, d. h. des Biegemoduls  $E_B$  sowie der maximalen Biegespannung  $\sigma_{fM}$ , wird mittels einer Dreipunktbiegeprüfung, DIN 14125, durchgeführt [DIN 11]. Da bei dieser Prüfung Zug- und Druckspannungszustände dominieren, wird zusätzlich die interlaminare Scherfestigkeit nach DIN 14130 bestimmt [DIN 97]. Diese wird anhand eines Biegeversuchs an einem kurzen Balken ermittelt, bei dem aufgrund des geringen Auflagerabstands die Scherspannungen überwiegen. Im Tapelegeprozess wird maßgeblich die Verbindungsfestigkeit der Lagen untereinander beeinflusst, sodass für die genannten Parametervariationen der Substraterwärmung verschiedene Biege- und Scherfestigkeiten zu erwarten sind. Die Steifigkeitswerte werden dahingegen von den Eigenschaften des Ausgangsmaterials dominiert, weshalb ein geringerer Einfluss der Prozessparameter zu vermuten ist. Die Eigenschaften der Prüfversuche und Probekörper sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

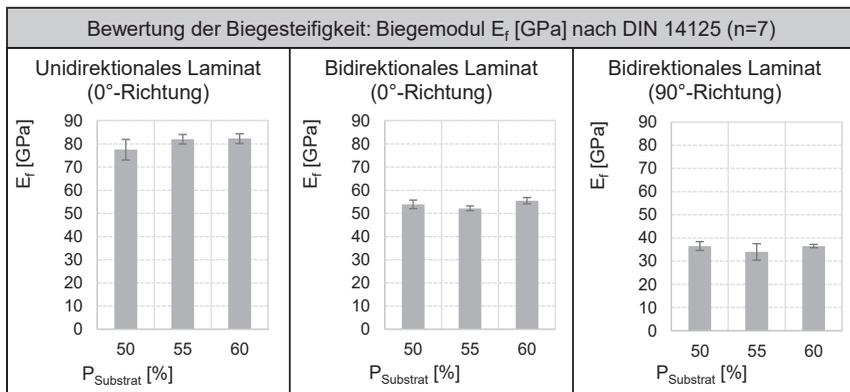
**Tabelle 6.4:** Beschreibung der Dreipunktprüfungen*Description of the three point material tests*

Parameter	Dreipunktbiegeversuch	ILSS
Norm	DIN 14125	DIN 14130
Länge des Probekörpers	$l_P = 100\text{ mm}$	$l_P = 20\text{ mm}$
Breite des Probekörpers	$b_P = 15\text{ mm}$	$b_P = 10\text{ mm}$
Dicke des Probekörpers	$h_P = 2\text{ mm}$	$h_P = 2\text{ mm}$
Prüfgeschwindigkeit	$v = 5\text{ mm/min}$	$v_P = 1\text{ mm/min}$
Auflagerabstand	$L_A = 80\text{ mm}$	$L_A = 10\text{ mm}$
Messgröße	Max. Biegespannung $\sigma_{fM}$ Biegemodul $E_f$	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit $\tau$

Beide Tests werden sowohl für unidirektionale Laminat  $[0]_{14}$  und ein symmetrisches, bidirektionales Laminat  $[0/90/0/90/0/90/0]_S$  durchgeführt. Um einen Einfluss der Prüf- und Herstellungsbedingungen auszuschließen, wird für alle Tests ein Prüfklima mit einer Temperatur von  $20 (\pm 1) ^\circ\text{C}$  und eine relativen Feuchte von  $\varphi_{rel} = 39\%$  gewählt und die Proben zuvor für 24 Stunden unter diesen Bedingungen konditioniert.

### Biegeeigenschaften

Der 3-Punkt Biegeversuch erlaubt sowohl die Bestimmung des Biegemoduls  $E_f$  wie auch der maximalen Biegespannung  $\sigma_{fM}$ . Die Ergebnisse des Biegemoduls  $E_f$  sind in Bild 6.10 dargestellt. Das unidirektionale Laminat weist einen maximalen Biegemodul von  $E_f = 82,3 \text{ MPa}$  bei  $P_{Substrat} = 60\%$  auf.



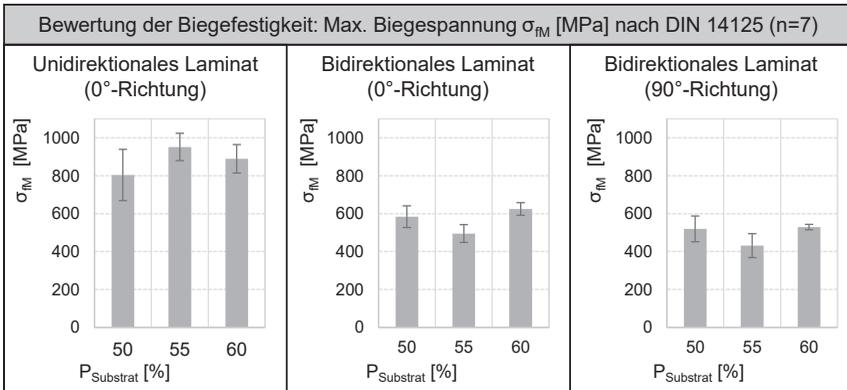
**Bild 6.10:** Ermittelte Biegemodule  $E_f$  der Testlaminat in Abhängigkeit der Substratstrahlerleistung, vgl. [JANS17a]

*Flexural modulus  $E_f$  of laminates subject to the heating power of the substrate*

Auch bei geringerer Erwärmung des Substrats lassen sich ähnliche Werte erzielen, jedoch liegt bei  $P_{Substrat} = 50\%$  eine höhere Streuung der Messwerte vor. Die erreichte Steifigkeit liegt damit zwischen den in Bild 6.2 genannten Herstellerangaben von  $E_F = 64 \text{ GPa}$  bzw.  $E_F = 98 \text{ GPa}$ , die nach ASTM D790 ermittelt wurden [CELA14; TICO09]. Für die Steifigkeit des bidirektionalen Laminats zeigt sich ebenfalls nur eine geringe Abhängigkeit von der Substratstrahlerleistung. Die unterschiedlichen Werte in  $0^\circ$ -Richtung und  $90^\circ$ -Richtung lassen sich auf den Laminataufbau zurückführen. Beim Prüfkörper in  $0^\circ$ -Richtung sind die Fasern der äußeren Lagen parallel zur Biegebeanspruchung ausgerichtet, sodass der Biegemodul mit  $E_{f,0^\circ} = 55,5 \text{ GPa}$  über dem des  $90^\circ$ -gedrehten Prüfkörpers mit  $E_{f,90^\circ} = 36,5 \text{ GPa}$  liegt. Die Streuungen der Werte sind sehr gering, was auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Tapeablage sowie geringer Faserondulation und homogener Verteilung der Tapes schließen lässt.

Die Untersuchung der Biegefestigkeit, s. Bild 6.11, zeigt größere Schwankungen in Abhängigkeit der Substratstrahlerleistung. Die maximale Biegefestigkeit wird beim unidirektionalen Laminat für  $P_{Substrat} = 55\%$  mit  $\sigma_{fM} = 952 \text{ MPa}$  erreicht. Dieser Wert beträgt mehr als 90 % des vom Hersteller angegebenen Maximalwerts, sodass von

einer guten Konsolidierungsqualität gesprochen werden kann. Die maximalen Festigkeitswerte für das bidirektionale Laminate werden hingegen bei  $P_{Substrat} = 60\%$  erreicht. Für diesen Parametersatz ist die Streuung der Messergebnisse sehr gering. Es ist jedoch kein eindeutiger Zusammenhang erkennbar, da bei  $P_{Substrat} = 55\%$  die geringsten Biegefestigkeiten erzielt werden.



**Bild 6.11:** Biegefestigkeit der Testlaminat in Abhängigkeit der Substratstrahlerleistung, vgl. [JANS17a]

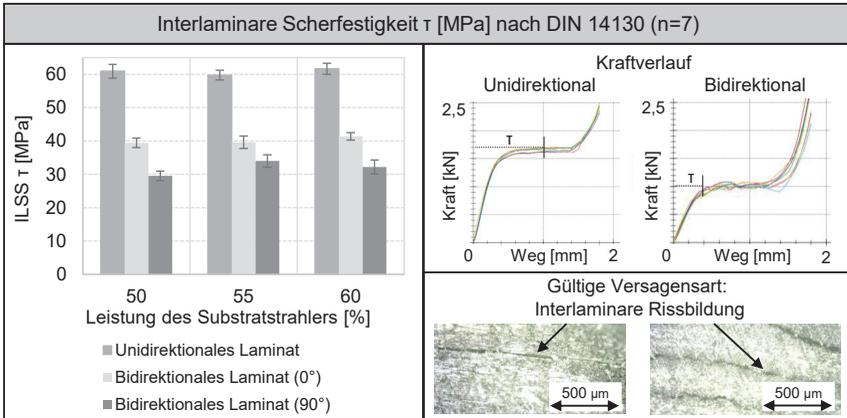
*Flexural strength of laminates subject the heating power of the substrate*

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die erreichten Festigkeits- und Steifigkeitswerte ein hohes Niveau aufweisen. Gleichzeitig ist die Streuung der einzelnen Werte und die Abhängigkeit von der Parametereinstellung verhältnismäßig gering, sodass ein robuster Prozess vorliegt.

### Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit

Die Untersuchung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit eignet sich insbesondere zur Bestimmung der Konsolidierungsqualität der Fügezone zwischen den Tapeschichten. Sie ist ein Maß dafür, unter welcher Scherbeanspruchung eine interlaminare Rissbildung entsteht. Die im Kurzbiegeversuch vorherrschenden Spannungszustände können jedoch auch zu einem Druckversagen der Probe, z. B. im Bereich der Auflager, führen. Daher ist besonders auf die Gültigkeit der Versagensart zu achten.

Sowohl für das unidirektionale als auch für das bidirektionale Laminate tritt interlaminare Versagen als erster Schädigungsmechanismus auf, s. Bild 6.12 rechts. Während beim bidirektionalen Laminate der Beginn des Versagens durch einen kurzfristigen Rückgang der Scherspannung genau bestimmt werden kann, liegt bei dem unidirektionalen Laminate ein konstantes Spannungsplateau vor.



**Bild 6.12:** Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit der Testlaminat  
*Determination of the specimens' interlaminar shear strength*

Die gemessenen Werte der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit  $\tau$  sind nahezu unabhängig von der Erwärmung durch den Substratstrahler. Jedoch werden sie stark vom Lagenaufbau und daher von der Steifigkeit der Laminat beeinflusst. Alle Tests weisen eine geringe Streuung auf, sodass von einem stabilen Prozess ausgegangen werden kann. Der maximale gemessene Wert von  $\tau = 62 \text{ MPa}$  liegt über den in der Literatur bekannten Werten für ähnliche Tapes anderer Hersteller. Für das PA6/CF-Material *Cetex TC910* des Herstellers *TenCate* sind Werte von  $\tau = 43 \text{ MPa}$  bekannt [TORA19]. Im Forschungsprojekt *2DMultiMat* wird für ein PA6/CF-Tape mit Faservolumenanteil  $\varphi_f = 49\%$  ein Wert von  $\tau = 53 \text{ MPa}$  als bester erreichbarer Wert bei Konsolidierung mit einer Doppelbandpresse angegeben. Dieser lässt sich mittels Nachkonsolidierung in einer Presse auf ca.  $70 \text{ MPa}$  steigern [KROP17a].

### Fazit der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Zusammenfassend lässt sich in der Tapeablage mit in-situ Konsolidierung eine gute Konsolidierungsqualität erreichen, sodass die entsprechende Forschungshypothese verifiziert ist. Die erzielbaren mechanischen Eigenschaften der Normprobekörper reichen bis an die Herstellerangaben, die mit gepressten Probekörpern ermittelt wurden, heran. Gleichzeitig wird offensichtlich, dass die makroskopische Laminatbeschaffenheit und der Laminataufbau einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften besitzen.

### 6.2.3 Makroskopische Laminatqualität

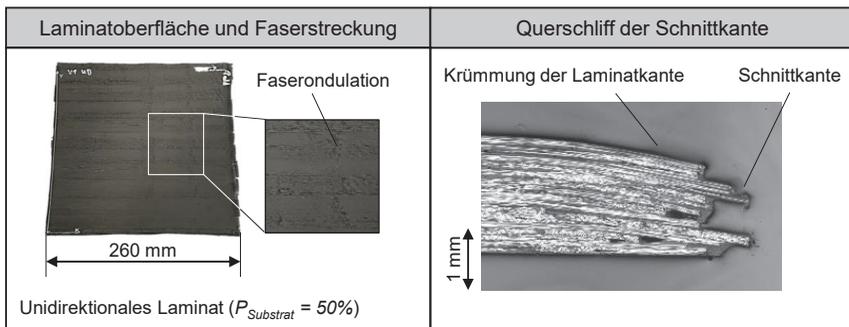
#### *Macroscopic quality of the laminates*

Neben den mechanischen Eigenschaften sind sowohl die Oberflächenqualität als auch die Schnittgenauigkeit zu bewerten. Auch der Porenanteil, der einen Einfluss auf die statischen mechanischen Eigenschaften aber auch auf weitere Eigenschaften, wie

z. B. dynamische Festigkeiten, aufweist, wird anhand von Querschliffen bestimmt. Abschließend soll die Formhaltigkeit der Laminare charakterisiert werden, die insbesondere für eine Weiterverarbeitung von Bedeutung ist.

### Oberflächenqualität und Verschnittgenauigkeit

Die beiden Seiten des Laminates weisen unterschiedliche Oberflächeneigenschaften auf. Die dem Ablegetisch zugewandte Unterseite wird maßgeblich von der Werkzeugoberfläche beeinflusst. Die Oberseite, die aus der Ablage der Tapes gebildet wird, kann wesentlich durch die Prozessführung während des Ablegens der letzten Lage bestimmt werden. Durch das Abkühlen im offenen Prozess ist die Oberseite matt und rauer als die Oberfläche des ursprünglichen Tapes und als die auf der Werkzeugform aufliegende Unterseite. Zusätzlich entsteht, insbesondere im Bereich des Bahnanfangs, eine sichtbare Faserondulation, vgl. Bild 6.13 links. Dies kann auf die fehlende Tapespannung in diesem Prozessbereich zurückgeführt werden.



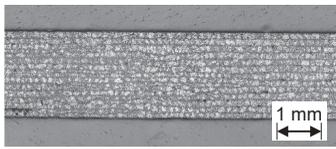
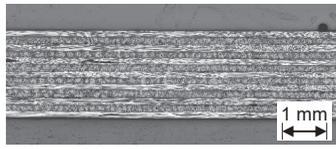
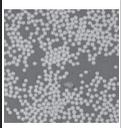
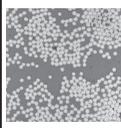
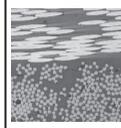
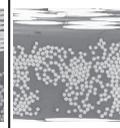
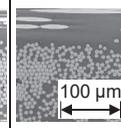
**Bild 6.13:** Oberflächenbeschaffenheit und Schnittkantengeometrie der Testlaminare  
*Surface properties and edge geometry of the test laminates*

Wird die Schnittkante im Querschliff betrachtet, so lässt sich die Schnittgenauigkeit von ca. 1,5 mm, vgl. Kapitel 5.2.2, validieren. Die Oberseite ist jedoch leicht gekrümmt, sodass die Laminatdicke im Bereich der Schnittkante geringer ist, obwohl die gleiche Lagenanzahl vorliegt. Da die Rolle mit konstanter Kraft beaufschlagt wird, stellt sich im Bereich der Schnittkante ein höherer Druck im Laminat ein als in der Laminatmitte, sodass es durch die Abrollbewegung zu einer Fließbewegung der Matrix aus dem Laminat kommt. Dadurch liegt im Bereich der Laminatkante eine geringfügig reduzierte Laminatdicke  $H_j$  vor.

### Porenanteil

Zur Bestimmung des Porenanteils werden Laminatquerschliffe angefertigt, s. Bild 6.14. Sowohl für den unidirektionalen als auch den bidirektionalen Laminataufbau weisen die Einzelschichten sowie das gesamte Laminat eine homogene Dicke und gleichmäßige Verteilung auf. Poren entstehen hauptsächlich an den Stoßkanten zweier parallel abgelegter Tapes. Beim bidirektionalen Laminataufbau sind die unterschiedlichen Faserorientierungen gut zu unterscheiden.

Die Faserlagen, bei denen die Faserrichtung in der Ebene des Querschliffs liegt, sind durch lange, im Querschliff hell dargestellte, Faserabschnitte zu erkennen. In diesen Lagen sind vereinzelt großflächige dunkle Stellen abgebildet. Dabei handelt es sich nicht um intralaminare Poren, sondern um Faserausbrüche während der Präparation.

	Unidirektionales Laminate			Bidirektionales Laminate		
Querschliff des Laminats						
$P_{\text{Substrat}}$	50 %	55 %	60 %	50 %	55 %	60 %
$\varphi_P$	0,85 %	1,05 %	0,80 %	1,3 %	1,1 %	1,1 %
Querschliff der Fügezone						

**Bild 6.14:** Analyse der Querschliffe zur Ermittlung des Porengehalts der Laminats in Abhängigkeit der Substratstrahlerleistung

*Analysis of microscopic cross-section regarding the void content of the laminates subject to the power of the substrate heater*

Für die Bewertung der Konsolidierungsqualität sind maßgeblich die interlaminaren Poren relevant. In der Fügezone sind lediglich sporadisch Poren mit einer Größe von wenigen Mikrometern zu erkennen. Eine ausgeprägte Grenzschicht oder Änderungen in der Matrixbeschaffenheit zwischen den einzelnen Tapelagen sind ebenfalls nicht zu erkennen. Daher kann mit allen Prozessparametern ein nahezu vollständiger inniger Lagenkontakt erzielt werden. Um den Porenanteil  $\varphi_P$  zu quantifizieren, wird mittels der Software *imageJ* eine Grauwertanalyse durchgeführt. Dabei werden alle Bereiche, deren Grauwerte unterhalb eines Schwellwerts liegen, als Poren erkannt. Auch wenn diese Methode einigen Schwankungen unterliegt, kann der ermittelte Porenanteil  $\varphi_P$  von 0,8 % bis 1,3 % als gering beurteilt werden. Das beim bidirektionalen Laminate höhere Werte als beim unidirektionalen Laminate errechnet werden, ist auf die zuvor beschriebenen Faserausbrüche bei der Präparation zurückzuführen.

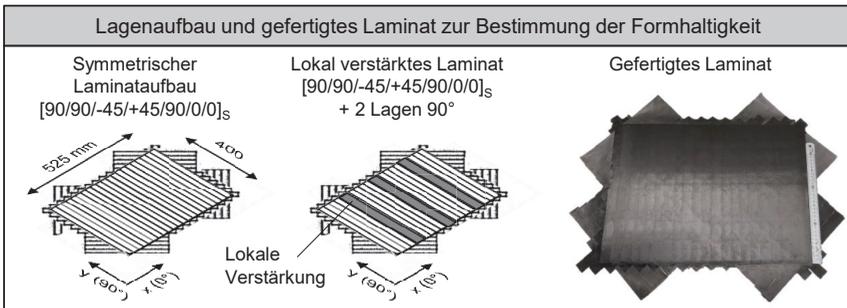
Diese Schliffbilder bestätigen die zuvor anhand der mechanischen Prüfung getroffene Aussage, dass eine gute Laminatqualität erzielt werden kann. Der auf die in-situ Konsolidierung zurückzuführende Porenanteil ist gegenüber anderen Störquellen, wie z. B. den Tapeanten oder Poren im Ausgangsmaterial, vernachlässigbar.

### Formhaltigkeit

Bei der Herstellung von Organoblechen entstehen aufgrund von Schwindungs- und Schrumpfeffekten Eigenspannungen, die insbesondere bei nicht symmetrischen Lami-

naufbauten in einer Krümmung der Lamine resultieren. Die Formhaltigkeit der Lamine kann daher als makroskopisches Gütekriterium angesehen werden. KERMER-MEYER hat ein Modell zur Vorhersage und Minimierung der Laminatkrümmung entwickelt. Dies beschränkt sich jedoch im Wesentlichen auf unidirektionale Lamine unter Berücksichtigung der anisotropen Materialeigenschaften. [KERM15, S. 45–96]

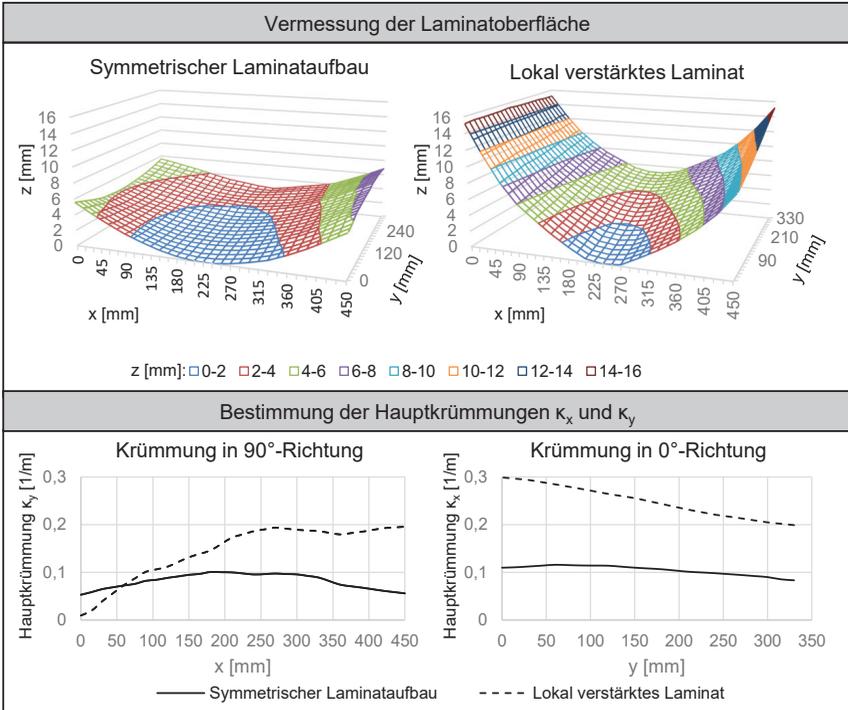
Die Erkenntnisse, insbesondere die positive Auswirkung einer Kühlstrecke, sind bereits in die Konzeptentwicklung des Prüfstands, vgl. Kapitel 5, eingeflossen. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen validieren zu können, werden großflächige Testlamine mit Abmaßen von  $525 \times 400 \text{ mm}^2$  gefertigt. Die verschiedenen Lagenaufbauten samt lokaler Verstärkung und ein real gefertigtes Laminat sind in Bild 6.15 abgebildet. Die Temperatur der Konsolidiereinheit  $T_{\text{Rolle}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  wird so gewählt, dass eine schnelle Kühlung des Substrats erreicht wird, ohne zu große Abkühlereffekte im Zwickelbereich zu verursachen. Als Testlaminat wird ein symmetrischer Lagenaufbau mit  $[90/90/-45/+45/90/0/0]_S$  gewählt. Um ebenfalls die Auswirkungen eines nicht symmetrischen Lagenaufbaus mit Dickensprüngen zu untersuchen, werden zusätzlich lokal verstärkte Lamine gefertigt. Diese bestehen aus dem 14-lagigen symmetrischen Aufbau, der einseitig lokal mit  $90^\circ$ -Lagen verstärkt wird. Die Lamine werden im weiteren Verlauf, vgl. Kapitel 7, zu hybriden Bauteilen weiterverarbeitet.



**Bild 6.15:** Lamine zur makroskopischen Untersuchung der Formhaltigkeit  
*Laminates for determination of warpage*

Die Formhaltigkeit lässt sich mit Hilfe der Oberflächenkrümmung  $\kappa$  quantifizieren. Diese entspricht dem Reziprok des lokalen Krümmungsradius  $R$  einer Oberfläche und lässt sich nach [KERM15, S. 75] aus der Höhendifferenz  $\Delta h$  der Oberfläche mit Stützweite  $w$  berechnen zu:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{2\Delta h}{\Delta h^2 + \frac{w^2}{4}} \quad (6.2)$$



**Bild 6.16:** Bestimmung der Formhaltigkeit der Laminatte  
*Evaluation of the dimensional stability of the laminates*

Die Oberflächen der Laminatte werden mittels einer Koordinatenmessmaschine des Herstellers *Werth Messtechnik* vermessen. Der Abstand der Messpunkte in x- und y-Richtung beträgt dabei jeweils *15 mm*. In Bild 6.16 ist der gemessene Höhenverlauf für beide Laminatte dargestellt. Das Minimum in der Laminatmitte wird dabei mit  $z = 0 \text{ mm}$  definiert. Für jede vermessene x- bzw. y-Zeile wird die entsprechende Hauptkrümmung  $\kappa_x$  und  $\kappa_y$  aus der lokalen Höhendifferenz  $\Delta h_{xy}$  bestimmt.

Die Hauptkrümmungen des lokal verstärkten Laminats sind im Mittel ungefähr doppelt so groß wie die des symmetrisch aufgebauten Laminats. Bei den lokal verstärkten Laminat treten jedoch lokal veränderliche, unsymmetrische Krümmungen auf. Diese sind auf den Laminataufbau, aber auch auf die Ablegestrategie, d. h. die Ablegerichtung und -reihenfolge der Tapes, und der dadurch entstehenden transienten Temperaturgradienten, zurückzuführen. Vornehmlich entlang der x-Richtung sind starke Schwankung der Krümmung vorhanden, da sich in dieser Richtung verstärkte und unverstärkte Bereiche, entsprechend einer Lagenanzahl von *14* bzw. *16* Tapes, abwechseln. Entlang der y-Richtung ist die Hauptkrümmung in  $0^\circ$ -Richtung nahezu konstant mit  $\kappa_x = 0,1 \text{ 1/m}$ . Die Hauptkrümmung  $\kappa_y$  ist an den Laminaträndern weniger ausgeprägt. Der Verlauf ist nahezu symmetrisch zur Mittelachse des Laminats ( $x = 225 \text{ mm}$ ).

Die Betrachtung der Absolutwerte, vgl. Tabelle 6.4, verdeutlicht jedoch, dass die Krümmungen im Bereich  $\kappa = 0,1\text{--}0,3\ 1/m$  gering sind. Die von KERMER-MEYER gefertigten Referenzlaminare aus PA12/CF weisen mit  $\kappa = 2\text{--}6\ 1/m$  eine um den Faktor 20 höhere Krümmung auf [KERM15]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei unidirektionalen Laminaten die Steifigkeitsunterschiede in  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtung maximal sind, was die Laminatkrümmung verstärkt.

**Tabelle 6.5:** Gemittelte Krümmung der mit der Anlagentechnik gefertigten Laminare  
*Average warpage of the laminates produced with the system*

	Gemittelte Hauptkrümmungen		Gemittelte Krümmungsradien	
	$\kappa_x [1/m]$ ( $\sigma$ ) [1/m]	$\kappa_y [1/m]$ ( $\sigma$ ) [1/m]	$R_x [m]$ ( $\sigma$ ) [m]	$R_y [m]$ ( $\sigma$ ) [m]
Symmetrischer Laminataufbau	0,104 (0,010)	0,082 (0,015)	9,665 (1,00)	12,755 (2,690)
Lokal verstärktes Laminat	0,249 (0,033)	0,144 (0,057)	4,091 (0,553)	12,257 (19,511)
Referenzlaminat PA12/CF UD [KERM15, S. 84]	Ohne Kühlschuh: $\kappa = 6$ Mit Kühlschuh: $\kappa = 2$		Ohne Kühlschuh: $R = 0,167$ Mit Kühlschuh: $R = 0,500$	

Absolut betrachtet kann die Krümmung des lokal verstärkten Laminats als sehr niedrig bewertet werden. Mit der entwickelten Anlagen- und Prozesstechnik lässt sich daher eine gute Formhaltigkeit erzielen. Die maximal vorliegende Höhendifferenz von  $\Delta h = 15\text{ mm}$  erlaubt ohne Weiteres eine Weiterverarbeitung in einem Thermoformprozess, bei dem das Laminat vor dem Umformen nochmals aufgeschmolzen wird.

### 6.3 Fazit der Laminatfertigung

#### *Conclusion of laminate manufacturing*

Im Rahmen der durchgeführten Prozessuntersuchung auf Tapeebene konnte nachgewiesen werden, dass die IR-unterstützte Tapeablage einen robusten Konsolidierungsprozess ermöglicht. Die Betrachtung der Schnittkanten auf Laminatenebene zeigt, dass ebenfalls am Laminatrand eine gute Konsolidierungsqualität vorliegt. Damit ist die erste Forschungshypothese einer verschnittminimierten Verarbeitung von unidirektionalen Tapes verifiziert. Die flexible Herstellung belastungsoptimierter Laminare, Hypothese zwei, ist experimentell durch die Fertigung entsprechender Demonstratorlaminare nachgewiesen worden.

Die Laminatqualität wurde mittels einer ausführlichen Charakterisierung der Laminareigenschaften bewertet. Die mechanischen Eigenschaften liegen auf einem hohen Niveau und sind mit den erzielbaren Eigenschaften von Prozessen mit Nachkonsolidierung vergleichbar. So lassen sich Porenanteile  $\varphi_P$  von 0,8–1,3 % und Biegefestigkei-

ten von  $\sigma_{TM} = 952 \text{ MPa}$  erzielen. Die optimierte Prozessführung und der neuartige Aufbau mit verlängerter Konsolidierungsstrecke führt zu deutlich verbesserten Ergebnissen hinsichtlich der Formhaltigkeit der Lamine im Vergleich zu bisherigen Systemen mit in-situ Konsolidierung, vgl. [KERM15].

Die erforschte Prozess- und Anlagentechnik ist damit geeignet, die in der Forschungsfrage postulierte wirtschaftliche Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes mittels in-situ Konsolidierung zu realisieren. Damit kann die dritte Forschungshypothese dieser Arbeit hinsichtlich der Laminatqualität positiv beantwortet werden. Im Folgenden soll die Weiterverarbeitung der gefertigten Lamine zu hybriden Thermoplast-FVK Bauteilen betrachtet werden, um die gesamte Prozesskette vom Tape bis zum fertigen Bauteil bewerten zu können.

## 7 Fertigung der FVK-Hybridbauteile

### *Manufacturing of hybrid composite parts*

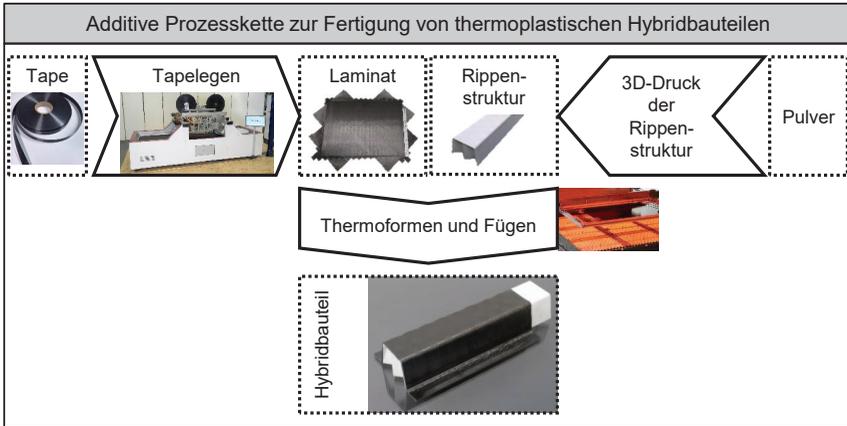
Aufbauend auf der in den vorhergehenden Kapiteln validierten Fertigung von maßgeschneiderten Laminaten soll in diesem Kapitel die Verarbeitbarkeit dieser Laminaten zu funktionalisierten Hybridbauteilen untersucht werden. Dazu wird zunächst eine entsprechende Prozesskette zur Hybridbauteilfertigung aufgebaut, s. Kapitel 7.1, anhand derer die Prozessparameter, wie Umform- und Werkzeugtemperatur sowie notwendige Presskraft, ermittelt werden. Die Bauteilgeometrie orientiert sich dabei an dem im SFB 396 entwickeltem *Erlanger Träger* [EHRE03]. Die resultierenden Bauteileigenschaften werden im 3-Punkt-Biegeversuch charakterisiert. Um die Wechselwirkung der Laminatherstellung mit den finalen Bauteileigenschaften sichtbar zu machen, findet eine prozessübergreifende Ermittlung des Kristallinitätsgrads statt. Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette in Kapitel 7.2 bewertet.

### 7.1 Hybridbauteilfertigung

#### *Manufacturing of hybrid parts*

In den vergangenen Jahren hat sich die Fertigung von Hybridbauteilen durch Umspritzen von thermoplastischen FVK-Einlegern etabliert, vgl. Kapitel 2.4.2 und [HUBE14]. Dabei werden meist Laminaten mit homogener Dicke verwendet. Belastungsoptimierte Laminaten können lokal unterschiedliche Dicken und Faserorientierungen aufweisen, sodass beim Thermoformen oder Umspritzen angepasste Kavitäten im Werkzeug erforderlich sind. Die additive Fertigung der Laminaten im Tapelegen mit in-situ Konsolidierung erlaubt demgegenüber eine hohe Variantenvielfalt ohne zusätzliche Investitionskosten für angepasste Konsolidierungswerkzeuge, was im Widerspruch zu unflexiblen und teuren Spritzgießwerkzeugen steht. Aus diesem Grund soll im Folgenden die in Bild 7.1 dargestellte additive Prozesskette zur Fertigung von thermoplastischen Hybridbauteilen beispielhaft an einem Träger mit Rippenstrukturen untersucht werden. Das Laminat wird dabei in einem einseitigen, kostengünstigen Matrizenwerkzeug umgeformt. Als Stempel wird eine zuvor additiv gefertigte Rippenstruktur aus unverstärktem Thermoplast verwendet.

Bei der Fertigung von duroplastischen FVK-Bauteilen ist die Verwendung von additiv gefertigten Kernelementen aktueller Forschungsgegenstand, vgl. [TÜRK17]. Das Umformen von Tape-basierten Thermoplast-Laminaten ist hingegen wesentlich komplexer als das Drapieren von Geweben oder das Thermoformen gewebebasierter Organobleche, da wegen der fehlenden Faserverbindung die rheologischen Eigenschaften der schmelzflüssigen Matrix das Umformverhalten dominieren. Es soll untersucht werden, wie der Fügeprozess zwischen FVK-Laminat und Kunststoffstruktur optimal zu gestalten ist.



**Bild 7.1:** Verfahren und Halbzeuge zur Fertigung von thermoplastischen Hybridbauteilen  
*Processes for manufacturing of hybrid parts out of thermoplastic materials*

### 7.1.1 Beschreibung des Fügeverfahrens

#### *Description of the joining process*

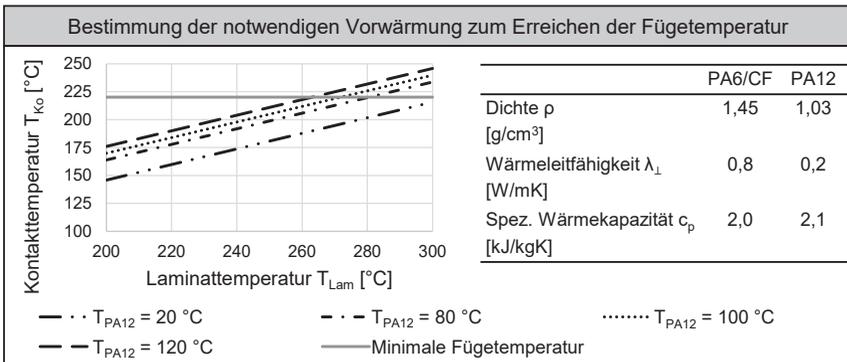
Aus dem Zwei-Komponenten-Spritzguss ist bekannt, dass sich sowohl kompatible Materialien als auch inkompatible Polymere mit gewissen Verbindungsfestigkeiten fügen lassen [HÄRT13]. Für das Montagespritzgießen beschreibt SCHUCK die zugrundeliegenden Adhäsionstheorien beim Fügen von Polymeren [SCHU09]. Das Fügen nicht kompatibler Kunststoffe erfordert eine an die beiden Komponenten angepasste Prozess- und Temperaturführung.

Im Sinne der Diffusionstheorie ist es notwendig, dass die Fügetemperatur über der Schmelztemperatur beider Fügepartner liegt. Die Fügetemperatur entspricht im vorliegenden Fall der Kontakttemperatur, die sich beim Berühren der beiden Komponenten in der Grenzfläche einstellt. Diese wird von den unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der Materialien, insbesondere der Wärmeleitung  $\lambda$  und Wärmekapazität  $c_p$ , bestimmt. Die Kontakttemperatur  $T_{Ko}$  zwischen den beiden Komponenten lässt sich unter idealisierten Randbedingungen, vgl. [HÄRT13, S. 80], berechnen zu:

$$T_{Ko} = \frac{T_1 \sqrt{\rho_1 c_{p,1} \lambda_1} + T_2 \sqrt{\rho_2 c_{p,2} \lambda_2}}{\sqrt{\rho_1 c_{p,1} \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 c_{p,2} \lambda_2}} \quad (7.1)$$

Im vorliegenden Fall soll die feste Rippenstruktur mit dem schmelzförmigen Laminat aus PA6/CF beim Umformen gefügt werden. Daher wird als Fügepartner mit PA12 ein Material gewählt, dessen Schmelztemperatur mit  $T_{m,PA12} = 180 \text{ °C}$  deutlich unter der Schmelztemperatur von PA6  $T_{m,PA6} = 220 \text{ °C}$  liegt. Die Rippenstruktur wird im selektiven Lasersintern gefertigt. Die Eingangstemperaturen sind so zu wählen, dass das Laminat die Rippenstruktur an der Oberfläche soweit aufwärmt, bis sich eine Kontakttemperatur  $T_{Ko}$  oberhalb der Schmelztemperatur  $T_{m,PA6}$  einstellt, s. Bild 7.2.

Die resultierende Kontakttemperatur  $T_{Ko}$  steigt sowohl mit der Vorheiztemperatur der Rippenstruktur als auch mit der Laminattemperatur linear an. Bei einer Vorwärmtemperatur der Rippenstruktur von  $T_{PA12} = 120\text{ °C}$  und einer Umformtemperatur des Laminats  $T_{Lam} = 265\text{ °C}$  liegt die Kontakttemperatur oberhalb der Schmelztemperatur  $T_{m,PA6}$ . Diese Werte werden daher für den Thermoformprozess verwendet. Prinzipiell lassen sich beide Fügepartner auch auf noch höhere Temperaturen erwärmen, um die Fügefestigkeit falls erforderlich zu steigern. Dies verstärkt jedoch die ungewollte Erweichung der Rippenstruktur sowie das Risiko der Degradation des Matrixmaterials. Die zur Berechnung herangezogenen thermischen Eigenschaften der Materialien sind ebenfalls dem Bild 7.2 zu entnehmen.



**Bild 7.2:** Berechnung der Kontakttemperatur  $T_{Ko}$  beim Fügen von Laminat und Rippenstruktur

*Determination of the temperature in the contact zone of laminate and rip-structure*

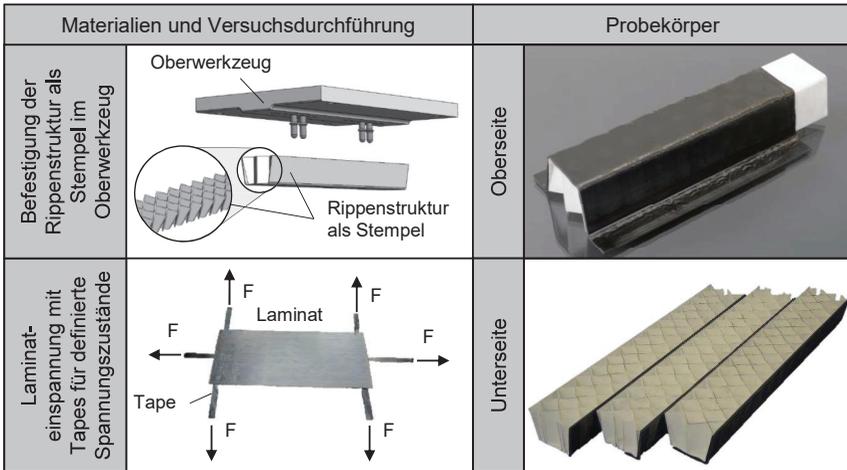
### 7.1.2 Thermoformen mit kombiniertem Fügeprozess

*Thermoforming with a combined joining process*

Die Herstellung der Hybridbauteile erfolgt im Thermoformprozess, bei dem die Rippenstruktur als Stempel dient. Sie verbindet sich stoffschlüssig mit dem Laminat und verbleibt als versteifender Einleger im Bauteil. Die Laminat mit den Abmaßen von  $400 \times 175\text{ mm}^2$  weisen den im Kapitel 6.2.3 beschriebenen Laminataufbau auf. Im Falle der belastungsoptimierten Laminat befinden sich die zusätzlichen  $0^\circ$ -Lagen auf der Oberseite der Trägergeometrie, s. Bild 6.15.

Die Umformtiefe des Stempels bei einem Entformungswinkel von  $10^\circ$  entspricht mit  $45\text{ mm}$  der Stempelbreite, sodass im Laminat erhebliche Umform- bzw. Fließvorgänge stattfinden. Daher ist es für das Erreichen einer guten Umformqualität notwendig, durch eine geeignete Einspannung Zugspannungen in das Laminat einzubringen. Zum Befestigen des Spannrahmens werden daher einlagige Tapes in  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtung verwendet, vgl. Bild 7.3 links. Im Gegensatz zu herkömmlichen Einspannungsmethoden, bei denen je nach Werkzeuggeometrie erhebliche Materialüberstände notwendig

sind, lässt sich bei der Verwendung von einlagigen Tapes zum Einspannen der entstehende Verschnitt deutlich minimieren. Für das Umformen der Trägerstruktur werden sechs überstehende Tapes benötigt. Bezogen auf die Laminatabmaße von  $175 \times 400 \times 2 \text{ mm}^3$  beträgt bei einer Einspannlänge von  $60 \text{ mm}$  der entstehende Verschnitt weniger als  $1 \%$ . Um eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Rippenstruktur und Laminat zu erreichen, werden die zuvor ermittelten Werte für die Vorheiztemperaturen eingestellt. Die Aufheizung des Stempels erfolgt dabei über einen Konvektionsofen. Das Laminat wird in einem IR-Strahlerfeld aufgeschmolzen.



**Bild 7.3:** Fertigung von thermoplastischen Hybridbauteilen in einem kombinierten Thermoform- und Fügeprozess  
*Manufacturing of hybrid thermoplastic parts in a combined thermoforming and joining process*

Die verwendeten Anlagen sowie die Prozessparameter des Thermoformens sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Insgesamt werden fünf Probekörper mit quasiisotropen Laminataufbau und fünf Probekörper mit zusätzlicher Verstärkung in  $0^\circ$ -Richtung gefertigt. Die Prüfkörper werden anschließend besäimt, sodass eine gerade Kante an der Unterseite des Prüfkörpers entsteht, s. Bild 7.3 rechts.

Mit der erfolgreichen Herstellung der Prüfkörper kann die Hypothese, dass sich thermoplastische Hybridbauteile mittels additiver Verfahren und minimalem Werkzeugaufwand fertigen lassen, validiert werden. Zusätzlich liegt die Produktivität des neu entwickelten Thermoformens mit kombiniertem Fügeprozess auf dem Niveau herkömmlicher Verfahren zur Fertigung von thermoplastischen Hybridbauteilen. Lediglich die hier nicht weiter betrachtete Herstellung der unverstärkten Rippenstruktur mittels SLS weist eine deutlich längere Prozesszeit auf.

**Tabelle 7.1:** Versuchsaufbau und Prozessparameter des Thermoformens  
*Equipment and process parameters for thermoforming trials*

Thermoform-Prüfstand	Presse:	<i>Lauffer VA 850</i>
	IR-Strahlungssofen:	<i>Krelus AG, 45 kW, beidseitige Strahlerfelder 750 x 750 mm<sup>2</sup></i>
Prozessparameter	Matrizentemperatur:	<i>60 °C</i>
	Presskraft:	<i>1000 kN</i>
	Haltezeit:	<i>2 min</i>

Prinzipiell ist es denkbar, für mittlere oder hohe Stückzahlen die Funktionsstruktur in einem Spritzgießprozess zu fertigen. Da auch bei dieser Prozesskette teure Hybridtechnik-Werkzeuge zum Umspritzen entfallen, sind ebenfalls Vorteile hinsichtlich der Investitionskosten zu erwarten.

## 7.2 Bewertung der Prozesskette

### *Evaluation of the process chain*

Die Evaluation der Prozesskette beinhaltet sowohl eine Bewertung der technischen Aspekte wie auch die Analyse ihrer Wirtschaftlichkeit. Dazu werden die in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Kriterien und Kenngrößen herangezogen.

### 7.2.1 Technische Bewertung

#### *Technical evaluation*

Die mechanischen Eigenschaften sind das wesentliche technische Bewertungskriterium des resultierenden Hybridbauteils. Diese werden exemplarisch anhand der gefertigten hybriden Trägerstrukturen ermittelt und bewertet. Zusätzlich wird als charakteristische Größe für die Struktur der polymeren Matrix die Kristallinität nach den jeweiligen Prozessschritten herangezogen.

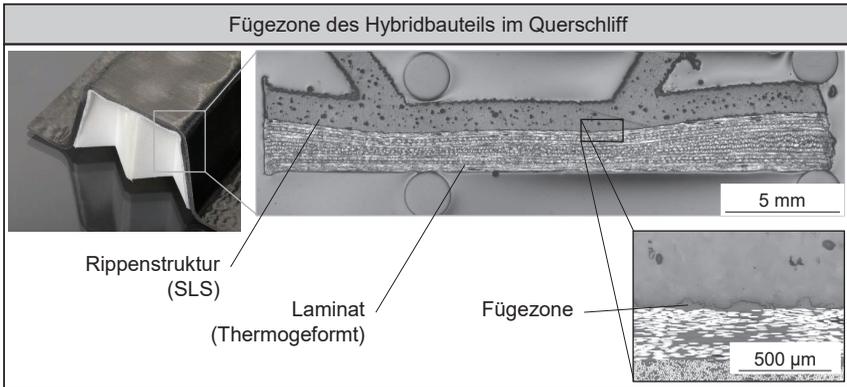
#### **Eigenschaften der Hybridbauteile**

Die Eigenschaften des Hybridbauteils werden maßgeblich von der nach dem Thermoformen vorliegenden Laminatqualität sowie der Verbindungsfestigkeit mit der Rippenstruktur bestimmt. Zunächst wird die Bauteilqualität anhand von Schlißbildern beurteilt, bevor die Festigkeit des Trägers im 3-Punkt Biegeversuch ermittelt wird. Der in Bild 7.4 dargestellte Querschliff zeigt, dass die mittels SLS gefertigte Rippenstruktur einen hohen Porenanteil aufweist. Im FVK-Laminat sind hingegen auch nach dem Thermoformen nur wenige Poren vorhanden.

Auffällig ist, dass nach dem Thermoformen keine homogene Wandstärke des Laminats mehr vorliegt. In den Bereichen, in denen die Rippenstruktur aufgrund von Querrippen eine hohe Steifigkeit aufweist, ist das Laminat deutlich dünner als in den Bereichen mit geringerer Steifigkeit. Es findet somit ein Fließen des Materials, induziert

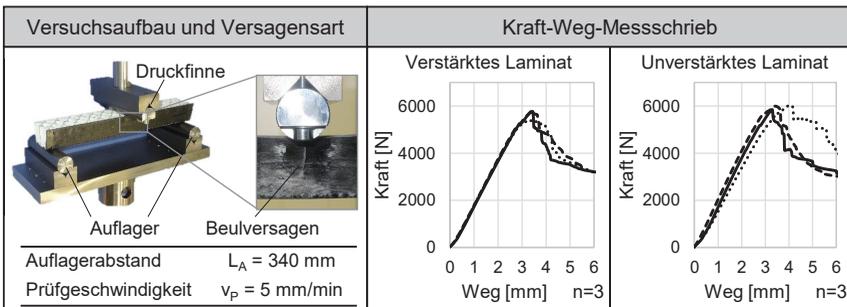
durch die Druckunterschiede beim Thermoformen, statt. Die Oberfläche des Hybridbauteils weist eine sichtbare Welligkeit auf, die sich ebenfalls durch die lokalen Unterschiede der Steifigkeit der Rippenstruktur erklären lässt. Es ist jedoch kein negativer Einfluss auf die Konsolidierungsqualität feststellbar.

In der Fügezone ist stellenweise eine Grenzschicht zwischen den beiden Polymermaterialien erkennbar. Es ist anzunehmen, dass an diesen Stellen keine Durchmischung stattgefunden hat. Positiv ist jedoch, dass keine Poren in der Fügezone vorhanden sind und sich daher auch an Stellen mit erkennbarer Grenzschicht ein inniger Lagenkontakt und Mikroformschluss ausgebildet hat.



**Bild 7.4:** Untersuchung der Fügezone des Thermoplast-FVK Hybridbauteils  
*Examination of the joining area of the hybrid thermoplastic composite part*

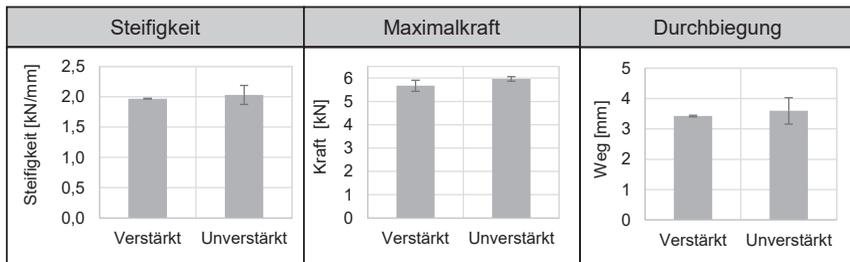
Um die mechanischen Eigenschaften zu bewerten, werden die Hybridträger im 3-Punkt Biegeversuch geprüft. Der Prüfaufbau und die ermittelten Kraft-Weg-Diagramme sind in Bild 7.5 dargestellt. Insgesamt werden  $n = 3$  Träger jeweils mit gleichmäßigem und lokal verstärktem Laminataufbau getestet. Für beide Laminataufbauten steigt die Kraft zunächst annähernd linear bis zu einer nur sehr schwach ausgeprägten Streckgrenze bei ca. 5 kN an, bevor mit ca. 6 kN die maximale Prüfkraft erreicht wird.



**Bild 7.5:** 3-Punkt Biegeversuch des als Thermoplast-Hybridbauteil ausgeführten Trägers  
*3-Point bending of the hybrid thermoplastic beam structure*

Der dominierende Versagensmechanismus ist das Beulen des Laminats an der offenen Seite des Trägers. Das Beulversagen tritt im Bereich der Druckfinne auf, da hier zu der Biegespannung zusätzlich lokal Schub- und Druckspannungen induziert werden. Zunächst bilden sich unter Druckbeanspruchung Risse im Laminat, bevor es sich lokal von der thermoplastischen Rippenstruktur löst und nach außen beult.

Aufgrund dieser Versagensart sind keine positiven Effekte der lokalen Verstärkung des Trägers, die auf der geschlossenen Unterseite vorgesehen wurde, zu erkennen. In Bild 7.6 sind die ermittelten Ergebnisse für die Steifigkeit und Maximalkraft sowie die Durchbiegung bei maximaler Kraft dargestellt.



**Bild 7.6:** Mechanische Eigenschaften des Hybridträgers aus Thermoplast-FVK im 3-Punkt Biegeversuch

*Mechanical properties of the hybrid beam structure in 3-point bending test*

Die Steifigkeit liegt für beide Prüfkörper bei ca.  $2 \text{ kN/mm}$ . Die maximale Biegekraft tritt beim unverstärkten Laminat bei höherer Durchbiegung auf als beim verstärkten Laminat. Daraus lässt sich auch die etwas höhere Maximalkraft von ca.  $6 \text{ kN}$  erklären. Es ist auffällig, dass die Messergebnisse für das verstärkte Laminat insgesamt eine sehr geringe Streuung aufweisen.

Zur besseren Einordnung werden die experimentellen Ergebnisse mit Literaturwerten verglichen. Die von EHRENSTEIN veröffentlichten Untersuchungen weisen für eine ähnliche Trägerstruktur aus  $0,75 \text{ mm}$  dickem Stahlblech, die im Hinterspritzen mit Thermoplast-Rippen funktionalisiert wurde, maximale Biegekräfte von  $3,3 - 4,5 \text{ kN}$  auf. Für ein hinterspritztes Organoblech aus GFK ergibt sich lediglich eine maximale Biegekraft von  $1,5 \text{ kN}$  [EHRE03]. Somit weist der im Rahmen dieser Arbeit gefertigte Hybridträger höhere mechanische Kennwerte auf.

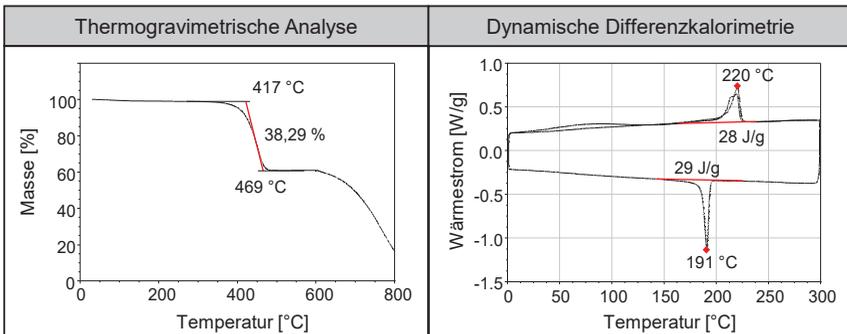
Auch wenn der Effekt der lokalen Verstärkung wegen des vorherrschenden Beulversagens unter der Druckfinne in dem durchgeführten Versuch nicht sichtbar wird, halten die gemessenen maximalen Biegekräfte einem Vergleich mit konventionell gefertigten Hybridbauteilen stand. Damit ist nachgewiesen, dass sich die additive Prozesskette dazu eignet, thermoplastische Hybridbauteile mit guten mechanischen Eigenschaften zu fertigen.

### Kristallinität nach den jeweiligen Prozessschritten

Eine weitere Zustandsgröße, die die Materialeigenschaften beeinflusst, ist der Kristallisationsgrad  $\alpha$ . Dieser lässt sich für teilkristalline Polymere durch Bestimmung der Schmelzenthalpie  $\Delta H_f$  berechnen zu:

$$\alpha = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f,100}} \quad (7.2)$$

Die Schmelzenthalpie für rein kristallines PA6 beträgt  $\Delta H_{f,100}^{PA6} = 230 \text{ J/g}$ . [SCHU01] Verstärkungsfasern können das Kristallisationsverhalten, z. B. durch Keimbildung, beeinflussen. Im Folgenden wird jedoch lediglich der Massenanteil der Verstärkungsfasern  $\varphi_m$  berücksichtigt, der sich theoretisch aus dem Faservolumengehalt  $\varphi_f$  berechnen lässt. Da die genaue Zusammensetzung des Tapes unbekannt ist, wird der Massenanteil der Verstärkungsfasern anhand einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) bestimmt. Diese wird mit einem Messgerät des Typs Q5000 IR der Firma TA Instruments durch die TU Clausthal durchgeführt. Die Heizrate beträgt  $10 \text{ K/min}$ . Der Messschrieb der TGA ist in Bild 7.7 links dargestellt. Bei Erwärmung verliert die Probe zwischen  $417^\circ\text{C}$  und  $469^\circ\text{C}$  mehr als 38 % ihres Ausgangsgewichts. Dabei handelt es sich um die Degradation des Matrixwerkstoffes. Der Masseanteil  $\varphi_m$  der Fasern beträgt somit  $\varphi_m = 61,71 \%$ . Bis  $600^\circ\text{C}$  wird die Probe mit Stickstoff gespült, danach wird auf eine Spülung mit Umgebungsluft umgestellt. Dadurch oxidieren ab  $600^\circ\text{C}$  die Kohlenstofffasern, sodass eine zweite Stufe der Massenabnahme entsteht.



**Bild 7.7:** Links: Ergebnisse der TGA des PA6/CF Tapes im Ausgangszustand  
Rechts: Beispielhaftes Ergebnis einer DSC eines Prüflaminates mit  $P_{Sub} = 55 \%$   
*Left: TGA results of the PA6/CF tape before processing;*  
*Right: Exemplary DSC result of a test laminate manufactured with  $P_{Sub} = 55 \%$*

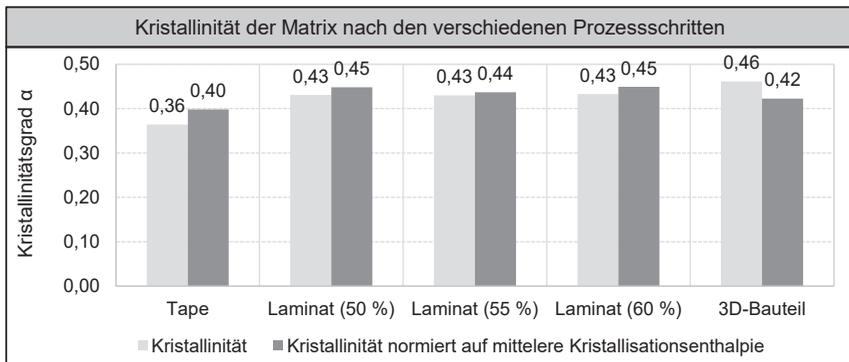
Zur Bestimmung der Schmelzenthalpie wird die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC, engl.: differential scanning calorimetry) verwendet. Diese wird im Heizen-Kühlen-Heizen Verfahren mit einem Messgerät des Typs DSC Q2000 der Firma TA Instruments ebenfalls durch die TU Clausthal durchgeführt, sodass zwei Heizkurven und eine Abkühlkurve aufgezeichnet werden. Die Temperiertrate beträgt  $10 \text{ K/min}$ . In Bild 7.7 rechts ist exemplarisch der gemessene Wärmestrom für ein Laminat, das mit einer

Substratstrahlerleistung von  $P_{Sub} = 55\%$  gefertigt wurde, dargestellt. Sowohl der Schmelzpeak beim ersten Aufheizen als auch der Kristallisationspeak sind stark ausgeprägt, was auf eine gleichmäßige Kristallstruktur schließen lässt. Die Schmelz- bzw. Kristallisationsenthalpie entspricht der Fläche unterhalb des Peaks. Die Messergebnisse für das Tape im Ausgangszustand, für die drei mit verschiedenen Prozessparametern hergestellten Lamine, vgl. Kapitel 6.2, und für das geformte Hybridbauteil sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

**Tabelle 7.2:** DSC-Ergebnisse für die Materialien nach den verschiedenen Prozessschritten  
*Results of the DSC for the materials after different process steps*

	Tape	Laminat $P_{Sub} = 50\%$	Laminat $P_{Sub} = 55\%$	Laminat $P_{Sub} = 60\%$	3D- Bauteil
Schmelzenthalpie $\Delta H_f$ [J/g]	23,70	28,03	27,97	28,15	30,00
Kristallisationsenthalpie [J/g]	27,23	28,62	29,29	28,67	32,47
Schmelztemperatur $T_m$ [°C]	220,14	220,38	220,27	220,23	220,90
Kristallisationstemperatur $T_K$ [°C]	190,95	190,76	190,91	190,81	190,40

Sowohl die Messwerte der Schmelztemperatur von  $T_m = 220\text{ °C}$  und der Kristallisationstemperatur von  $T_K = 191\text{ °C}$  sind für alle Proben nahezu konstant. Die gemessenen Schmelzenthalpien werden zur Berechnung des Kristallinitätsgrads nach Formel 7.2 herangezogen. Die so berechnete Kristallinität  $\alpha$  des Tapes ist mit 36 % am geringsten, während alle Lamine gleiche Werte von  $\alpha = 43\%$  aufweisen. Das geformte Bauteil weist mit 46 % die höchste errechnete Kristallinität  $\alpha$  auf. Die Ergebnisse sind in Bild 7.8 zusammengefasst.



**Bild 7.8:** Änderung der Kristallinität entlang der Prozesskette  
*Change of crystallinity along the process chain*

Beim Betrachten der Kristallisationsenthalpie fällt auf, dass die dem Laminat des Hybridbauteils entnommene Probe eine deutlich höhere absolute Kristallisationsenthalpie aufweist. Da es beim Umformen lokal zu einem Fließen der Matrix kommen kann, weicht eventuell der Faservolumengehalt der Probe des Hybridbauteils von den anderen Proben ab. Um Schwankungen im Faservolumengehalt zu kompensieren, wird ein Korrekturfaktor in Form des Quotienten der jeweiligen Kristallisationsenthalpie und der mittleren Kristallisationsenthalpie gebildet. Daraus lässt sich ein entsprechend normierter Kristallisationsgrad berechnen. Auch nach dieser Kompensation weist das Tape mit  $\alpha = 40\%$  die geringste normiert Kristallinität auf, gefolgt vom Hybridbauteil mit  $\alpha = 42\%$ . Die normierte Kristallinität der Lamine beträgt  $\alpha = 44\text{--}45\%$ . Der niedrige Kristallisationsgrad des Tapes lässt sich durch seine geringe Halbzeugdicke und den damit in der Tapeherstellung erreichbaren schnellen Abkühlraten erklären. Zwischen den in-situ konsolidierten Laminaten und dem geformten Hybridbauteil ist kein eindeutiger Unterschied in der Kristallinität erkennbar. Nach beiden Prozessschritten liegt die Kristallinität deutlich über der des Tapehalbzeugs. Im Falle des Thermoforens führt die hohe Materialwandstärke zu geringeren Abkühlraten. Beim Tapelegen finden aufgrund der mehrfachen Überfahrten sowie der eingestellten Werkzeugtemperatur langanhaltende Rekristallisationsvorgänge statt, vgl. [LATR03, S. 94–96]. Die im Tapelegen entstehende normierte Kristallinität ist höher als die des Ausgangsmaterials und die des thermogeformten Bauteils. Somit eignet sich das entwickelte Verfahren der in-situ Ablage mit IR-Strahlung auch hinsichtlich der Kristallinität, Lamine mit guten mechanischen und chemischen Eigenschaften herzustellen.

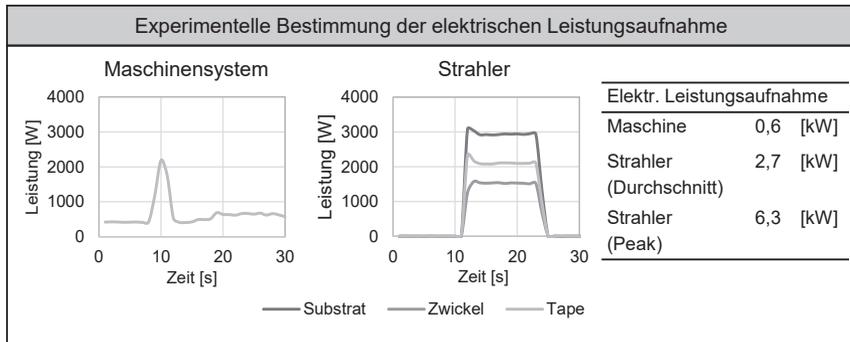
## 7.2.2 Wirtschaftliche Bewertung

### *Economical evaluation*

Die wirtschaftliche Bewertung eines Produktionsszenarios ist von der Bauteilgeometrie, den Stückzahlen sowie dem Produktionsstandort und der dadurch entstehenden Kostenstruktur abhängig. Daher sollen nachfolgend experimentelle Daten für den Energieverbrauch und eine Abschätzung für die Investitionskosten der Legeanlage sowie ihrer Produktivität ermittelt und bewertet werden.

### **Energieverbrauch der Legeanlage**

Bei der Konsolidierung von thermoplastischen Laminaten sind die Energiekosten ein wichtiger Bestandteil der Betriebskosten [BREC16a]. Der Haupttreiber der Energiekosten der Legeanlage ist elektrischer Strom, weil andere Verbraucher nur vernachlässigbare Energiemengen benötigen, wie z. B. die pneumatisch betätigten Schneidmesser mit einem Druckluftbedarf von weniger als  $3\text{ m}^3/\text{h}$ . Daher wird die elektrische Leistungsaufnahme mit einem Strommessgerät experimentell bestimmt. Da die Aufzeichnungsrate des Messgerätes vom Typ *PEL 103* des Herstellers *Chauvin Arnoux* bei  $1\text{ Hz}$  liegt, wird ein exemplarischer Ablegevorgang mit verringerter Legegeschwindigkeit über einen Zeitraum von  $30\text{ s}$  gemessen, s. Bild 7.9.

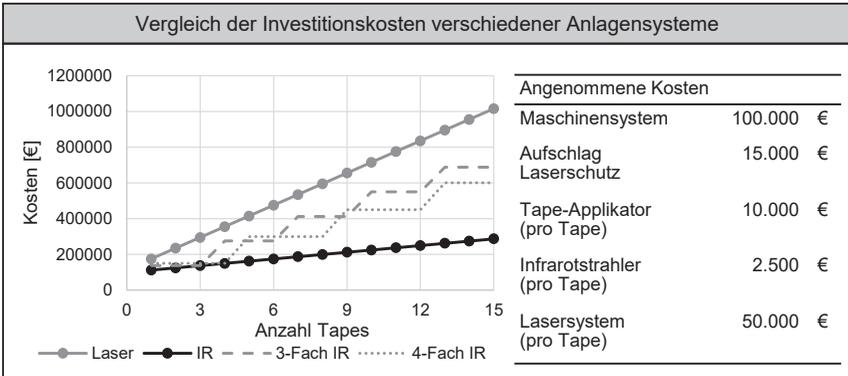


**Bild 7.9:** Messung des elektrischen Energiebedarfs der Ablegeanlage  
*Measurement of the electrical energy consumption of the tape laying system*

Die kumulierte Leistungsaufnahme der Strahler in allen drei Zonen beträgt während der Ablage 6,3 kW. Das Maschinensystem ohne Strahler hat eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 0,6 kW. Lediglich beim Beschleunigen der x-Achse werden kurzfristig mehr als 2 kW Antriebsleistung benötigt. Die Bremsenergie wird im Zwischenkreis gespeichert. Die beheizte Werkzeugform hat während der Aufzeichnung keine Heizleistung benötigt. Sie wird beim Einschalten der Anlage aufgeheizt und anschließend durch einen Zweipunktregler auf konstantem Temperaturniveau gehalten, sodass lediglich die Wärmeverluste im Dauerbetrieb als Heizenergie zugeführt werden müssen. Insgesamt liegt damit die Leistungsaufnahme der Legeanlage bei weniger als 7 kW. Die maximal verwendete Heizleistung des IR-Ofens der Thermoformstation beträgt hingegen 45 kW, aber wird jedoch nur für einen kürzeren Zeitraum benötigt.

### Investitionskosten

Neben den variablen Energiekosten sind die erforderlichen Investitionskosten zum Erfüllen eines Produktionsszenarios maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Daher sollen die Sachkosten für eine beispielhafte Legeanlage in Abhängigkeit der gleichzeitig verarbeiteten Tapes betrachtet werden. Nicht berücksichtigt werden weitere Kosten wie bspw. Aufwände für die Montage oder Inbetriebnahme. Alle Anlagenkomponenten wie Achsen, Werkzeugform und Gestell, die unabhängig von der Anzahl der simultan abgelegten Tapes sind, werden als Maschinensystem zusammengefasst. Mit der Tapeanzahl skalierende Kosten sind insbesondere der Tape-Applikator, bestehend aus Schneid- und Vorschubeinheit sowie Tapebevorratung. Die Heizeinheit wird einzeln evaluiert und sowohl für den in dieser Arbeit betrachteten IR-Strahler als auch für ein Lasersystem bewertet. In Bild 7.10 sind die angenommenen Einzelkosten und die daraus entstehenden Anlagenkosten dargestellt.



**Bild 7.10:** Berechnung der notwendigen Sachkosten in Abhängigkeit der Tapeanzahl  
*Estimation of equipment costs in relation to number of tapes*

Aufgrund der kostengünstigen IR-Strahler fallen für eine exemplarische Anlagenkonfiguration mit drei Tapes Sachkosten in Höhe von 137.500 € an. Selbst bei einer Steigerung auf 15 simultan abgelegte Tapes würden die anfallenden Sachkosten unter 300.000 € liegen. Anders verhält es sich bei einer Anlage für das Laser-unterstützte Tapelegen. Hier spielen mit steigender Tapeanzahl die Kosten des Maschinensystems nur noch eine untergeordnete Rolle, da die Laserquellen der wesentliche Kostentreiber sind. So liegen die Gesamtkosten bei 15 simultan verarbeiteten Tapes bei über 1 Mio. €, wovon 750.000 € alleine auf die Laserquellen entfallen. Bei einer Investitionsentscheidung ist die höhere Produktivität des Laser-unterstützten Tapelegens, die durch eine höhere mögliche Ablegegeschwindigkeit und geringere Einfahrstrecken erreicht wird, zu berücksichtigen. Ebenso sollte die mit zunehmender Tapeanzahl sinkende OEE und der Ausnutzungsgrad der Tape-Applikatoren beachtet werden, vgl. Kapitel 4.4.1. Deshalb ist es in vielen Fällen günstiger, mehrere Maschinensysteme mit 3-fach oder 4-fach Applikatoren in einer Produktionszelle zu verwenden, statt eine Anlage mit sehr vielen simultan abgelegten Bändern einzusetzen. Die durch eine Vervielfältigung des Maschinensystems entstehenden Mehrkosten bei Verwendung eines 3- bzw. 4-fach Applikators sind in Bild 7.10 dargestellt.

Generell lässt sich festhalten, dass aufgrund des hochintegrierten Konzepts eine im Vergleich zum Stand der Technik Investitionskosten-minimierte Anlagentechnik entwickelt wurde. Die Ablegeanlage erlaubt ebenfalls eine hohe Flexibilität, weil nahezu beliebige Laminare durch eine Änderung des Programmcodes herstellbar sind. Auch die Hybridbauteilfertigung mittels einer additiv gefertigten Rippenstruktur führt zu einer Reduktion der Investitionskosten in Umformwerkzeuge. Ebenso lässt sich die additiv gefertigte Rippenstruktur auf unterschiedliche Laminaraufbauten anpassen. Während die Produktivität des hybriden Thermoformverfahrens nahezu identisch mit herkömmlichen Verfahren ist, soll abschließend die Produktivität der Tapelegeanlage vergleichend bewertet werden.

## Produktivität

Die Bewertung Produktivität wird gemäß der in Kapitel 4.1.3 ausführlich diskutierten leichtbauspezifischen Kennzahlen vorgenommen. Vergleicht man für den Idealfall eines auf Zug beanspruchten Bauteils die Produktivität der Tapelegeanlage mit einem herkömmlichen, unverstärkten Halbzeug, so wird der Vorteil der Belastungsoptimierung offensichtlich. Der E-Modul des Laminats sei entsprechend der Ergebnisse in Kapitel 6 mit  $80 \text{ GPa}$  angenommen. Dahingegen beträgt der E-Modul von unverstärktem PA6 lediglich  $3 \text{ GPa}$ . Durch das integrierte Anlagenkonzept und der im Vergleich zu roboterbasierten Systemen hohen Achsdynamik lassen sich die Nebenzeiten reduzieren, sodass die Anlage ca. zu  $50 \%$  der Zeit effektiv produziert und Tapes ablegt.

Unter Anwendung des für Steifigkeit-dominierte Belastungsfälle entwickelten Produktivitätskriteriums ergeben sich die in Tabelle 7.2 dargestellten Werte. Die Steifigkeitsbezogene Produktivität des Anlagenprüfstands entspricht der Verarbeitung von ca.  $163 \text{ kg/h}$  unverstärktem PA6. Dies zeigt, dass die Verwendung von thermoplastischen FVK bei einer ressourceneffizienten Produktion und hohem Materialausnutzungsgrad auch hinsichtlich der Produktivität und Wirtschaftlichkeit verglichen mit dem Einsatz herkömmlicher Materialien wettbewerbsfähig sein kann.

**Tabelle 7.3:** Bewertung des Tapelegeprozesses für ein idealisiertes Produktionsszenario  
*Evaluation of the tape laying process for an ideal production case*

Produktionsszenarien - Tapelegen - Verarbeitung von unverstärktem PA6	Produktivitätskriterium (Steifigkeit) $E \cdot \frac{V}{t}$
Tapelegen: $3 \times 25 \text{ mm PA6/CF}$ $v_T = 200 \text{ mm/s}$ ; $T_1 = T_{\text{Neben}}$ ; $E_{\text{PA6/CF}} = 80 \text{ GPa}$ ; ( $\approx 8,5 \text{ kg/h}$ )	432 $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$
Verarbeitung von $100 \text{ kg/h PA6}$ $E_{\text{PA6}} = 3 \text{ GPa}$ ; $\rho_{\text{PA6}} = 1,13 \text{ g/cm}^3$	265 $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$

Gegenüber roboterbasierten Technologien zur Tapeablage mit in-situ Konsolidierung ist die entwickelte Anlagentechnologie zur Ablage von ebenen Laminaten überlegen. Neben der Skalierung der Tapeanzahl zur Steigerung der Produktivität bietet die verlängerte Konsolidierungsstrecke Potenzial zur Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit, vgl. Kapitel 4.2 verwiesen. Bereits mit dem Anlagenprüfstand im Rahmen dieser Forschungsarbeit kann eine vergleichsweise hohe Produktivität erreicht werden. Damit ist der Nachweis erbracht, dass die entwickelte additive Prozesskette eine flexible Produktion bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit und guten mechanischen Eigenschaften zulässt.

### 7.3 Fazit der Bauteilfertigung

#### *Conclusion of the manufacturing of hybrid composite parts*

Die Bewertung der Prozesskette hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und technischen Eigenschaften hat gezeigt, dass sich mit dem entwickelten Verfahren ebene, belastungsoptimierte Thermoplast-FVK Lamine flexibel und wirtschaftlich herstellen lassen. Insbesondere die geringen Investitionskosten sprechen für den Einsatz der IR-basierten Tapeablage mit in-situ Konsolidierung. Die prototypische Anlagentechnologie ist hinsichtlich ihrer Produktivität aufgrund des integrierten Konzepts mit reduzierten Nebenzeiten bereits mit Roboter-basierten Systemen zur Laser-unterstützten Tapeablage vergleichbar. Damit ist die erste Forschungsfrage zur flexiblen Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten auch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit abschließend beantwortet.

Die zweite Forschungsthese, inwieweit sich die gefertigten Lamine zur Herstellung thermoplastischer Hybridbauteile verwenden lassen, ohne dass unflexible Werkzeuge notwendig sind, kann anhand der Verwendung von additiv gefertigten Thermoplast-Rippenstrukturen zur Hybridbauteilfertigung verifiziert werden.

Mit einem einfachen einseitigen Werkzeug aus Aluminium ist es möglich, eine funktionsintegrierte Trägerstruktur in Multimaterialbauweise zu fertigen, dessen mechanische Eigenschaften mit denen der Spritzguss-Hybridtechnik vergleichbar sind. Eine gezielte Prozessführung ermöglicht es, die Füge­temperatur so einzustellen, dass die beiden Fügepartner stoffschlüssig miteinander verbunden werden. Nach dem Thermoformprozess liegt weiterhin eine gute Laminatqualität vor, sodass sich die gefertigten Lamine uneingeschränkt zur Weiterverarbeitung eignen.

Somit ist nachgewiesen, dass sich die entwickelte additive Prozesskette zur flexiblen Fertigung von belastungs- und verschnittoptimierten Hybridbauteilen aus Thermoplast-FVK eignet. Die gewonnenen Erkenntnisse können in weiteren Vorhaben auf andere Bauteile und Anwendungen übertragen werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### *Summary and Outlook*

Aus dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse lässt sich ein Bedarf für eine wirtschaftliche und flexible Fertigung von maßgeschneiderten Faserverbundbauteilen auf Basis von unidirektionalen thermoplastischen Halbzeugen ermitteln. Der dazu in dieser Dissertation geleistete Beitrag, die Erforschung einer additiven Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen, wird zusammengefasst und weitere, darauf aufbauende Innovationspotenziale werden aufgezeigt.

### 8.1 Zusammenfassung

#### *Summary*

Die besondere Herausforderung bei der Fertigung von FVK-Bauteilen besteht darin, dass zwei verschiedene Materialphasen verarbeitet werden müssen und sich die Prozessschritte untereinander stark beeinflussen. Zunächst findet daher eine technisch-wirtschaftliche Modellierung der gesamten Prozesskette statt, vgl. Kapitel 4. Im Sinne des Wertschöpfungsmanagements bieten thermoplastische Tapes eine besondere Chance, die Halbzeugproduktion von der diskreten Bauteilfertigung zu entkoppeln, und trotzdem über eine ausreichend hohe Flexibilität zu verfügen. Aufbauend auf den physikalischen Modellen der einzelnen Prozessschritte Imprägnieren, Ablegen und Temperieren wird eine Optimierung der Prozesskette, z. B. hinsichtlich der Tapeabmaße, durchgeführt. Dies beinhaltet ebenso eine Betrachtung der Prozessrobustheit, die anhand eines statistischen Modells der in-situ Konsolidierung bewertet wird, wie auch die Untersuchung verschiedener Möglichkeiten zur Skalierung der Produktivität und deren Auswirkungen auf die Gesamtanlageneffektivität.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung einer Anlagentechnik für die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten ein, s. Kapitel 5. Das resultierende, hochintegrierte Anlagenkonzept verfügt über ein IR-basiertes Ablegesystem, welches für die Herstellung ebener Laminat durch in-situ Konsolidierung optimiert ist und sich kostengünstig vervielfältigen lässt.

Diese prototypische Anlage wird zur Prozessentwicklung und Laminatfertigung, vgl. Kapitel 6, herangezogen. Auf Tapeebene kann nachgewiesen werden, dass die IR-unterstützte Tapeablage sowohl einen robusten Konsolidierungsprozess als auch eine verschnittminimierte Verarbeitung von unidirektionalen Tapes ermöglicht. Eine ausführliche Charakterisierung der Laminat, zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften mit Laminaten aus konventionellen Prozessen vergleichbar sind. So lassen sich für ein PA6/CF-Tape Porenanteile von  $\varphi_P = 0,8-1,3 \%$  und Biegefestigkeiten von  $\sigma_{fM} = 952 \text{ MPa}$  erzielen.

Für die Verarbeitung der hergestellten Laminat zu Thermoplast-Hybridbauteilen wird eine neuartige Verfahrenskombination untersucht, s. Kapitel 7. Diese besteht aus einem Thermofomprozess, bei dem das Laminat intrinsisch und hauptzeitparallel mit

einer Thermoplast-Funktionsstruktur gefügt wird. Die additiv gefertigte Rippenstruktur übernimmt gleichzeitig die Funktion des Umformstempels, sodass lediglich ein einseitiges, kostengünstiges Metallwerkzeug notwendig ist. Anhand einer exemplarisch geformten Trägerstruktur in Multimaterialbauweise wird aufgezeigt, dass eine stoffschlüssige Verbindung beider Fügepartner durch eine gezielte Prozessführung ermöglicht werden kann. Eine abschließende Bewertung der Hybridbauteile sowie der erforschten Prozesskette beantwortet die Forschungsfrage, dass eine wirtschaftliche Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus unidirektionalen Tapes mittels in-situ Konsolidierung und deren Verarbeitung zu Hybridbauteilen möglich ist.

Somit werden im Rahmen dieser Arbeit die vier Forschungsthesen verifiziert:

- Das IR-unterstützte Thermoplast-Tapelegen mit in-situ Konsolidierung ermöglicht eine verschnittminimierte Verarbeitung von unidirektionalen Tapes
- Mit dem entwickelten Verfahren lassen sich ebene, belastungsoptimierte Thermoplast-FVK Lamine flexibel und wirtschaftlich herstellen
- Es kann eine ausreichende Konsolidierungsqualität für die Verarbeitung der Lamine im Thermoformprozess erzielt werden
- Aus den belastungs- und verschnittoptimierten FVK-Laminaten lassen sich durch Kombination mit additiv gefertigten Thermoplast-Strukturen funktionsintegrierte Multimaterialbauteile in einem Thermoformprozess mit reduziertem Werkzeugaufwand fertigen

## 8.2 Ausblick

### *Outlook*

Die entwickelte Anlagentechnologie zur Fertigung von belastungs- und verschnittoptimierten Laminaten aus UD-Tapes mit in-situ Konsolidierung bietet eine hervorragende Plattform, um zahlreiche weitere Entwicklungen und Forschungsvorhaben durchzuführen. So stellt die Optimierung des Ablageprozesses, auch für andere Tape-Materialien, ein prozesstechnologisches Forschungsfeld dar. Bei der Fertigung komplexerer Laminatgeometrien sind transiente Effekte, wie z. B. der Einfluss von Nebenzeiten und der Ablegereihenfolge der Tapes auf die Lamineigenschaften, zu berücksichtigen. Es können verschiedene Ablegestrategien untersucht und entwickelt werden, um entstehende Eigenspannungen im Laminat zu reduzieren. Dazu bietet es sich an, die sich einstellenden Temperaturgradienten im Laminat zu simulieren und experimentell zu bestimmen. Eine weitere Steigerung der Prozessgeschwindigkeit sollte untersucht werden. Dazu kann u. a. die Strahlereinheit optimiert oder durch alternative Heizquellen mit höherer Leistungsdichte ausgetauscht werden. Die Steigerung der Produktivität durch eine Erhöhung der Tapeanzahl oder der Tapebreite ist ebenfalls zu analysieren.

Die Anlagentechnologie selbst kann weiter optimiert werden. So ist etwa die Robustheit der Konsolidierstrecke samt umlaufenden Stahlbands zu erhöhen. Für sehr hohe Ablegegeschwindigkeiten und für die daraus resultierenden Anforderungen an

die Maschinendynamik kann es ratsam sein, entweder eine aktiv angetriebene Tapebevorrattung vorzusehen oder einen Materialpuffer, z. B. in Form eines Tänzers, zu integrieren. Dies erlaubt ebenfalls eine Regelung der Tapespannung während der Ablage, was mit dem realisierten Konzept der Synchronisation nicht umsetzbar ist.

Auch das kombinierte Thermoformverfahren, bei dem gleichzeitig eine Funktionalisierung mit additiv oder konventionell gefertigten Kunststoffbauteilen stattfindet, bietet zahlreiche weitere Anknüpfungspunkte. Statt die Funktionsstruktur als Stempel zu verwenden kann diese auch als Einleger im Werkzeug integriert werden. Generell ist zu untersuchen, für welche Anwendungen die hohe Flexibilität relevant ist. Das Verfahren bietet insbesondere für kleinere Stückzahlen oder große Bauteilstrukturen die Möglichkeit, thermoplastische Hybridbauteile zu fertigen, für die herkömmliche Hinterspritzprozesse aufgrund der hohen Werkzeuginvestitionen nicht geeignet sind. Alternativ dazu kann eine Einbringung von Funktionselementen, z. B. Leiterbahnen, Sensoren, oder mechanische Element, ins Laminat während der Tapeablage mit dem vorliegenden Anlagenkonzept erforscht werden. Der anschließende Umformprozess dieser funktionsintegrierten Laminare kann ebenfalls Gegenstand von Forschungsaktivitäten sein. In dieser Arbeit ist die Einbringung von Einspannhilfen ins Laminat beschrieben, die den Umformprozess positiv beeinflussen können und für diese Fragestellung weiterentwickelt werden können.

## Summary and Outlook

According to the current state of art, a strong demand exists for an economic and flexible production of tailor-made fibre composite components based on unidirectional thermoplastic semi-finished products. The contribution made in this thesis, the research and development of an additive process chain for the production of thermoplastic fiber composite hybrid components, is summarized and further innovation potentials of this technology are presented.

### Summary

The main challenge in the production of FRP components is the processing of two different material phases. This yields to a strong influence of the single process steps on each other. Therefore, a technical and economical modelling of the entire process chain takes place, see chapter 4. In terms of value chain management, thermoplastic tapes offer a special opportunity to decouple the production of semi-finished products and materials from discrete component production and still have a sufficiently high degree of flexibility. Based on the physical models of the individual process steps impregnation, draping and heating, the process chain is optimized, for example with regard to tape dimensions. This also includes a consideration of the process robustness, which is evaluated with a statistical model of the in-situ consolidation process, as well as the investigation of various possibilities for upscaling of the productivity and their effects on the overall equipment effectiveness.

The gained knowledge leads to the development of a system technology for the production of load- and waste-optimized laminates, see chapter 5. The resulting, highly integrated machine concept consists of an IR-based deposit system, which is optimized for the production of flat laminates by in-situ consolidation. It can be reproduced cost-effectively.

This prototype machine system is used for process development and laminate production, see chapter 6. On tape level it can be proven that the IR-assisted tape laying enables a robust consolidation process as well as a cut-minimized processing of unidirectional tapes. A detailed characterization of the laminates shows that the mechanical properties are comparable with laminates from conventional processes. Thus, for a PA6/CF a void content of  $\varphi_P = 0.8-1.3 \%$  and bending strengths of  $\sigma_{FM} = 952 \text{ MPa}$  are achieved.

A novel process combination is investigated for the processing of the manufactured laminates into thermoplastic hybrid components, see chapter 7. This consists of a thermoforming process in which the laminate is joined with a thermoplastic functional structure in parallel to the main processing time. The additive rib structure also has the function of the forming stamp, so that only a single-sided, cost-effective metal die is required. By using a multi-material reinforced composite structure, it is shown that a fusion-based connection of both joining partners can be achieved. A final evaluation of the hybrid components and the researched process chain answers the research question whether it is possible to manufacture load- and waste-optimized laminates from

unidirectional tapes economically using in-situ consolidation. Furthermore, their processing into hybrid components is validated.

Thus, the four research theses are verified within the scope of this thesis:

- The IR-assisted thermoplastic tape laying with in-situ consolidation enables a waste-minimized processing of unidirectional tapes.
- The developed process allows the flexible and economical production of flat, load-optimized thermoplastic FRP laminates.
- Sufficient consolidation quality can be achieved for the processing of the laminates in the thermoforming process.
- By combining the load- and waste-optimized FRP laminates with additive-manufactured thermoplastic structures, function-integrated multi-material components can be produced in a thermoforming process with reduced tooling requirements.

## Outlook

The developed system technology for the production of load- and waste-optimized laminates from UD-tapes with in-situ consolidation offers an outstanding platform for numerous further developments and research projects. Thus, the optimization of the tape-laying process and its development for different tape materials, represents a field of research in process technology. When producing more complex laminate geometries, transient effects on the laminate properties, such as the influence of non-productive times and the order in which the tapes are placed, must be taken into account. Various placement strategies could be investigated and developed to reduce residual stresses in the laminate. For this purpose, the temperature gradients in the laminate can be simulated and determined experimentally. A further increase of the process speed should be investigated. The radiator unit can be optimized or replaced by alternative heat sources with higher power density. The rise in productivity by increasing the number of tapes or the tape width must also be analyzed.

The system technology itself can be further enhanced. For example, the robustness of the consolidation unit including the circulating steel belt must be optimized. For very high placement speeds and the resulting demands on machine dynamics, it may be advisable either to provide an actively driven tape supply or to integrate a material buffer. This also allows the tape tension to be controlled during deposition, which is not feasible with the realized concept of synchronization.

The combined thermoforming process, in which functionalization with additive or conventionally manufactured plastic components takes place at the same time, also offers numerous other possibilities for future research. Instead of using the functional structure as a stamp, it can also be integrated into the mold as an insert. In general, it has to be investigated for which applications the high flexibility of the production chain is relevant. Especially for smaller quantities or large component structures, the process

offers the possibility of producing thermoplastic hybrid components for which conventional back injection processes are not suitable due to the high mould investments. Alternatively, the introduction of functional elements, e. g. conductive tracks, sensors or mechanical elements, into the laminate during tape placement can be researched with the existing system concept. The subsequent forming process of these function-integrated laminates can also be the subject of research activities. This thesis describes the insertion of clamping aids into the laminate, which have a positive influence on the forming process. This approach offers the potential for additional optimizations of the forming process and shall be further investigated.

## 9 Literaturverzeichnis

### References

- [ACCU17] Accudyne Systems: Insitu Thermoplastic Laminator II. URL: <http://www.accudyne.com/composites-automation/automated-tape-laying/insitu-thermoplastic-laminator-ii/> [Stand: 01.03.2019]
- [ASHB93] Ashby, M. F.; Cebon, D.: Materials selection in mechanical design. In: *Le Journal de Physique IV*. 3. Jg., 1993, Nr. C7, S. 1-9
- [AUGU14] August, Z.; Ostrander, G.; Michasiow, J.; Hauber, D.: Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites. In: *SAMPE Journal*. 50. Jg., 2014, Nr. 2, S. 30–37
- [AUTO17] Automated Dynamics: Laser Processing of Thermoplastic Composites. URL: <http://www.automateddynamics.com/article/thermoplastic-composite-basics/processing-methods/laser-processing-of-thermoplastic-composites> [Stand: 01.03.2019]
- [BABE17] Babel, N.; Patzelt, P.: Quo vadis additive Fertigung? In: *Lightweight Design*. 10. Jg., 2017, Nr. 4, S. 66–69
- [BADE02] Bader, M. G.: Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 33. Jg., 2002, Nr. 7, S. 913–934
- [BATE99] Bates, P. J.; Charrier, J. M.: Effect of Process Parameters on Melt Impregnation of Glass Roving. In: *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 12. Jg., 1999, Nr. 4, S. 276–296
- [BAUM16] Baumers, M.; Dickens, P.; Tuck, C.; Hague, R.: The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. In: *Technological Forecasting and Social Change*. 102. Jg., 2016, S. 193–201
- [BERE02] Beresheim, G.: *Thermoplast-Tapelegen. Ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung*. Diss. TU Kaiserslautern, 2002
- [BERN99] Bernet, N.; Michaud, V.; Bourban, P. E.; Manson, J. A. E.: An Impregnation Model for the Consolidation of Thermoplastic Composites Made from Commingled Yarns. In: *Journal of Composite Materials*. 33. Jg., 1999, Nr. 8, S. 751–772
- [BERT02] Berthold, U.: *Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel*. Diss. TU Chemnitz, 2002
- [BINE15] Binetruy, C.; Chinesta, F.; Keunings, R.: *Flows in polymers, reinforced polymers and composites. A multi-scale approach*. Cham: Springer, 2015

- [BLAC15] Black, S.: Thermoplastic composites “clip” time, labor on small but crucial parts. In: *Composite World*. Vol 1, 2015, Nr. 5, S. 66–73
- [BLOM09] Blom, A. W.; Lopes, C. S.; Kromwijk, P. J.; Gurdal, Z.; Camanho, P. P.: A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates. In: *Journal of Composite Materials*. 43. Jg., 2009, Nr. 5, S. 403–425
- [BOIK17] Boikon B.V.: Falko ATL. Thermoplastic composite machinery. URL: <https://www.boikon.com/products-and-solutions/thermoplastic-composite-machinery/falko-atl/> [Stand: 01.03.2019]
- [BONT14] Bonten, C.: *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. München: Hanser, 2014
- [BOUR01] Bourban, P.-E.; Bernet, N.; Zanetto, J.-E.; Månson, J.-A. E.: Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 32. Jg., 2001, Nr. 8, S. 1045–1057
- [BOUR98] Bourban, P. E.; Bögli, A.; Bonjour, F.; Månson, J.-A.: Integrated processing of thermoplastic composites. In: *Composites science and technology*. 58. Jg., 1998, Nr. 5, S. 633–637
- [BREC10a] Brecher, C.; Kermer-Meyer, A.; Steyer, M.; Dubratz, M.; Emonts, M.: Laser-assisted tape laying is moving forward to 3D. In: *JEC Composites Magazine*. 47. Jg., 2010, Nr. 57, S. 28–30
- [BREC10b] Brecher, C.; Kermer-Meyer, A.; Dubratz, M.; Emonts, M.: Thermoplastische Organobleche für die Großserie. In: *Automobiltechnische Zeitschrift: ATZ*. 112. Jg., 2010, Spezialausgabe: Karosserie und Bleche, S. 28–32
- [BREC11] Brecher, C.; STIMPFL, J.; Kermer-Meyer, A.; Dubratz, M.; Emonts, M.: Load-optimised tailored thermoplastic FRP blanks for mass production. In: *JEC composites*, 2011, Nr. 65, S. 60–62
- [BREC12] Brecher, C.; Kermer-Meyer, A.; Werner, D.; al, e.: Customized solutions for laser-assisted tape placement. In: *JEC composites*, 2012, Nr. 76, S. 70–73
- [BREC14] Brecher, C.; Emonts, M.; Kermer-Meyer, A.; Janssen, H.; Werner, D.: Herstellung von belastungsoptimierten thermoplastischen Faserverbundbauteilen. In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): *Leichtbau-Technologien im Automobilbau*. Wiesbaden: Springer, 2014, S. 70–75
- [BREC15a] Brecher, C.; Peters, T.; Emonts, M.: Cost-effective high speed production of multi-material components by selective tape placement. In: *Proceedings of 10<sup>th</sup> ICCST*. Lissabon, Portugal, 2.-4. September 2015

- [BREC15b] Brecher, C.; Werner, D.; Emonts, M.: "Multi-Material-Head". One tool for 3 technologies. In: Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Kopenhagen, Dänemark, 19.-24. Juli 2015
- [BREC15c] Brecher, C.; Werner, D.; Emonts, M.: Leichtbau-Produktion mit flexibler Anlagentechnik. Multifunktionales Tape- und Fiber-Placement-System zur Fertigung faserverstärkter Komponenten. In: wt Werkstattstechnik online. 105. Jg., 2015, Nr. 9, S. 586–590
- [BREC15d] Brecher, C.; Buschhoff, C.; Emonts, M.: Unidirectional fiber reinforced tapes as energy director for the ultrasonic welding of thermoplastic composites. In: Proceedings of the SAMPE Europe Conference. Amiens, Frankreich, 15. September 2015
- [BREC16a] Brecher, C.; Schmitt, R.; Lindner, F.; Peters, T.; Emonts, M.; Böckmann, M. G.: Increasing Cost and Eco Efficiency for Selective Tape Placement and Forming by Adaptive Process Design. In: Procedia CIRP. 57. Jg., 2016, S. 769–774
- [BREC16b] Brecher, C.; Buschhoff, C.; Janssen, H.: Investigation of mechanical properties of a fiber fair joining concept for fiber reinforced thermoplastics. In: Proceedings of the International Conference on automotive Composites. Lissabon, Portugal, 21.-23. September 2016
- [BREC16c] Brecher, C.; Janssen, H.; Buschhoff, C.: High volume production of lightweight automotive structures with FRTP composites. In: Automotive Thermoplastic Composites Conference. Düsseldorf, 5. Juli 2016
- [BROO07] Brooks, R.: Forming technology for thermoplastic composites. In: Long, A. C. (Hrsg.): Composites forming technologies. (Reihe: Woodhead Publishing series in textiles, Bd. 61). Cambridge: Woodhead, 2007, S. 256–276
- [BROW15] Brown, N.W.A.; Worrall, C. M.; Ogin, S. L.; Smith, P. A.: Investigation into the mechanical properties of thermoplastic composites containing holes machined by a thermally-assisted piercing (TAP) process. In: Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science. 1. Jg., 2015, Nr. 4, S. 199–209
- [BURK05] Burkhart, A.; Cramer, D.: Feasibility of continuous-fiber reinforced thermoplastic tailored blanks for automotive applications, In: Proceedings of the SPE Automotive Composites Conference. Troy, USA, 9.-11. September, 2005
- [BURK06] Burkhart, A.; Cramer, D.: Continuous-fibre reinforced thermoplastic tailored blanks. In: JEC composites, 2006, Nr. 22, S. 41–43

- [CAMM17] Cammozi Group: Composite Technology. Vertical Automated fiber placement Lynx for high production. URL: <http://www.camozzima-chinetools.com/en/camozzigroup/machine-tools/catalogue/composite-technology/automated-fiber-placement-lynx-series/vertical-automated-fiber-placement-lynx-high-production> [Stand: 01.03.2019]
- [CAMP08] Campbell, D. T.; Cramer, D. R.: Hybrid thermoplastic composite ballistic helmet fabrication study. In: Proceedings of the SAMPE Conference. Long Beach, USA, 18.-22. Mai 2008
- [CELA14] Celanese: Preliminary Product Values. CFR TP PA6 CF60-01. Sulzbach, 2014. Firmenschrift
- [CHAM12] Champa, D.: Automated Composites Manufacturing Review. In: Proceedings of the SME Manufacturing with Composites Conference. 23. Oktober 2012, Charlston, USA
- [CHAN88] Chang, I. Y.; Lees, J. K.: Recent Development in Thermoplastic Composites: A Review of Matrix Systems and Processing Methods. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials. 1. Jg., 1988, Nr. 3., S. 277–296
- [CHR14] Christmann, M.: Optimierung der Organoblechherstellung durch 2D-Imprägnierung. Diss. TU Kaiserslautern, 2002
- [COGS92] Cogswell, F. N.: Thermoplastic aromatic polymer composites. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 1992
- [CRAM08] Schutzrecht US 8048253-B2 (24.09.2008). Cramer, D. R.; Beidleman, N. J.; Chapman, C. R.; Evans, D. O.; Passmore, M. K.; Skinner, M. L.: System and method for the rapid, automated creation of advanced composite tailored blanks
- [DAGH18] Daghia, F.; Cluzel, C.; Hébrard, L.; Churlaud, F.; Courtemanche, B.: The Double Drum Peel (DDP) test: A new concept to evaluate the delamination fracture toughness of cylindrical laminates. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 113. Jg., 2018, S. 83–94
- [DAI15] Dai, S.; Cunningham, P. R.; Marshall, S.; Silva, C.: Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 69. Jg., 2015, S. 195–207
- [DARA85] Dara, P. H.; Loos, A. C.: Thermoplastic matrix composite processing model. In: NASA-CR-176639, 1985
- [DELL12] Dell'Anno, G.; Partridge, I.; Cartié, D.; Hamlyn, A.; Chehura, E.; James, S.; Tatam, R.: Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures. In: International Journal of Structural Integrity. 3. Jg., 2012, Nr. 1, S. 22–40

- [DENK15] Denkena, B.; Richter, B.; Fleischer, A.: Volumenerspannung. Höchste Wirtschaftlichkeit bei der Aluminiumbearbeitung. In: MAPAL Präzisionswerkzeuge: Technologie Report. Aalen, 2015. Firmenschrift
- [DEVL07] De Vlieg, R.; Jeffries, K.; Vogeli, P.: High-Speed Fiber Placement on Large Complex Structures. In: SAE Technical Paper, 2007
- [DIEF17] Dieffenbacher GmbH Maschinen- und Anlagenbau: Tailored blank line with Fiberforge and Fibercon systems. URL: <https://dieffenbacher.com/de/composites/> [Stand: 01.03.2019]
- [DIFR16] Di Francesco, M.; Giddings, P. F.; Scott, M.; Goodman, E.; Dell'Anno, G.; Potter, K.: Influence of laser power density on the mesostructure of thermoplastic composite preforms manufactured by Automated Fibre Placement. In: Proceedings of the SAMPE Conference. Long Beach, USA, 23.-26. Mai 2016
- [DIFR17] Di Francesco, M.; Veldenz, L.; Dell'Anno, G.; Potter, K.: Heater power control for multi-material, variable speed Automated Fibre Placement. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 101. Jg., 2017, S. 408–421
- [DIN11] Norm DIN EN ISO 14125 (2011). Faserverstärkte Kunststoffe. Bestimmung der Biegeeigenschaften
- [DIN97] DIN EN ISO 14130 (1997). Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
- [DINA89] Dinardo, M. T.; Lagace, P. A.: Buckling and postbuckling of laminated composite plates with ply dropoffs. In: AIAA Journal. 27. Jg., 1989, Nr. 10, S. 1392–1398
- [DOMI08] Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Kunststoffe. Berlin: Springer, 2008
- [DORE87] Dorey, G.: Carbon fibres and their applications. In: Journal of Physics D: Applied Physics. 20. Jg., 1987, Nr. 3, S. 245–256
- [DURA09] Durante, M.; Langella, A.: Bearing Behavior of Drilled and Molded-in Holes. In: Applied Composite Materials. 16. Jg., 2009, Nr. 5, S. 297–306
- [EGGE11] Egger, P.; Stock, A.: Neue Horizonte im Leichtbau. In: Kunststoffe, 2011, Nr. 3, S. 41–45
- [EHRE03] Ehrenstein, G. W.; Amesöder, S.; Fernández Díaz, L.; Niemann, H.; Deventer, R.: Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile. In: Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile, Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium 2003 des SFB 396. Bamberg, 2003, S. 149–178

- [EHRE06] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. 2. Aufl. München: Hanser, 2006
- [EICK13] Eickenbusch, H.; Krauss, O.: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. In: VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3. Berlin, 2013
- [EICK14] Eickenbusch, H.; Krauss, O.: Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. In: VDI Technologiezentrum GmbH: Studie. Düsseldorf, 2014
- [EMME11] Emmelmann, C.; Sander, P.; Kranz, J.; Wycisk, E.: Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. In: Physics Procedia. 12. Jg., 2011, S. 364–368
- [ERBE16] Erber, A.; Janetzko, S.; Spitko, S.; Brudzinski, P. V.: Comparison of process chains for the production of thermoplastic UD-Tapes and organic sheets. In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials (ECCM). München, 26.-30. Juni 2016. Augsburg: MAI Carbon Cluster Management GmbH (Veranst.), 2016
- [ERMA07] Ermanni, P.: Composites Technologien. In: Skript der ETH Zürich. 4. Aufl. Zürich, 2007
- [EVER00] Eversheim, W.; Mutz, M.; Walker, R.: FVK-Bauteilkosten systematisch bestimmen. In: Ingenieur-Werkstoffe. 9. Jg., 2000, Nr.4, S. 33-35
- [FARZ19] Farzan Nasab, F.; Duipmans, G. A.; Geijselaers, H. J. M.; Boer, A. de: A gradient-based strategy for the optimization of stiffened composite structures subject to multiple load cases and multiple failure criteria. In: Rodrigues, H. C.; Herskovits, J.; Soares, C. M. M.; Araújo, A. L.; Guedes, J. M.; Folgado, J. O.; Moleiro, F.; Madeira, J. F. A. (Hrsg.): Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Engineering Optimization. Lissabon, Portugal, 17.-19. September 2018. Cham: Springer, 2019, S. 1045–1054
- [FECH17] Fecher, M. L.: Analyse des 3D-Faserspritzverfahrens zur Fertigung komplexer und funktionsintegrierter RTM-Strukturbauteile. Diss. RWTH Aachen, 2017
- [FIVE17] Fives: Cincinnati VIPER Fiber Placement Systems. URL: <http://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/composites/fiber-placement-systems/cincinnati-viper-fps.html> [Stand: 01.03.2019]
- [FLEM03] Flemming, M.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Eigenschaften. Berlin: Springer, 2003
- [FLET15] Fletcher, T. A.; Butler, R.; Dodwell, T. J.: Anti-symmetric laminates for improved consolidation and reduced warp of tapered C-sections. In: Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science. 1. Jg., 2015, Nr. 2, S. 105–111

- [FORB13] Forbich, B.; Regnet, M.: Automatisiertes Legen von faserverstärkten Thermoplasten in der Luft- und Raumfahrt. In: Tagungsband des 2. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium. Augsburg, 15. Mai 2013
- [FRIE13] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer, 2013
- [GARD11] Gardiner, G.: Thermoplastic composites: Primary structure? In: Composite World, 2011, Nr. 5
- [GAYM98] Gaymans, R. J.; Wevers, E.: Impregnation of a glass fibre roving with a polypropylene melt in a pin assisted process. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 29. Jg., 1998, Nr. 5, S. 663–670
- [GEBAA92] Gebart, B. R.: Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. In: Journal of Composite Materials. 26. Jg., 1992, Nr. 8, S. 1100–1133
- [GENN71] Gennes, P. G. de: Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. In: The Journal of Chemical Physics. 55. Jg., 1971, Nr. 2, S. 572–579
- [GHIA10] Ghiasi, H.; Fayazbakhsh, K.; Pasini, D.; Lessard, L.: Optimum stacking sequence design of composite materials Part II. Variable stiffness design. In: Composite Structures. 93. Jg., 2010, Nr. 1, S. 1–13
- [GRAF16] Graf, M.: Verfahrenskombination für verschnittarmes UD-Tapelegen. Hybride Bauteile. In: Lightweight Design. 9. Jg., 2016, Nr. 1, S. 34–39
- [GRIE07] Gries, T.; Klopp, K.: Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien. Verfahren und Anwendungen. Berlin: Springer, 2007
- [GRIF21] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 221. Jg., 1921, S. 163–198
- [GROU12] Groupe, W. J. B.: Weld strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites. Diss. University of Twente, Niederlande, 2012
- [GRUB12] Gruber, M. B.; Lockwood, I. Z.; Dolan, T. L.; Funck, S. B.; Tierney, J.; Simacek, P.; Gillespie Jr, J.; Advani, S.; Jensen, B. J.; Cano, R. J.; Grimsley, B. W.: Thermoplastic in situ placement requires better impregnated tapes and tows. In: Proceedings of the SAMPE Conference. Baltimore, USA, 21.-24. Mai 2012
- [GUER92] Guerdal, Z.; Olmedo, R.: Composite laminates with spatially varying fiber orientations. In: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas, USA, 13.-15. April 1992
- [GUTO87] Gutowski, T. G.; Cai, Z.; Bauer, S.; Boucher, D.; Kingery, J.; Wineman, S.: Consolidation Experiments for Laminate Composites. In: Journal of Composite Materials. 21. Jg., 1987, Nr. 7, S. 650–669

- [HAAN13] Haanappel, S.P.: Forming of UD fibre reinforced thermoplastics. Diss. University of Twente, Niederlande, 2013
- [HANS16] Hansmersmann, A.; Birenbaum, C.; Burkhardt, J.; Schneider, M.; Stroka, M.: Leichtbau im Maschinen-, Anlagen und Gerätebau. Stuttgart: Fraunhofer IPA; Bauernhansl, T. (Hrsg.), 2016
- [HÄRT13] Härtig, T.: Stoffübertragung beim Spritzgießen. Diss. TU Chemnitz, 2013
- [HE00] He, K.; Hoa, S. V.; Ganesan, R.: The study of tapered laminated composite structures: a review. In: Composites science and technology. 60. Jg., 2000, Nr. 14, S. 2643–2657
- [HENG16] Hengstermann, M.: Standortbestimmung beim Recycling von Carbonfasern. In: Carbon Composites Magazin, 2016, Nr. 2, S. 21–22
- [HENN14] Henne, F.; Ehard, S.; Kollmannsberger, A.; Hoeck, B.; Sause, M.; Drechsler, K.: Thermoplastic in-situ fiber placement for future solid rocket motor casing manufacturing. In: Proceedings of the SETEC. Tampere, Finnland, 10.-11. September 2014
- [HENN17] Henning, F.; Karcher, M.; Kärger, L.; Müller, T.: Funktionsintegrierter Leichtbau: Ressourceneffizienz: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin: Springer, 2017
- [HENZ10] Henze, N.: Stochastik für Einsteiger. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2010
- [HOLS12] Holschuh, R.; Becker, D.; Mitschang, P.: Verfahrenskombination für mehr Wirtschaftlichkeit des FVK-Einsatzes im Automobilbau. In: Lightweight Design. 5. Jg., 2012, Nr. 4, S. 14–19
- [HOLS14] Holschuh, R. M.: Lokal lastgerecht verstärkte Multimaterialsysteme auf Basis von Polypropylen-Polypropylen-Hybriden. Diss. TU Kaiserslautern, 2014
- [HOPM14] Hopmann, C.; Böttcher, A.; van der Straeten, K.; Riedel, R.; Schneider, F.; Engelmann, C.; Fischer, K.: Neue Prozesskette für faserverstärkte Thermoplaste. In: wt Werkstattstechnik online. 104. Jg., 2014, Nr. 9, S. 575–580
- [HORL16] Horlacher, H.-B.; Helbig, U. (Hrsg.). In: Rohrleitungen 1. Grundlagen, Rohrwerkstoffe, Komponenten (Reihe: VDI Springer Reference). 2. Aufl. Berlin: Springer, 2016
- [HUAN16] Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S.; Cresko, J.; Masanet, E.: Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. In: Journal of Cleaner Production. 2016, Nr. 135, S. 1559–1570

- [HUBE14] Huber, T.: Einfluss lokaler Endlosfaserverstärkungen auf das Eigenschaftsprofil struktureller Spritzgießbauteile. Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2014
- [IVAN13] Ivanov, D.; Li, Y.; Ward, C.; Potter, K: Transitional behaviour of prepregs in automated fibre deposition processes. In: Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Montreal, Kanada, 28. Juli - 2. August 2013
- [JANS17a] Janssen, H.; Buschhoff, C.: Leichtbaukarosserie. In: Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin: Springer, 2017, S. 97–98
- [JANS17b] Janssen, H.; Peters, T.; Brecher, C.: Efficient production of tailored structural thermoplastic composite parts by combining tape placement and 3d printing. In: Procedia CIRP. 66. Jg., 2017, S. 91–95
- [JING16] Jing, Z.; Sun, Q.; Silberschmidt, V. V.: Sequential permutation table method for optimization of stacking sequence in composite laminates. In: Composite Structures. 141. Jg., 2016, S. 240–252
- [JOPP17] Joppich, T.; Menrath, A.; Henning, F.: Advanced molds and methods for the fundamental analysis of process induced interface bonding properties of hybrid, thermoplastic composites. In: Procedia CIRP. 66. Jg., 2017, S. 137–142
- [KADD13] Kaddour, A. S.; Hinton, M. J.: Maturity of 3D failure criteria for fibre-reinforced composites: Comparison between theories and experiments. In: Journal of Composite Materials. 47. Jg., 2013, S. 6-7
- [KARB11] Schutzrecht DE 102010015199 A9 (16.04.2011). Karb, I.; Kehrle, R.; Witzel, V.: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Fasergelegen und Bauteilvorformlingen aus Fasern
- [KAUF08] Kaufman, M.; Zenkert, D.; Mattei, C.: Cost optimization of composite aircraft structures including variable laminate qualities. In: Composites science and technology. 68. Jg., 2008, Nr. 13, S. 2748–2754
- [KAWA04] Kawashita, L. F.; Moore, D. R.; Williams, J. G.: The development of a mandrel peel test for the measurement of adhesive fracture toughness of epoxy-metal laminates. In: The Journal of Adhesion. 80. Jg., 2004, Nr. 3, S. 147–167
- [KERM15] Kermer-Meyer, A.: Formhaltige und komplexe Laminatstrukturen in Thermoplast-Tapelegeverfahren. Diss. RWTH Aachen, 2015
- [KIM01] Kim, J.-S.; Kim, C.-G.; Hong, C.-S.: Practical design of tapered composite structures using the manufacturing cost concept. In: Composite Structures. 51. Jg., 2001, Nr. 3, S. 171–187

- [KIM99] Kim, J.-S.; Kim, C.-G.; Hong, C.-S.: Optimum design of composite structures with ply drop using genetic algorithm and expert system shell. In: *Composite Structures*. 46. Jg., 1999, Nr. 2, S. 285–299
- [KLEI13] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2013
- [KÖLZ08] Kölzer, P.: *Temperaturerfassungssystem und Prozessregelung des laserunterstützten Wickelns und Tapelegens von endlos faserverstärkten thermoplastischen Verbundkunststoffen*. Diss. RWTH Aachen, 2008
- [KRAU13] KraussMaffei: *FiberForm-Leichtbauteile. Thermoformen und Spritzgießen perfekt kombiniert*. München, 2013. Firmenschrift
- [KRAU16] Kraus, T.; Kühnel, M.; Witten, E.: *Composites-Marktbericht 2016. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. AVK (Hrsg.), 2016
- [KROM13] Krombholz, C.; Delisle, D.; Perner, M.: *Advanced automated fibre placement*. In: *Advances in Manufacturing Technology*, 2013, S. 411–416
- [KROP17a] Kropka, M.; Neumeyer, T.; Reichenstein, J.; Altstädt, V.: *Effect of the pre-consolidation process on quality and mechanical properties of mono- and multi-material laminates based on thermoplastic UD-tapes*. In: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM)*. Xi'an, China, 20.-25. August 2017
- [KROP17b] Kropka, M.; Muehlbacher, M.; Neumeyer, T.; Altstaedt, V.: *From UD-tape to final part – A comprehensive approach towards thermoplastic composites*. In: *Procedia CIRP*. 66. Jg., 2017, S. 96–100
- [KÜHN15] Kühnel, M.; Kraus, T.; Witten, E.: *Composites-Marktbericht 2015*. AVK (Hrsg.), 2015.
- [KUKL17] Kukla, C.; Peters, T.; Janssen, H.; Brecher, C.: *Joining of thermoplastic tapes with metal alloys utilizing novel laser sources and enhanced process control in a tape placement process*. In: *Procedia CIRP*. 66. Jg., 2017, S. 85–90
- [LAMO03] Lamontia, M. A.; Funck, S. B.; Gruber, M. B.; Cope, R. D.; Waibel, B. J.; Gopez, N. M.; Pratte, J. F.: *Manufacturing flat and cylindrical laminates and built up structure using automated thermoplastic tape laying, fiber placement, and filament winding*. In: *Sampe Journal*. 39. Jg., 2003, Nr. 2, S. 30–43
- [LANX09] LANXESS Deutschland GmbH: *Organoblech – die Innovation in der Hybridtechnik*. Köln, 2009. Firmenschrift
- [LANX10] LANXESS Deutschland GmbH: *Anwendungsbeispiel Frontend in Hybridtechnik mit Organoblech*. Köln, 2010. Firmenschrift

- [LANX17] LANXESS Deutschland GmbH: Tepex® Manual. Information for processors. Köln, 2017. Firmenschrift
- [LÄSS12] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R. T.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T.; Begemann, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. In: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger (Hrsg.), 2012
- [LATR03] Latrielle, M.: Prozessanalyse und -simulation von Verarbeitungsverfahren für faserverstärkte thermoplastische Bändchenhalbzeuge. Diss. Universität Kaiserslautern, 2003
- [LEE87] Lee, W. I.; Springer, G. S.: A model of the manufacturing process of thermoplastic matrix composites. In: Journal of Composite Materials. 21. Jg., 1987, Nr. 11, S. 1017–1055
- [LEIC15] Leichtbau BW GmbH: Großes Leichtbaupotenzial bei hoher Wirtschaftlichkeit durch Prozessverkürzung. Stuttgart, 2015. Firmenschrift
- [LEIS90] Leissa, A. W.; Martin, A. F.: Vibration and buckling of rectangular composite plates with variable fiber spacing. In: Composite Structures. 14. Jg., 1990, Nr. 4, S. 339–357
- [LEVY13] Levy, A.; Heider, D.; Tierney, J.; Gillespie, J. W.: Inter-layer thermal contact resistance evolution with the degree of intimate contact in the processing of thermoplastic composite laminates. In: Journal of Composite Materials. 48. Jg., 2013, Nr. 4, S. 491–503
- [LIU11] Liu, Z. F.; Du, G.; Xiao, J. Y.; Bai, S. X.; Zhang, W. J.: Size effects on the tensile and flexural strength of GFRP laminates. In: Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Jeju, Korea, 21.-26. August 2011
- [LONG07] Long, A. C.: Composites forming technologies (Reihe: Woodhead Publishing series in textiles, Bd. 61). Cambridge: Woodhead, 2007
- [LOOS15] Loos, M. R.: Carbon nanotube reinforced composites (Reihe: Plastic design library handbook). Amsterdam: Elsevier, 2015
- [LOPE08] Lopes, C. S.; Gürdal, Z.; Camanho, P. P.: Variable-stiffness composite panels. Buckling and first-ply failure improvements over straight-fibre laminates. In: Computers & Structures. 86. Jg., 2008, Nr. 9, S. 897–907
- [LUKA12] Lukaszewicz, D. H.-J.A.; Ward, C.; Potter, K. D.: The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. In: Composites Part B: Engineering. 43. Jg., 2012, Nr. 3, S. 997–1009
- [MALE10] Malek, T.: Noch leichter, noch belastbarer. Trends in der Hybridtechnik. In: Plastverarbeiter, 2010, Nr. 5, S. 38–39
- [MARQ17] Marquart, M.: Innovatives Preformingverfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter CFK-Schalenbauteile. Diss. RWTH Aachen, 2017

- [MARS11] Marsh, G.: Automating aerospace composites production with fibre placement. In: Reinforced Plastics. 55. Jg., 2011, Nr. 3, S. 32–37
- [MATH15] Mathieu, S.; Hamila, N.; Bouillon, F.; Boisse, P.: Enhanced modeling of 3D composite preform deformations taking into account local fiber bending stiffness. In: Composites science and technology. 117. Jg., 2015, S. 322–333
- [MAY08] May, C.; Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness (OEE) : Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. In: Zeitschrift der Unternehmensberatung : ZUb. 3. Jg., 2008, Nr. 6
- [MEJL17] Mejlej, V. G.; Falkenberg, P.; Türck, E.; Vietor, T.: Optimization of variable stiffness composites in automated fiber placement process using evolutionary algorithms. In: Procedia CIRP. 66. Jg., 2017, S. 79–84
- [MELO14] Melo, J. D.D.: LamRank, a laminate design tool. In: JEC Composites Magazine. 88. Jg., 2014, S. 49–51
- [MENG11] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: Werkstoffkunde Kunststoffe. 6. Aufl. München: Hanser, 2011
- [MERE15] Meredith, J.; Bilson, E.; Powe, R.; Collings, E.; Kirwan, K.: A performance versus cost analysis of prepreg carbon fibre epoxy energy absorption structures. In: Composite Structures. 124. Jg., 2015, S. 206–213
- [MERS11] Mersch, H.; Behnen, D.; Schmitz, D.; Epple, U.; Brecher, C.; Jarke, M.: Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Prozess- und Fertigungstechnik. In: at - Automatisierungstechnik. 59. Jg., 2011, Nr. 1, S. 7–17
- [MICH89] Michaeli, W.; Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München: Hanser, 1989
- [MTOR17] MTorres: Carbon Fiber Components. URL: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torresfiberlayup> [Stand: 01.03.2019]
- [NEIT14] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Aufl. München: Hanser, 2014
- [NETT14] Nettles, A.; Tsai, S. W.: Experimental measurement of C-Ply lamination parameters. In: JEC Composites Magazine. 2014. Jg., 2014, Nr. 88, S. 36–38
- [OLHA12] Olhager, J.: The Role of Decoupling Points in Value Chain Management. In: Jodlbauer, H.; Olhager, J.; Schonberger, R. (Hrsg.): Modelling value. Selected papers of the 1st International Conference on Value Chain Management. Steyer, Österreich. 4.-5. Mai, 2011. Heidelberg: Physica-Verlag, 2012, S. 37–48
- [OPTR19] OPTRON GmbH: Infrarotstrahler. Hannover, 2019. Firmenschrift

- [PAHL07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007
- [PARK09] Park, C. H.; Saouab, A.; Bréard, J.; Han, W. S.; Vautrin, A.; Lee, W. I.: An integrated optimisation for the weight, the structural performance and the cost of composite structures. In: Composites science and technology. 69. Jg., 2009, Nr. 7, S. 1101–1107
- [PART05] Parton, H.; Verpoest, I.: In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers. In: Polymer Composites. 26. Jg., 2005, Nr. 1, S. 60–65
- [PÉRÉ14] Pérès, P.; Dupillier, J. M.; Defoort, B.: Thermoplastic Composites structures for space applications: manufacturing process simulation. In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials (ECCM). Sevilla, Spanien, 22.-26. Juni 2014
- [PETE17] Peters, T.; Kukla, C.; Janssen, H.; al, e.: System improvement for laser-based tape placement to directly manufacture metal / thermoplastic composite parts. In: Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Xi'an, China. 20.-25 August 2017
- [PITC97] Pitchumani, R.; Gillespie, J. W.; Lamontia, M. A.: Design and optimization of a thermoplastic tow-placement process with in-situ consolidation. In: Journal of Composite Materials. 31. Jg., 1997, Nr. 3, S. 244–275
- [POPR15] Poprawe, R.; Hinke, C.; Meiners, W.; Schrage, J.; Bremen, S.; Merkt, S.: SLM production systems. Recent developments in process development, machine concepts and component design. In: Brecher, C. (Hrsg.): Advances in production technology. (Reihe: Lecture Notes in Production Engineering). Cham: Springer, 2015, S. 49–65
- [PUCK96] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. München: Carl Hanser, 1996
- [QURE14] Qureshi, Z.; Swait, T.; Scaife, R.; El-Dessouky, H. M.: In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology. Potential and possibilities. In: Composites Part B: Engineering. 66. Jg., 2014, S. 255–267
- [R&G 17] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Composite Technology. URL: <https://www.r-g.de/> [Stand: 01.03.2019].
- [RIET16] Rietman, B.; Boxus, E.; Muhammad, K.; Verghese, N.: Manufacturing solutions for hybrid overmolded thermoplastic UD composites. In: Proceedings of the SPE-ACCE. Novi, USA, 7.-9. September 2016
- [SACH14] Sachs, U.: Friction and bending in thermoplastic composites forming processes. Diss. University of Twente, Niederlande, 2014

- [SCHÄ15] Schäfer, P.; Staden, M.; Zaremba, S.; Drechsler, K.: Materialcharacterization for determining the consolidation properties of carbon fiber tapes with PA 6 matrix. In: Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Kopenhagen, Dänemark, 19.-24. Juli 2015
- [SCHÄ17] Schäfer, P. M.; Guglhoer, T.; Sause, M. G.R.; Drechsler, K.: Development of intimate contact during processing of carbon fiber reinforced Polyamide-6 tapes. In: Journal of Reinforced Plastics and Composites. 36. Jg., 2017, Nr. 8, S. 593–607
- [SCHI16] Schijve, W.; Kulkarni, S.: New thermoplastic composite solutions present viable options for automotive lightweighting. In: Proceedings of the SPE-ACCE. Novi, USA, 7.-9. September 2016
- [SCHM94] Schmidt, R.: Einsatz von Hochleistungslasern für die Fertigung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix im Wickelverfahren. Diss. RWTH Aachen, 1994
- [SCHÖ13] Schöldgen, R. A.: Inline-Imprägnieren und Hochtemperatur-Diaphragma-Umformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Diss. RWTH Aachen, 2013
- [SCHU01] Schubnell, M.: Bestimmung der Kristallinität bei Polymeren aus DSC-Messungen. In: Mettler-Toledo GmbH: UserCom, Nr. 13, S. 12-13, Gießen, 2001
- [SCHÜ05] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer, 2005
- [SCHU09] Schuck, M.: Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen. Diss. Universität Erlangen, 2009
- [SCHU12a] Schubel, P. J.: Cost modelling in polymer composite applications: Case study – Analysis of existing and automated manufacturing processes for a large wind turbine blade. In: Composites Part B: Engineering. 43. Jg., 2012, Nr. 3, S. 953–960
- [SCHU12b] Schuck, M.: New processes for large scale automotive production of composite applications. In: Sampe Journal. 48. Jg., 2012, Nr. 1., S. 22–28
- [SEID11] Seidlitz, H.; Kroll, L.; Uöe-Winter, L.: Kraftflussgerechte Punktverbindungen - Hochbelastete Leichtbaustrukturen. In: Kunststoffe. 101. Jg., 2011, Nr. 3, S. 50–53
- [SETO06] Setoodeh, S.; Abdalla, M. M.; Gürdal, Z.: Design of variable-stiffness laminates using lamination parameters. In: Composites Part B: Engineering. 37. Jg., 2006, 4-5, S. 301–309

- [SHI12] Shi, H.; Fernandez-Villegas, I.; Bersee, H. E.N.: An investigation on the strain distribution of resistance welded thermoplastic composite joints. In: Proceedings of the Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, USA, 23.-26. April 2012
- [SIEB17] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). 2. Aufl. Berlin: Springer, 2017
- [SLAN19] Slange, T. K.; Groupe, W. J.B.; Warnet, L. L.; Wijkskamp, S.; Akkerman, R.: Towards the combination of automated lay-up and stamp forming for consolidation of tailored composite components. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 119. Jg., 2019, S. 165–175
- [SONM97] Sonmez, F. O.; Hahn, H. T.: Analysis of the on-line consolidation process in thermoplastic composite tape placement. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials. 10. Jg., 1997, Nr. 6, S. 543–572
- [SPEC08] Specht, E.: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung. Vorlesungsmanuskript. Universität Magdeburg, 2008
- [STEE17] Steeg, M; Automation Steeg und Hoffmeyer GmbH: Facts and figures F2-Composite® and F2-Compositor®. Short Version. Budenheim, 2017. Firmenschrift
- [STEY11] Schutzrecht EP 2337670 A1 (29.06.2011). Steyer, M.; Schmitz, S.; Kölzer, P.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Verbundwerkstoffbauteilen sowie Andruckeinheit
- [STEY13] Steyer, M.: Laserunterstütztes Tapelegeverfahren zur Fertigung endlosfaserverstärkter Thermoplastlamine. Diss. RWTH Aachen, 2013
- [STIM14] STIMPFL, J.: CO<sub>2</sub>-laserunterstütztes Tapelege-, Wickelverfahren zur Verarbeitung von ungefärbten, endlos glasfaserverstärkten Thermoplast-Tapes. Diss. RWTH Aachen, 2014.
- [STOK15] Stokes-Griffin, C. M.; Compston, P.; Matuszyk, T. I.; Cardew-Hall, M. J.: Thermal modelling of the laser-assisted thermoplastic tape placement process. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials. 28. Jg., 2015, Nr. 10, S. 1445–1462
- [STRE15] Streukens, G.; Ickert, L.: Polymer hybrid systems. A new matrix system for large scale manufacturing. In: Composites effizient verarbeiten. Nürnberg, 14. April 2015. VDI Wissensforum (Veranst.), 2015
- [SU16] Su, Y.; Rooij, M. de; Groupe, W.; Warnet, L.: Characterisation of metal–thermoplastic composite hybrid joints by means of a mandrel peel test. In: Composites Part B: Engineering. 95. Jg., 2016, S. 293–300
- [TALR14] Talreja, R.: Assessment of the fundamentals of failure theories for composite materials. In: Composites science and technology. 105. Jg., 2014, S. 190–201

- [THOM17] Thomassey, M.; Revol, B. P.; Ruch, F.; Schell, J.; Bouquey, M.: Interest of a rheokinetic study for the development of thermoplastic composites by T-RTM. In: *Universal Journal of Materials Science*. 5. Jg., 2017, Nr. 1, S. 15-27
- [TICO09] Ticona: Celstran CFT PA6-CF60. Preliminary Values. Kelsterbach, 2009. Firmenschrift
- [TIER03] Tierney, J.; Gillespie, J. W.: Modeling of Heat Transfer and Void Dynamics for the Thermoplastic Composite Tow-Placement Process. In: *Journal of Composite Materials*. 37. Jg., 2003, Nr. 19, S. 1745–1768
- [TIER06] Tierney, J.; Gillespie, J. W.: Modeling of In Situ Strength Development for the Thermoplastic Composite Tow Placement Process. In: *Journal of Composite Materials*. 40. Jg., 2006, Nr. 16, S. 1487–1506
- [TORA19] Toray Advanced Composites: Toray Cetex TC910 PA6. Product data Sheet. Nottingham, UK, 2019. Firmenschrift
- [TSAI15] Tsai, S. W.; Melo, J. D. D.: *Composite materials design and testing. Unlocking mystery with invariants*. Stanford: Stanford University, 2015
- [TSAI71] Tsai, S. W.; Wu, E. M.: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. In: *Journal of Composite Materials*. 5. Jg., 1971, Nr. 1, S. 58–80
- [TÜR17] Türk, D.-A.: *Exploration and validation of integrated lightweight structures with additive manufacturing and fiber-reinforced polymers*. Diss. ETH Zurich, 2017
- [UZMA12] Uzman, B.; Gurdal, Z.: Automated Fiber Placement. A buyer's perspective looking at the future. In: *Proceedings of the SME Manufacturing with Composites Conference*. Charlston, USA, 23. Oktober 2012
- [VANC08] Vanclooster, K.; Lomov, S. V.; Verpoest, I.: Investigation of interply shear in composite forming. In: *International Journal of Material Forming*, 2008, S. 957–960
- [VAND16] van der Straeten, K.; Burkhardt, I.; Olowinsky, A.; Gillner, A.: Laser-induced self-organizing microstructures on steel for joining with polymers. In: *Physics Procedia*. 83. Jg., 2016, S. 1137–1144
- [VANR07] van Rijswijk, K.; Bersee, H. E. N.: Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38. Jg., 2007, Nr. 3, S. 666–681
- [VDI93] Richtlinie VDI 2221 (Mai 1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*

- [VDI98] Richtlinie VDI 2225 Blatt 3 (November 1998). Konstruktionsmethodik. Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Technisch-wirtschaftliche Bewertung
- [VDI14] Richtlinie VDI 3405 (Dezember 2014). Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen
- [VOGT15] Vogt, M.; Malanowski, N.; Glitz, R.; Stahl-Rolf, S.: Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2015
- [VORD92] Vordermayer, A. M.: Herstellung von unidirektional kohlefaserverstärkten Thermoplasten durch Polymerpulverimprägnierung mittels einer wässrigen Dispersion. Diss. TU Berlin, 1992
- [WAKE02] Wakeman, M.D.; Hagstrand, P.-O.; Bonjour, F.; Bourban, P.-E.; Manson, J.-A.E.: Robotic tow placement for local reinforcement of glass mat thermoplastics (GMTs). In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 33. Jg., 2002, Nr. 9, S. 1199–1208
- [WEIL17] Weiler, T.; Emonts, M.; Wollenburg, L.; Janssen, H.: Transient thermal analysis of laser-assisted thermoplastic tape placement at high process speeds by use of analytical solutions. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2017, S. 311-338
- [WEIß17] Weißgerber GmbH & Co KG. URL: <http://www.carbon-vertrieb.com/index.php> [Stand: 01.03.2019]
- [WERN16] Werner, D.; Janssen, H.; Brecher, C.: Laminate aus duroplastischen Prepregs mit aktivierbarer Adhäsion. In: Lightweight Design. 9. Jg., 2016, Nr. 4, S. 54–59
- [WIJS05] Wijskamp, S.: Shape distortions in composites forming Diss. University of Twente, Niederlande, 2014
- [WIKN14] Wikner, J.: On decoupling points and decoupling zones. In: Production & Manufacturing Research. 2. Jg., 2014, Nr. 1, S. 167–215
- [WITT14] Witten, E.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2014
- [WITT18] Witten, E.; Mathes, V.; Sauer, M.; Kühnel, M.: Composites-Marktbericht 2018. . AVK (Hrsg.), 2018
- [YANG02] Yang, F.; Pitchumani, R.: Interlaminar contact development during thermoplastic fusion bonding. In: Polymer Engineering & Science. 42. Jg., 2002, Nr. 2, S. 424–438
- [YE05] Ye, L.; Lu, M.; Liu, H.-Y.: Deconsolidation and reconsolidation of thermoplastic composites during processing. In: Polymer Composites. Boston, USA: Springer, 2005, S. 233–254

- [YORK15] York, C.: A two-ply termination strategy for mechanically coupled tapered laminates. In: Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM). Kopenhagen, Dänemark, 19.-24. Juli 2015

### **Während der Promotion betreute studentische Arbeiten**

- Kluth, M.: Prüfstandskonstruktion und Festigkeitsuntersuchung von fasergerechte-Verbindungselementen in FVK. Bachelorarbeit. FH Aachen 2012
- Berns, H.; Willgardt, S.: Thermoformen von Thermoplasten mit unidirektionaler, endloser Kohlenstoffverstärkung - Theoretische und praktische Analyse des Aufheizvorgangs. Projektarbeit. RWTH Aachen, 2012
- Heuser, P.; Engels R. A.: Thermoformen von Thermoplasten mit unidirektionaler, endloser Kohlenstoffaserverstärkung - Durchführung und Analyse des Pressvorgangs. Projektarbeit. RWTH Aachen, 2012
- Wasiak, C.: Entwicklung eines Anlagenkonzeptes zur Konsolidierung von belastungs- und verschnittoptimierten Organoblechen aus thermoplastischen Faserverbundkunststoffen. Diplomarbeit. RWTH Aachen, 2013
- Holkenbrink, A.: Entwicklung eines Anlagenkonzeptes zur Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Organoblechen aus thermoplastischen Faserverbundkunststoffen. Diplomarbeit. RWTH Aachen, 2013
- Möhl, A.: Integration von Verbindungselementen in belastungsoptimierte Organobleche im Thermoformingprozess. Diplomarbeit. RWTH Aachen, 2013
- Wagner, T.: Prozessanalyse der thermoplastischen Tapeverarbeitung mit Hilfe von Infrarotstrahlern für die Herstellung von belastungs- und verschnittoptimierten Organoblechen. Masterarbeit. RWTH Aachen, 2014
- Seinsche, P.: Additive Fertigungskette zur Herstellung von endlosfaserverstärkten und funktionalisierten Strukturbauteilen. Masterarbeit. RWTH Aachen, 2016
- Scharf, R.: Technologiebewertung einer weiterentwickelten Prozesskette zur Herstellung belastungs- und verschnittoptimierter FVK-Bauteile. Masterarbeit. RWTH Aachen, 2016