

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen

Claudia Anna Ehinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung eines akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Drechsler

Die Dissertation wurde am 01.06.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.09.2012 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt den beiden Leitern des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, für die wohlwollende Förderung und die großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler, dem Leiter des Lehrstuhls für Carbon Composites der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Kollegen/-innen und Projektpartnern, mit denen ich während meiner Zeit am Institut zusammenarbeiten durfte und die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Allen Studierenden, die ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin betreut habe und die mich bei der Umsetzung dieser Arbeit unterstützt haben (siehe Kapitel 11), möchte ich meinen besonderen Dank für ihre geleistete Arbeit aussprechen.

Weiterhin bedanke ich mich ganz besonders bei meinen Eltern und meinem Mann Toni für ihre Geduld und immerwährende Unterstützung in allen Belangen. Sie haben mir den notwendigen Rückhalt für die Erstellung dieser Arbeit gegeben.

Augsburg, im Mai 2012

Claudia Ehinger

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Bedeutung der Faserverbundtechnologie vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen	1
1.2	Grundlagen der Faserverbundtechnologie	3
1.3	Motivation und Ziel der Arbeit.....	6
2	Situationsanalyse.....	9
2.1	Automatisierungshemmnisse	9
2.2	Stand der Forschung und Technik	12
2.2.1	Allgemeines	12
2.2.2	Möglichkeiten der Bauteilklassifizierung	13
2.2.3	Greif- und Montagesysteme für formlabile Bauteile	15
2.2.3.1	Handhabungssysteme für ebene, formlabile Bauteile.....	16
2.2.3.2	Abrollende Greif- und Drapiersysteme.....	19
2.2.3.3	Systeme zur dreidimensionalen Verformung und Montage von formlabilen Bauteilen.....	23
2.2.4	Planungswerkzeuge und -methoden für die Montage von formlabilen Bauteilen.....	31
2.2.5	Realisierung einer durchgängigen Prozesskette	34
2.2.6	Fazit	37
2.3	Präzisierung der Aufgabenstellung.....	40
2.4	Systemeingrenzung.....	41

3	Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms	43
3.1	Allgemeines	43
3.2	Technische Anforderungen.....	44
3.3	Wirtschaftliche Anforderungen	46
4	Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms	49
4.1	Angestrebtes Zielszenario und abgeleitete Arbeitsschwerpunkte	49
4.2	Methodik zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms..	51
4.3	Referenzszenario	53
4.4	Vorgehen zur Realisierung eines Montagewerkzeuges.....	55
4.4.1	Geometrische Analyse des Lagenaufbaus.....	55
4.4.2	Anforderungsgerechte Auswahl eines Werkzeugkonzepts.....	59
4.4.2.1	Entwicklung neuartiger Montagewerkzeuge	59
4.4.2.2	Konzeption modularer Montagewerkzeuge	66
4.4.2.3	Absicherung mit Hilfe von Funktionsmustern	68
4.4.2.4	Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Montagewerkzeuges .	70
4.4.2.5	Auswahl eines passenden Montagewerkzeuges	72
4.4.3	Festlegung der Drapierstrategie	74
4.4.4	Aufgabenspezifische Gestaltung eines Montagewerkzeuges	77
4.4.5	Festlegung der Anlagenperipherie	82
4.5	Vorgehen zur rechnergestützten Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges	84
4.5.1	Notwendigkeit der aufgabenorientierten Bahnplanung	84
4.5.2	Definition von Legekurven	85

4.5.3	Umsetzung der aufgabenorientierten Bahnplanung	87
4.6	Zusammenfassung und Diskussion.....	90
5	Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms	93
5.1	Allgemeines	93
5.2	Realisierung des Montagewerkzeuges für einen automatisierten Fertigungsprozess	94
5.2.1	Konzeption des Montagewerkzeuges	94
5.2.2	Konzeptabsicherung mit Hilfe von Funktionsmustern.....	95
5.2.2.1	Versuchsziele	95
5.2.2.2	Funktionsmuster zur Überprüfung des zylinderförmigen Basiskonzepts.....	96
5.2.2.3	Ergänzendes Funktionsmuster zum Drapieren von konkaven Winkeln.....	99
5.2.2.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	101
5.2.3	Auslegung ausgewählter Einzelkomponenten.....	102
5.2.3.1	Drapiereinheit	102
5.2.3.2	Trägereinheit.....	105
5.2.4	Strömungssimulation des Gesamtkonzepts	106
5.2.4.1	Allgemeines	106
5.2.4.2	Vorversuche an einer prototypischen Drapiereinheit	106
5.2.4.3	Strömungssimulation ausgewählter Submodule.....	111
5.2.4.4	Auswahl eines Vakuumerzeugers.....	113
5.2.5	Umsetzung eines roboterbasierten Endeffektors.....	116
5.2.5.1	Mechanischer Aufbau	116
5.2.5.2	Sensorintegration	117

5.2.5.3	Ansteuerungstechnik	120
5.3	Aufbau einer Versuchsanlage.....	122
5.3.1	Komponenten der Versuchsanlage.....	122
5.3.2	Simulative Absicherung der Versuchsanlage.....	124
5.4	Umsetzung der aufgabenorientierten Bahnplanung zur rechnergestützten Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges	127
5.4.1	Allgemeines.....	127
5.4.2	Erstellung der Lege- und Aufnahmekurven.....	128
5.4.3	Assistentenunterstützte Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges.....	130
5.4.3.1	Aufgaben der Programmierumgebung	130
5.4.3.2	Programmablauf zur aufgabenorientierten Bahnplanung.....	131
5.4.3.3	Besonderheiten bei der Bahngenerierung.....	135
6	Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen	141
6.1	Allgemeines	141
6.2	Untersuchung der Prozessphasen	142
6.2.1	Aufnahme und Transport	142
6.2.2	Drapieren.....	144
6.3	Positioniergenauigkeit	147
6.4	Prozesszeitbestimmung	149
6.5	Lautstärkemessung	150
6.6	Energieverbrauch.....	151
6.7	Weiterführende Untersuchungen.....	152

7	Wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems	155
7.1	Allgemeines	155
7.2	Betrachtete Szenarien und Annahmen.....	156
7.3	Wirtschaftliche Bewertung	160
7.4	Fazit.....	162
8	Schlussbetrachtung.....	163
8.1	Zusammenfassung	163
8.2	Ausblick	165
9	Literaturverzeichnis	169
10	Anhang.....	189
10.1	Technische Anforderungen.....	189
10.2	Auswahl von Wirkprinzipien.....	189
10.3	Aufbau einer Drapiereinheit und Variationsmöglichkeiten der integrierten Submodule.....	195
10.4	Spezialgeometrien.....	195
10.5	Bewertung der Basiskonzepte ZF und MRD gemäß VDI 2225	196
10.6	Exemplarische Nachdrapierwerkzeuge.....	197
10.7	Versuchsergebnisse des zylinderförmigen Funktionsmusters	197
10.8	Bewertungsergebnisse des Funktionsmusters zum Drapieren von konkaven Winkeln	198
10.9	Erfassung der Heizfeldtemperatur	198
10.10	Drapierstrategie der Referenzbauteile Spant und Diaphragm	199
10.11	Schritte des Drapierassistenten	200
10.12	Datenblatt einer Beispiellage	202

Inhaltsverzeichnis

10.13	Materialabhängige Standardparameter für die Prozessphasen.....	203
10.14	Positioniergenauigkeit beim Drapieren einer ebenen Lage des Referenzbauteils Panel	203
10.15	Taktzeitabschätzung	204
10.16	Abschätzung des Wiederbeschaffungswertes.....	205
11	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	207

Abkürzungsverzeichnis

2,5D	Zweieinhalbdimensional
3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
ACES	Advanced Composites Environment Suite
AT	Arbeitstag
BG	Berufsgenossenschaft
B-Spline	Basis-Spline
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
const.	Konstant
cRIO	Compact Realtime
DEE	Doppelendeffektor
DIN	Deutsches Institut für Normung
dxf	Drawing Exchange Format
EU	Europäische Union
FE	Finite Elemente
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
FWZ	Formwerkzeug
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff

Abkürzungsverzeichnis

Gl.	Gleichung
GUI	Graphical User Interface
IBN	Inbetriebnahme
I/O	Input/Output
iges	Initial Graphics Exchange Specification
IR	Infrarot
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Kalk.	Kalkulatorisch
KO	Knock Out
KRL	KUKA Robot Language
LCM	Life Cycle Management, Liquid Composite Molding
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
MA	Mitarbeiter
MAG	Multiaxial-Gelege
max.	Maximal
min.	Minimal
MOS-FET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MP	Messpunkt
MRD	Modifiziertes Reuleaux-Dreieck
MWZ	Montagewerkzeug
NCF	Non Crimped Fabrics
NTC	Negative Temperature Coefficient
NWZ	Nachdrapierwerkzeug

PAC	Programmable Automation Controller
PC	Personal Computer
PDM	Produktdatenmanagement
PE	Produktionseinheit
PKW	Personenkraftwagen
Prepreg	Preimpregnated Fibers
PTFE	Polytetrafluorethylen (ugs. Teflon)
QS	Qualitätssicherung
RMPS	Rapid Material Placement System
RTM	Resin Transfer Molding
S.	Seite
TCP	Tool Center Point
TUM	Technische Universität München
UD	Unidirektional
VAP	Vacuum Assisted Process
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZF	Zylinderform

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	mm	Strecke
A_{CF}	mm ²	Fläche des gegriffenen CF-Textils
$A_{CF,DE}$	mm ²	Fläche des CF-Textils auf einer Drapiereinheit
A_{DE}	mm ²	Fläche einer Drapiereinheit
$A_{P\text{fropfen}}$	mm ²	Fläche des Verschlusspfropfens
A_{Schlauch}	mm ²	Querschnittsfläche des durchströmten Saugschlauches
b_{max}	mm	Maximale Textilbreite
B	mm	Breite
B_{MWZ}	mm	Nutzbare Breite des Montagewerkzeuges
c	N/mm, m/s	Federkonstante, Strömungsgeschwindigkeit
d	mm	Abstand
D	mm	Höhe
F_F	N	Federkraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_H	N	Haltekraft
F_{HM}	N	Kraft des Hubmagneten
F_P	N	Kraft auf Verschlusspfropfen
F_V	N	Verschlusskraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	mm	Höhe

Verzeichnis der Formelzeichen

I	A	Stromstärke
k	mm mbar/V	Kompressionstiefe, Empfindlichkeit
k_{DW}		Faktor zur Korrektur des Drehwinkels
K_A	€/a	Kalkulatorische Abschreibung
K_E	€/a	Energiekosten
K_{ES}	€/Stück	Kosteneinsparung pro Stück
K_I	€/a	Instandhaltungskosten
K_{JE}	€/a	Jährliche Kostenersparnis
K_M	€/h	Montagekosten
K_{MH}	€/h	Maschinenstundensatz
K_{PK}	€/h	Personalkostensatz
K_R	€/a	Raumkosten
K_{ST}	€/Stück	Montagestückkosten
K_{WB}	€	Wiederbeschaffungswert
K_Z	€/a	Kalkulatorischer Zinssatz
l_{LK}	mm	Länge der Legekurve
l_{max}	mm	Maximale Textillänge
l_{Soll}	mm	Notwendige Textillänge
l_T	mm	Länge des abgelegten Textils
L	mm	Länge
m_{FG}	g/m ²	Flächengewicht
n	Stück/a	Erreichbare Stückzahl
n_{DE}		Anzahl der geöffneten Drapiereinheiten
n_{Innen}		Anzahl innenliegender Drapiereinheiten

Verzeichnis der Formelzeichen

n_{Rand}		Anzahl der äußeren Drapiereinheiten
Δp	mbar	Druckabfall/Differenzdruck
$\Delta p_{\text{Drapiereinheit}}$	mbar	Druckabfall über Drapiereinheit
Δp_{ges}	mbar	Druckabfall über Gesamtsystem
Δp_{max}	mbar	Maximaler Druckabfall
Δp_{MWZ}	mbar	Druckabfall über Montagewerkzeug
$\Delta p_{\text{Schlauch}}$	mbar	Druckabfall über Schlauch
Δp_{Soll}	mbar	Sollwertvorgabe für Differenzdruckregelung
Δp_{Textil}	mbar	Druckabfall über Textil
$\Delta p_{\text{Trägereinheit}}$	mbar	Druckabfall über Trägereinheit
p_0	mbar	Druck in der Trägereinheit
p_1	mbar	Druck im Inneren der Drapiereinheit
p_{Dyn}	mbar	Dynamischer Druckanteil
p_{Stat}	mbar	Statischer Druckanteil
p_{Tot}	mbar	Gesamtdruck
P	W	Leistung
P_L	Stück/h	Nettoleistung
r	mm	Radius
R	Ω mm	Elektrischer Widerstand, Radius
s	m	Wegstrecke
t	s	Zeit
t_A	a	Amortisationszeit
t_n	a	Nutzungsdauer
t_{NAZ}	h/a	Nettoarbeitszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

$\vec{t}_{P_n P_{n+1}}$		Tangentenvektor
T	°C	Temperatur
T_{Ges}		Gesamttransformation
T_{Heiz}	°C	Heiztemperatur
$T_{Schmelz}$	°C	Schmelztemperatur
T_U	s	Umrüstzeit
T_{Xa}	s	Automatisierte Fertigungszeit
T_{Xm}	s	Manuelle Fertigungszeit
\ddot{U}_{DE}	%	Prozentuale Überdeckung einer geöffneten Dra- piereinheit
U_{MWZ}	mm	Nutzbarer Umfang des Montagewerkzeuges
\ddot{U}_\emptyset	%	Durchschnittlicher Überdeckungsgrad
v	m/s	Bahngeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit
\dot{V}	m ³ /s, sl/min	Volumenstrom
\dot{V}_{max}	m ³ /s, sl/min	Maximaler Volumenstrom
$\dot{V}_{\ddot{U}=50\%}$	m ³ /s, sl/min	Volumenstrom bei 50% Kammernüberdeckung
$\dot{V}_{\ddot{U}=100\%}$	m ³ /s, sl/min	Volumenstrom bei 100% Kammernüberdeckung
x	mm	Oberflächenerhöhung auf Formwerkzeug, Kammernzeile
α	°	Eckwinkel (bei MRD oder NWZ)
β	°	Winkel der 3D-Lage im Preformaufbau
δ	°	Konkaver Winkel des Formwerkzeuges Rampe
ζ	Ns/m ⁵	Strömungswiderstand
ρ	g/cm ³	Dichte

Verzeichnis der Formelzeichen

φ	°	Drehwinkel
φ_0	°	Rotations-Offset
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

1.1 Bedeutung der Faserverbundtechnologie vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) halten nicht nur in Produkten des täglichen Lebens Einzug, auch in technisch komplexen Anwendungen werden vermehrt extrem leichte Bauteile benötigt. Verbundwerkstoffe mit Aramid-, Glasfaser-, oder Kohlenstofffaserverstärkungen eignen sich hierbei besonders, da das Leichtbaupotenzial deutlich über dem klassischer Konstruktionswerkstoffe wie z. B. Stahl liegt (HUFENBACH 2007). Dabei ist die Faserverbundbauweise keineswegs eine Erfindung der vergangenen Jahrzehnte. Wie so oft ist die Natur Vorbild für technische Errungenschaften der Neuzeit. In einem Jahrtausenden dauernden Evolutionsprozess hat sich ein Leichtbauprinzip herausgebildet, bei dem verschiedenartige Materialien zu einem Werkstoffverbund kombiniert werden, wobei die Kräfte über hochfeste Fasern aufgenommen werden (z. B. Holz, Bambus, Merinowolle etc.). Dadurch lassen sich Synergieeffekte erzielen, die dazu führen, dass deutlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten und gleichzeitig eine geringere Dichte als bei kompakten Werkstoffen erreicht werden (SCHÜR-MANN 2007). Die Anwendung dieser Bauweise bei technischen Produkten hat viele Bereiche revolutioniert, da erstmals Werkstoffe mit herausragenden Eigenschaften zur Verfügung standen. Im weiteren Verlauf führten ökonomische und ökologische Gründe zu einer stark aufstrebenden und bisher ungebrochenen Entwicklung des Marktes für FVK, für welchen ein jährliches Wachstum von ca. 13-15 % prognostiziert wird (VERDENHALVEN 2008). Das Leistungspotenzial der FVK fand zunächst in Hochtechnologien wie der Raumfahrt und im militärischen Bereich Anwendung. Von dort aus hielt die Technologie auch in den zivilen Flugzeugbau Einzug. Eine weltweite Verteuerung der Energiekosten sowie erhöhte Anforderungen an Ressourceneffizienz, Größe, Nutzlast, Geschwindigkeit und Reichweite führten dazu, dass ein immer größerer Anteil des Strukturgewichts aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) realisiert wird (siehe Abbildung 1) (MITSCHANG & BERESHEIM 2004).

1 Einleitung

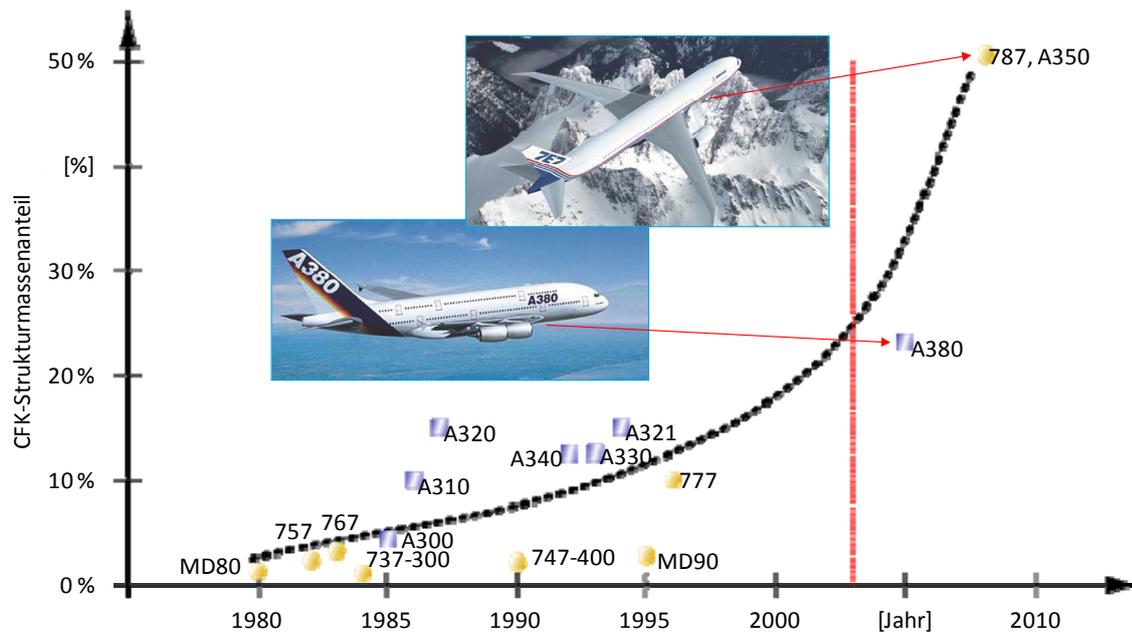


Abbildung 1: Entwicklung des CFK-Strukturmasseanteils in der Luft- und Raumfahrt (WIEDEMANN 2009)

Vor diesem Hintergrund ist es Stand der Technik, dass bei modernen Passagierflugzeugen wie dem Airbus A350 oder der Boeing 787 der CFK-Massenanteil der Primärstruktur bereits über 50% beträgt und auch für zukünftige Flugzeuge weiter erhöht werden soll (DRECHSLER 2008). Aufgrund der hervorragenden Werkstoffcharakteristika konnte sich die FVK-Technologie neben der Luft- und Raumfahrt auch in anderen Industriezweigen etablieren. Ein zunehmendes Umweltbewusstsein, die verschärfte Lage auf den Energiemärkten sowie der steigende Wettbewerb auf den Weltmärkten und der damit einhergehende Innovationsdruck führte zu einer Migration der FVK-Technologie in verschiedenste Industriesektoren. Neben dem Einsatz im Sport- und Freizeitbereich findet sich ein Großteil der industriellen Anwendungen im Transportsektor, im Bauwesen, in Windkraftanlagen und in der Elektroindustrie (FLEMMING ET AL. 1999, MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Auch im Automobilbau wandelt sich die Bedeutung von FVK stark. Wohingegen FVK früher hauptsächlich in teuren Oberklassefahrzeugen aus Prestige- und Verkaufsgründen verbaut wurden, ist der Einsatz von Leichtbautechnologien wesentliches Ziel bei der derzeitigen Neu- und Weiterentwicklung von Fahrzeugen (KRENKEL 2009). Nicht zuletzt aufgrund der EU-Richtlinie, welche die Automobilhersteller verpflichtet, bis 2012 einen durchschnittlichen CO₂-Flottenausstoß von 120 g/km zu erreichen, sowie den Fortschritten im Bereich der Elektromobilität besteht bei der Umsetzung von Leichtbautechnologien massiver Handlungsdruck (KOMMISSION DER

EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2007, DUFLOU ET AL. 2009). Um langfristig erfolgreich und wettbewerbsfähig zu sein, müssen produzierende Unternehmen in Hochlohnländern wie z. B. Deutschland daher einerseits diese Zukunftstechnologien frühzeitig fokussieren und andererseits eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von neuartigen und effizienten Produktionstechnologien einnehmen (SCHUH ET AL. 2011).

1.2 Grundlagen der Faserverbundtechnologie

Bei FVK werden verschiedene Werkstoffe derart kombiniert, dass die Mängel der Einzelwerkstoffe ausgeglichen werden und sich dadurch eine Verbesserung der Materialeigenschaften erzielen lässt. Innerhalb des Verbundes gibt es eine klare Arbeitsteilung. Hochfeste, verstärkende Fasern nehmen die anliegenden mechanischen Lasten auf, während die formgebende Kunststoff-Matrix die Fasern stützt und die einwirkenden Kräfte an sie weiterleitet. Eine gute Haftung an der Grenzfläche zwischen Matrix und Faser ist von besonderer Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften und das Langzeitverhalten des Verbundwerkstoffes (R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH 2003). Eine gezielte Verstärkung kann durch eine entsprechende Ausrichtung der Fasern in Beanspruchungsrichtung ermöglicht werden, wodurch der Werkstoff im Gegensatz zu Metall oder unverstärkten Kunststoffen anisotrope Materialeigenschaften aufweist (EHRENSTEIN 2006). Den zahlreichen Vorteilen von FVK stehen aber auch Nachteile gegenüber, welche die Marktchancen dieser Technologie bisher limitierten. Die untenstehende Auflistung fasst die vor- und nachteiligen Eigenschaften von FVK zusammen (EHRENSTEIN 2006, SCHÜRMAN 2007, MITSCHANG & BERESHEIM 2004, REYNE 2008, AVK 2010).

Vorteile:

- Weitgehend elastisches Verformungsverhalten
- Hohe Festigkeit und Steifigkeit, welche an Belastungsrichtung und -art angepasst werden kann
- Hohes Leichtbaupotenzial bei geringer Dichte
- Hochintegrative Gestaltungsmöglichkeiten durch komplexe Formgebung (Integralbauweise)
- Kombinationsmöglichkeiten bei der Auswahl von Matrix und Faser
- Hohe Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit
- Hohes Energieabsorptionsvermögen

1 Einleitung

Nachteile:

- Variantenvielfalt bei der Zusammensetzung, keine Standardisierung
- Komplexes Material- und Versagensverhalten
- Erkennung und Reparatur lokaler Schädigungen schwerer als z. B. bei Aluminium
- Teilweise hohe Rohstoffpreise (z. B. für Kohlenstofffasern)
- Aufwändige Fertigungsprozesse mit großteils geringem Automatisierungsgrad
- Kaum Recycling-Technologien vorhanden

Unter den Verstärkungsfasern nimmt die Kohlenstofffaser die bedeutendste Stellung ein, da sie herausragende mechanischen Eigenschaften besitzt (HUFENBACH 2007). Bis 2004 wurde ein mäßiges Wachstum des Bedarfs an Kohlenstofffasern von ca. 7% verzeichnet. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Ressourcenverknappung steigerte sich ab 2004 der weltweite jährliche Zuwachs auf ca. 15%. Dieser Anstieg wurde hauptsächlich durch den vermehrten industriellen Einsatz in der Windenergiebranche sowie in der Luft- und Raumfahrt hervorgerufen (VERDENHALVEN 2008).

Die unterschiedlichen Herstellverfahren für FVK richten sich stark nach den Anforderungen, die an das zukünftige Bauteil gestellt werden. In Anlehnung an MILLS (2001) durchläuft ein Formgebungsprozess für ein Faserverbundbauteil unabhängig vom Herstellverfahren folgende Schritte:

1. Einbringen der Fasern in oder auf die Form
2. Tränkung der Fasern mit dem Matrixmaterial und Verdichtung (Kompaktierung)
3. Aushärtung

Zur Herstellung von FVK existiert eine Vielzahl von Fertigungsverfahren, für die bisher keine einheitliche Klassifizierung besteht. Während SCHEMME (2010) eine Einteilung nach dem Automatisierungsgrad vornimmt, ordnen MITSCHANG & BERESHEIM (2004) typische Bauteilgruppen nach ihrer Größe und Formkomplexität ein und weisen ihnen entsprechende Fertigungsverfahren zu. Desweiteren werden je nach Herstellungsverfahren unterschiedliche Ausgangsmaterialien verwendet. Das Faserspritzen und existierende Wickelverfahren nutzen beispielsweise die Faser im geschnittenen bzw. endlosen Zustand. In Tapelegeverfahren werden vorimprägnierte, unidirektionale Tapes –sogenannte Prepregs (Preimpregnated Fibers)– richtungs- und positionsvariabel auf ebenen

oder gekrümmten flächigen Strukturen abgelegt. Über eine Vorschubeinheit oder durch Abrollen wird das Material zur Anpresseinheit transportiert und dort kompaktiert bzw. durch Aushärten der Matrix konsolidiert (AVK 2010). Andere Verfahren hingegen greifen auf textile Halbzeuge als Zwischenstufe zurück. Auch hier muss zwischen bereits vorimprägnierten Halbzeugen (Prepregs) und trockenen Halbzeugen unterschieden werden. Als typische Vertreter sind in diesem Zusammenhang Gewebe oder Gelege zu nennen, bei denen Fasern zu komplexen, meist flächigen Anordnungen zusammengefasst werden, um dann in weiteren Prozessschritten zu Bauteilen verarbeitet zu werden (MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Zwar hat die Verwendung von Prepreg-Halbzeugen den Vorteil, dass aufgrund einer guten Faserausrichtung und einer annähernd luftblasenfreien Imprägnierung bestmögliche Fertigungsqualitäten und Festigkeitswerte erreicht werden können, jedoch entstehen auch hohe Lagerungs-, Investitions-, und Betriebskosten (OSTHUS 1996). Da die verwendeten Harze und Härter reaktionsfähig sind, müssen Prepregs gekühlt gelagert und transportiert werden. Zudem stellt der zur Aushärtung benötigte Autoklav eine teure Investition dar, welche im Betrieb hohe Energiekosten verursacht. Vor dem Hintergrund erheblicher Rationalisierungsanstrengungen rücken wirtschaftliche Verfahren in den Fokus, so dass neuartige Harzinfusions- und Injektionstechniken verstärkt an Bedeutung gewinnen (SCHÜRMAN 2007, KLEINEBERG ET AL. 2002, MILLS 2006). Diese weisen eine große Anzahl an unterschiedlichen Verfahrensvarianten auf und haben in den vergangenen Jahren ein schnelles Wachstum erfahren. Da im Gegensatz zu Prepregs weder eine Kühlung noch ein Autoklav benötigt wird, fällt der erforderliche Investitionsaufwand deutlich geringer aus. Bei allen Harzinfusions- und Injektionsverfahren wird ein Vorformling in eine Werkzeugform eingelegt, anschließend mit der Matrix durchtränkt und durch Aushärten der Matrix in ein konsolidiertes Bauteil überführt (CAMPBELL 2004). Unter der Bezeichnung Vorformling oder Preform versteht man eine endkonturnahe, nicht imprägnierte Faserstruktur. Die stark unterschiedlichen Anforderungen an die benötigte Preform definieren die Auswahl des Verfahrens zur Preformherstellung. Während bei der direkten Preformherstellung (z. B. Flechten, Tailored Fiber Placement, Faserspritzen) die 3D-Geometrie direkt aus den Fasern hergestellt wird, werden bei der sequentiellen Preformherstellung mehrere Prozessschritte benötigt. Aufgrund des geringen Automatisierungsgrades befasst sich die vorliegende Arbeit mit der sequentiellen Preformherstellung, bei der aus verschiedenen Zuschnitten lagenweise eine Preform aufgebaut wird (siehe auch Kapitel 2.1)

1.3 Motivation und Ziel der Arbeit

Um das volle Potenzial der aktuellen Infusions- und Injektionstechniken nutzen zu können, sind effektive Methoden zur Preformherstellung notwendig. Nur 25% der Bauteilkosten werden durch anfallende Materialkosten verursacht, 75% der Kosten hingegen entstehen durch nachgelagerte Prozesse. Gründe hierfür sind sowohl hohe Ausschussraten als auch ein hoher Aufwand an manuellen Tätigkeiten (VERDENHALVEN 2008). Eine genauere Aufteilung der Kosten bei der Preformherstellung gibt DRECHSLER (2009). Hieraus wird ersichtlich, dass die Arbeitsschritte „Zuschnitt“ und „Lagenaufbau“ der sequentiellen Preformherstellung mit über 50% den größten Anteil an den Gesamtkosten verursachen (siehe Abbildung 2). FRAUENHOFER ET AL. (2007) beziffern den Kostenanteil des Preforming-Prozesses sogar auf 60%. Eine Steigerung des Automatisierungsgrades stellt sich daher als besonders zielführend heraus, um die vergleichsweise teuren Bauteilkosten zu reduzieren und eine bessere Marktdurchdringung von FVK-Bauteilen zu erreichen (SCHEITLE 2008, BIERMANN ET AL. 2008).

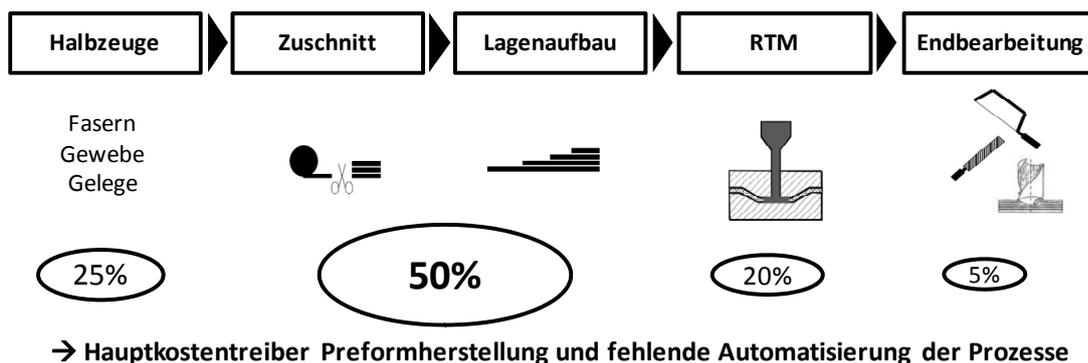


Abbildung 2: Kostenstruktur bei der Herstellung von eines CFK-Bauteils mit sequentiellen Preformingverfahren (DRECHSLER 2009)

Vor diesem Hintergrund fokussiert sich die vorliegende Arbeit thematisch auf die zeit- und arbeitsintensive Erstellung des Lagenaufbaus bei sequentiellen Preformingverfahren. Die Arbeit verfolgt das Ziel, ein Vorgehen zur Umsetzung einer automatisierten Preformherstellung zu erarbeiten sowie übertragbare Regeln für eine Auswahl und Gestaltung der hierfür verwendeten Werkzeuge aufzustellen. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Problemstellung sollen Lösungswege für eine durchgängige Prozesskette zur Programmierung und Ansteuerung der Werkzeuge entwickelt werden, welche eine datentechnische Anbindung an industriell etablierte Systeme ermöglichen. Zur Überwindung der in Kapitel 2.1 dargestellten Automatisierungshemmnisse wird eine

Automatisierungslösung für die Montage von CFK-Preforms entwickelt. Diese wird an einem industriellen Referenzszenario erprobt, um die Integrationsmöglichkeit in den bisherigen Fertigungsprozess aufzuzeigen und zu bewerten.

Zur Erreichung der Zielsetzung ist eine strukturierte Vorgehensweise notwendig. Auf Basis aktueller Trends und Entwicklungen sowie den Grundlagen der Faserverbundtechnologie werden in *Kapitel 1* die Motivation der Arbeit sowie die verfolgte Zielsetzung abgeleitet.

In *Kapitel 2* werden zunächst vorhandene Automatisierungshemmnisse analysiert und darauf aufbauend gezielt Entwicklungen aus dem Bereich der Forschung sowie bestehende Lösungsansätze und Realisierungsmöglichkeiten der Industrie dargestellt. Eine Bewertung der vorgestellten Lösungsmöglichkeiten ist die Grundlage für eine Fokussierung der Aufgabenstellung.

Basierend auf der vorausgegangenen Situationsanalyse werden in *Kapitel 3* die Anforderungen an eine automatisierte Montage von Preforms analysiert. Hierbei werden neben den wirtschaftlichen auch die technischen Anforderungen an eine entsprechende Automatisierungslösung definiert.

Kapitel 4 stellt den Kernteil der Arbeit dar. Hierin wird die Entwicklung einer Methodik zur Realisierung einer automatisierten Preformmontage beschrieben. Die Schwerpunkte der Methodik umfassen eine anwendungsorientierte Umsetzung eines Montagewerkzeuges sowie dessen rechnergestützte Offline-Programmierung.

Mit Hilfe einer Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms wird in *Kapitel 5* die Umsetzung der Methodik verdeutlicht. Es werden die Realisierung eines roboterbasierten Montagewerkzeuges, der Aufbau und Betrieb einer Versuchsanlage sowie das umgesetzte Vorgehen zur aufgabenorientierten Bahnplanung und Ansteuerung detailliert beschrieben.

Kapitel 6 beinhaltet die technische Evaluation des Gesamtsystems anhand eines Praxisbeispiels. Neben der Überprüfung der Grundfunktionen werden relevante Kennwerte an industriellen Referenzbauteilen erfasst und weitere Anwendungsfelder aufgezeigt.

Die experimentellen Ergebnisse des Referenzszenarios bilden die Grundlage für eine abschließende wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems in *Kapitel 7*. Anhand von verschiedenen Anwendungsvarianten wird eine

1 Einleitung

Kostenvergleichsrechnung durchgeführt sowie die kritische Produktionsmenge und die jeweilige Amortisationszeit bestimmt.

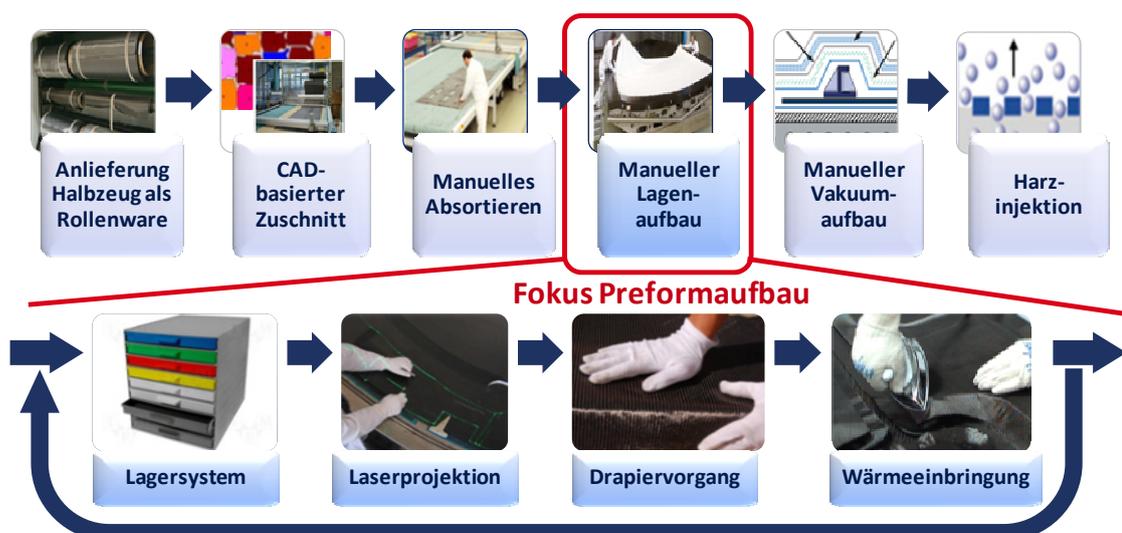
Kapitel 8 bildet den Abschluss der vorliegenden Arbeit. Hierin werden die wichtigsten Arbeitsergebnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick über zukünftige Handlungsfelder gegeben.

2 Situationsanalyse

2.1 Automatisierungshemmnisse

Um die bestehenden Automatisierungshemmnisse bei der Preformherstellung erfassen zu können, wird zunächst der Prozess der konventionellen Preformherstellung im industriellen Umfeld näher beleuchtet. Aus einer detaillierten Situationsanalyse des von manuellen Arbeitsschritten dominierten Prozesses lassen sich Rückschlüsse auf die beteiligten Systemkomponenten ziehen sowie deren Eigenschaften und Ausprägungen identifizieren (LINDEMANN 2005, EHRENSPIEL 2003).

Abbildung 3 zeigt beispielhaft den industriellen Fertigungsprozess einer schichtweise aufgebauten Preform, welche anschließend im sogenannten VAP (Vacuum Assisted Process)-Verfahren zu einem konsolidierten Bauteil weiterverarbeitet wird. Bei dem VAP-Verfahren handelt es sich um ein von EADS entwickeltes und patentiertes Injektionsverfahren mit einteiligem Formwerkzeug und Harzinfiltration durch Vakuumabsaugung (SCHUTZRECHT WO 01/068353 A1). VAP-Bauteile erfordern nur geringe Investitionen in Maschinen und Werkzeuge und weisen ein hohes Faservolumen sowie eine gute Bauteilqualität auf (SAERTEX GMBH & CO. KG 2010, FEILER 2001, MUSER 2007). Aufgrund dieser und zahlreicher anderer Vorteile wird das VAP-Verfahren stellvertretend für alle Injektions- und Infusionsverfahren, bei denen eine lagenweise aufgebaute Preform benötigt wird, in Abbildung 3 vorgestellt.



Quelle: Premium AEROTEC GmbH, saertex GmbH & Co. KG, SL-Laser GmbH

Abbildung 3: Bisheriger industrieller Fertigungsprozess eines VAP-Bauteils

2 Situationsanalyse

Bei dem dargestellten Fertigungsprozess wird das Halbzeug als Rollenware angeliefert und automatisiert auf Basis von CAD-Daten auf einem Industriebühnenzugeschnitt. Die Lagen werden anschließend manuell sortiert und in ein Lagerungssystem eingelegt. Dieses gestaltet sich häufig in Form eines verfahrbaren Schubladenwagens, bei dem jede Schublade mit einem sortierten Zuschnitt belegt wird. Da der Schneidtablett und das Formwerkzeug über eine größere Distanz örtlich voneinander getrennt platziert sein können, wird das Lagerungssystem für die nachfolgenden Arbeitsschritte zum Formwerkzeug bewegt. Für die Erstellung des Preformaufbaus wird die Sollkontur der zu legenden Lage durch ein spezielles Lasersystem auf das Formwerkzeug projiziert. Der Arbeiter entnimmt die passende Lage aus dem Lagerungssystem und drapiert sie in einer ausstreichenden Bewegung so auf das Formwerkzeug, dass der Lagenrand auf der projizierten Sollkontur zu liegen kommt. Für die positionsgenaue Fixierung der Lage wird das thermoplastische Bindervlies, welches sich auf der Lagenrückseite befindet, mit Hilfe eines Industriebügeleisens aufgeschmolzen. Durch die Wärmeeinbringung und den aufgetragenen Druck wird die Lage auf der Unterlage fixiert. Entsprechend der im Legehandbuch vorgegebenen Reihenfolge wiederholt sich der beschriebene Drapierprozess bis zur Fertigstellung der Preform für jede Lage. Für die weitere Verarbeitung im VAP-Verfahren wird die Preform anschließend durch den VAP-typischen Vakuumaufbau ergänzt, so dass im nachfolgenden Prozess das flüssige Harz durch das Anlegen eines Vakuums infiltriert werden kann (MUSER 2007, FEILER 2001).

Der bisherige Herstellungsprozess ist stark an die Manufaktur angelehnt, da der Fertigungsablauf einer Preform zahlreiche Automatisierungshemmnisse beinhaltet. Analysiert man den bisherigen Fertigungsablauf, so lassen sich im Hinblick auf eine Automatisierung drei Einflussfaktoren identifizieren:

1. Zuschnitt
2. Formwerkzeug
3. Prozess

Die prozessimmanenten Eigenschaften dieser drei Einflussfaktoren erschweren die Automatisierung maßgeblich und stellen bisher ungelöste Herausforderungen für eine flexible Automatisierungslösung dar (siehe Abbildung 4).

Automatisierungshemmnisse		
Zuschnitt	Formwerkzeug	Prozess
<p>Material</p> <ul style="list-style-type: none"> •Formlabil •Anisotrop •Luftdurchlässig <p>Geometrie</p> <ul style="list-style-type: none"> •Kleine Verstärkungslagen und großflächige Zuschnitte •Komplizierte Nebenformen <p>Variantenvielfalt</p> <ul style="list-style-type: none"> •Material •Zuschnittkontur •Größenabmessung 	<p>Variantenvielfalt</p> <ul style="list-style-type: none"> •Material •Größenabmessung •Geometrische Merkmale (konkav, konvex, Radien, Winkel etc.) •Positionierung der Zuschnitte 	<p>Prozessvorgaben</p> <ul style="list-style-type: none"> •Faserintegrität •Faserorientierung •Einhaltung von definierten Standards und Abläufen <p>Menschliches Erfahrungswissen</p> <ul style="list-style-type: none"> •Prozessabläufe •Prozessparameter •Geschicklichkeit •Frühzeitige Erkennung von potenziellen Fehlern und Fehlerquellen

Abbildung 4: Automatisierungshemmnisse bei der Preformherstellung

Formlabilität, Anisotropie sowie Luftdurchlässigkeit sind die dominierenden Materialeigenschaften der verarbeiteten Zuschnitte, welche dadurch nur schwer handhabbar sind. Hinzu kommt, dass als textile Halbzeuge Gewebe und Gelege verwendet werden, die sich aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitung der Fasern hinsichtlich Flächengewicht, Drapierbarkeit und Materialeigenschaften enorm unterscheiden (MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Um die Vorteile einer beanspruchungsgerechten Auslegung der Bauteile auszunutzen, werden Zuschnitte verwendet, welche verschiedenste Geometrien und komplizierte Nebenformen enthalten können. Eines der größten Automatisierungshemmnisse ist folglich die bestehende Variantenvielfalt, welche alle wichtigen Bereiche betrifft. Es müssen häufig variierende Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften verarbeitet werden, wobei auch die Zuschnitte verschiedene Konturen und Größenabmessungen aufweisen können. Weiterhin ist die bestehende Vielfalt an Formwerkzeugen enorm groß (MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Diese differieren nicht nur hinsichtlich des eingesetzten Materials (z. B. Invar, Aluminium, Ureol) und der Größenabmessung. Bedingt durch ein anforderungsgerechtes Design der Bauteile ist auch eine komplexe Gestalt der Formwerkzeuge möglich, welche verschiedenartige geometrische Merkmale beinhaltet. So können beispielsweise das Auftreten bzw. die Ausprägungsformen von Radien, Winkeln, konkaven oder konvexen Krümmungen stark variieren. Die Zuschnitte müssen

an nahezu beliebigen Stellen auf dem Formwerkzeug positioniert werden. Unterschiedlichste dreidimensionale Verformungen der Zuschnitte während des Drapiervorgangs sind somit notwendig, damit diese anschließend gemäß der vorgegebenen Sollposition auf dem Formwerkzeug fixiert werden können. Der Faktor Mensch spielt im bisherigen Produktionsprozess eine entscheidende Rolle, da die Erfahrung einzelner Mitarbeiter bei der Erstellung des Lagenaufbaus, deren Geschicklichkeit und „Fingerspitzengefühl“ einen maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilqualität haben (OHLENDORF ET AL. 2010, BERCHTHOLD ET AL. 2009, BUCKINGHAM & NEWELL 1996). Die notwendigen Erfahrungswerte hinsichtlich Prozessparametern und -abläufen sowie das vorausschauende Erkennen und Vermeiden potenzieller Fehlerquellen führen einerseits dazu, dass das menschliche Erfahrungswissen nur schwer durch ein automatisiertes System abgebildet werden kann. Andererseits ist der Prozessablauf stark von den individuellen Fähigkeiten einzelner Mitarbeiter abhängig und damit Schwankungen unterworfen. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die hohen erforderlichen Qualitätsstandards nicht reproduzierbar eingehalten werden können und somit ein erhöhtes Ausschussrisiko bzw. die Notwendigkeit zur Nacharbeit besteht.

2.2 Stand der Forschung und Technik

2.2.1 Allgemeines

Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sowie die identifizierten Automatisierungshemmnisse wird in den folgenden Kapiteln der Stand der Technik und Forschung dargelegt. Im Detail wird hierbei auf gängige Methoden zur Bauteilklassifizierung eingegangen. Anschließend wird eine Auswahl bereits realisierter Systeme für das Greifen und die Montage von formlabilen Bauteilen vorgestellt. Im Hinblick auf die angestrebte Vorgehensweise zur automatisierten Preformherstellung wird darauf aufbauend näher auf bestehende Planungswerkzeuge und -methoden für die Montage von formlabilen Bauteilen eingegangen. Existierende Systeme zur Herstellung von CFK-Bauteilen, welche eine durchgängige Prozesskette von der Datenerzeugung bis hin zur Ansteuerung beinhalten, werden im Folgenden behandelt. Die recherchierten Ergebnisse aus Industrie und Forschung werden abschließend zusammengefasst und bewertet (siehe Tabelle 2). Es wird analysiert, inwieweit existierende Lösungsansätze die bestehenden Automatisierungshemmnisse (siehe Kapitel 2.1) überwinden. Auf dieser Grundlage werden vorhandene Defizite aufgezeigt, der vorherrschende

Handlungsbedarf identifiziert und Rückschlüsse auf notwendige Maßnahmen für eine zukünftige Realisierung einer automatisierten Preformmontage gezogen.

2.2.2 Möglichkeiten der Bauteilklassifizierung

In der DIN 6763 werden Begriffe für das Gebiet der Nummerung definiert. Eine Klasse ist demnach durch eine Anzahl ausgewählter Merkmale festgelegt und fasst Gegenstände anhand übereinstimmender Merkmale logisch zusammen. Das Klassifizieren beschreibt das Bilden von Klassen, Klassifikationssystemen und Klassifikationsnummernsystemen. Ein Klassifikationssystem ist als Ordnungsschema für Klassen, ein Klassifikationsnummernsystem als Nummernsystem für ein Klassifikationssystem definiert. Die sich ergebenden Klassifikationsnummern beschreiben dabei Gegenstände einer Klasse, welche gleiche Merkmale besitzen, aber nicht identisch sind (CONRAD 2005). Durch eine Klassifizierung kann die bestehende Variantenvielfalt der Einzelkomponenten durch Zusammenfassen, Ordnen und Gruppieren verringert werden. Zudem wird das bestehende Teilesortiment analysiert und eine Grundlage für die Vereinheitlichung von Fertigungsprozessen geschaffen (JACOBS & DÜRR 2002).

Die Vielzahl an Formwerkzeugen spielt bei der Entwicklung von Automatisierungslösungen für eine lagenweise Preformherstellung eine zentrale Rolle, da jede einzelne CF-Lage positionsgenau auf der dreidimensional gekrümmten Oberfläche des Formwerkzeuges abgelegt und fixiert werden muss. Für ein systematisches Entwicklungsvorgehen ist es somit wichtig, eine Klassifizierung vorzunehmen, bei der verwendete Formwerkzeuge und der Lagenaufbau anhand ihrer geometrischen Eigenschaften analysiert und eingeteilt werden. Anhand dieser Einteilung kann anschließend entschieden werden, ob eine Automatisierungslösung für das vorliegende Bauteilspektrum geeignet ist oder nicht.

Eine qualitative Einteilung automatisiert herstellbarer Bauteilgeometrien wurde in HENNING 2008 vorgenommen. Der entwickelte Endeffektor (siehe Abbildung 20) ist in der Lage, die gegriffenen Textilien in verschiedene Formwerkzeuge abzulegen, welche in drei Geometrieklassen eingeteilt werden können. Die erste Geometrieklasse bilden ebene Bauteile mit gekrümmten Seiten (Tabelle 1 A, B, C). Die zweite Geometrieklasse umfasst Bauteile mit konstantem Krümmungsradius (Tabelle 1 D, E, F). Im Gegensatz dazu werden in der dritten Geometrieklasse Bauteile zusammengefasst, welche geknickte Kanten aufweisen (Tabelle 1 G, H) (GRUNDMANN 2009). Eine ähnliche Einteilung findet sich in (BRECHER & EMONTS 2011) auch für den in Abbildung 21 dargestellten Greifer.

2 Situationsanalyse

Ebene Bauteile mit gekrümmten Seiten	Bauteile mit konstantem Krümmungsradius
A 	D 
B 	E 
C 	F 
Geknickte Formen oder Bauteile	
G 	H 

Tabelle 1: Einteilung der Formwerkzeuge in Geometrieklassen, welche automatisiert hergestellt werden können (GRUNDMANN 2009)

Eine gegenstandsübergreifende Einteilung von Bauteilen erfolgt in der DIN 4000. Hierbei werden Gegenstandsgruppen definiert, welche ähnliche Gegenstände wie z. B. keilförmige Scheiben, Radiallager etc. zusammenfassen. Innerhalb einer Gegenstandsgruppe wird anschließend eine Einteilung der Bauteile anhand von Sachmerkmaleisten vorgenommen.

Für bestimmte technische Anwendungsbereiche bietet es sich jedoch an, speziell auf den Anwendungsfall zugeschnittene Klassifikationssysteme zu verwenden, um gewisse Teilprozesse zu vereinfachen und effizient zu gestalten. Derartige Ordnungsschemata finden u. a. bei PDM-Systemen (SENDER & WAWER 2008), im Bauwesen (MORO ET AL. 2009) sowie in der Umformtechnik Anwendung (EBERHARDT 2007, SCHÄFER 2002, TSCHÄTSCH & DIETRICH 2010). Da vor allem in der Fertigungstechnik mögliche Analogien für eine Einteilung von CFK-Bauteilen gezogen werden können, sollen Klassifikationsansätze aus diesem Bereich im Folgenden näher betrachtet werden.

Die Systematik „ZAFO“ dient der allgemeinen Klassifikation von Bauteilen unabhängig von der Fertigungsmethode mit dem Ziel, Konstrukteuren die Ähnlichkeitssuche zu vereinfachen, Neukonstruktionen zu vermeiden sowie eine leichtere Abschätzung des Fertigungsaufwandes zu ermöglichen. Hierbei werden die Bauteile in Formklassen eingeteilt, wobei sowohl die Hauptgeometrie (z. B. Scheibenform) als auch Form und Lage der Nebenformelemente (z. B. Nabe, Rand, Flansch) berücksichtigt werden. Durch eine schematische Einordnung werden für jedes Bauteil ein Haupt- und entsprechend der Anzahl der Nebenformelemente mehrere Nebencodes ermittelt (ZIMMERMANN 1967).

EBERHARDT (2007) stellt eine Formenordnung für Blechteile in der Umformtechnik vor, welche durch einen Vergleich mit Ähnlichteilen eine genauere Aufwandsabschätzung der Arbeitsvorbereitung zulässt. Der Konstrukteur teilt hierbei die Bauteile in die jeweilige Formenklasse, Formengruppe sowie Untergruppe ein, so dass anschließend ein bauteilspezifischer Code ermittelt werden kann.

Für eine effiziente Fertigungsplanung beim Fließpressen entwickelten TSCHÄTSCH & DIETRICH (2010) eine Formenordnung, welche die Bauteile gemäß der Hauptgeometrie und der Elemente auf der Mantelfläche und Deckfläche unterscheidet. Die Vorteile aus dieser Klassifikation ergeben sich durch eine einfachere Indikation der Schwierigkeitsgrade beim Pressen sowie durch eine Reduzierung des Herstellungsaufwandes für Formen.

SCHÄFER (2002) unterteilt Blechteile gemäß ihrer geometrischen Eigenschaften und leitet daraus mögliche Fertigungsverfahren ab. Die Sollform der Blechteile wird auf lokale und globale Extrema, senkrechte Bereiche und Hinterschnitte untersucht, so dass anschließend die Zuordnung einer Typ-Nummer erfolgen kann (siehe Abbildung 5). Basierend auf einer Analyse und Klassifikation der Bauteile kann nachfolgend die passende Verfahrenskombination zur Fertigung der entsprechenden Bauteile ermittelt werden. Neben der hämmernden Blechumformung mit Industrierobotern werden hierbei die Fertigungsverfahren Tiefziehen, Beschneiden, Biegen und Fügen betrachtet.

Ein lokales Minimum ist zugleich ein globales Minimum								
Kein lokales Maximum			Lokales Maximum ist nicht zugleich globales Maximum			Lokales Maximum ist zugleich globales Maximum		
Senkrechte Bereiche			Senkrechte Bereiche			Senkrechte Bereiche		
nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja
Hinterschnitte			Hinterschnitte			Hinterschnitte		
nein	nein	ja	nein	nein	ja	nein	nein	ja
Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	Typ 7	Typ 8	Typ 9
								

Abbildung 5: Klassifizierung von Blechteilen in Abhängigkeit von geometrischen Merkmalen (SCHÄFER 2002)

2.2.3 Greif- und Montagesysteme für formlabile Bauteile

Das vorliegende Kapitel fokussiert Greif- und Montagesysteme für formlabile Bauteile. Hierfür werden zunächst exemplarisch Handhabungssysteme und Auslegungsvorgehen für ebene Problemstellungen vorgestellt. Anschließend wird

diese Betrachtung um abrollende Greif- und Drapiersysteme zum Aufnehmen, Vereinzeln und Ablegen erweitert. Den Abschluss des Kapitels bilden Umsetzungsbeispiele für die dreidimensionale Verformung und Montage von formlabilen Bauteilen, wobei unterschieden wird, ob die Verformung passiv oder aktiv herbeigeführt wird.

2.2.3.1 Handhabungssysteme für ebene, formlabile Bauteile

Branchenübergreifend befassen sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Entwicklung von Greifsystemen für eine automatisierte Handhabung von formlabilen Materialien. Vor dem Hintergrund verschiedenster Anwendungsszenarien entstand eine Vielzahl an Greifsystemen, deren Ausführungsformen und Wirkprinzipien sich teils erheblich unterscheiden. Einen Überblick über bereits entwickelte Systeme geben SAADAT & NAN (2002) und STRABER (2012). Während SAADAT & NAN (2002) die bestehenden Systeme entsprechend der industriellen Anwendung unterteilen, ordnet STRABER (2012) die relevanten Handhabungssysteme in Übersichtsdiagramme mit den Kategorien „Anwendung“ und „Material“ gemäß ihrem technischen Reifegrad ein. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung und Einteilung der identifizierten Greifsysteme hinsichtlich der geometrischen Anpassungsfähigkeit und dem dazu notwendigen Adaptionaufwand, wobei in diesem Fall aufrollende und klemmende Greifvorrichtungen nicht näher betrachtet werden. Einen Überblick über die verschiedenen physikalischen Wirkprinzipien und Bauformen von Textilgreifern gibt STEPHAN (2001). Hierbei wird auch der Erfüllungsgrad der industriellen Anforderungen bewertet. Umsetzungsbeispiele der einzelnen Wirkprinzipien finden sich in zahlreichen Arbeiten. Bei SZIMMAT (2007) kommt ein Greifsystem mit vier integrierten Gefriergreifern zum Einsatz. GÖTZ (1991) hingegen verwendet bevorzugt Flächengreifer in verschiedenen Ausführungsvarianten. Ebenfalls werden zum Vereinzeln von Matten matrixförmig angeordnete Saugnäpfe eingesetzt, welche in Gruppen selektiv aktivierbar gestaltet sind. Ein ähnliches Prinzip integriert der von FAILLI & DINI (2004) entwickelte Sauggreifer, welcher zur Handhabung von Lederzuschnitten matrixförmig angeordnete, selektiv aktivierbare Saugnäpfe beinhaltet. In SELIGER ET AL. (1992) werden die relevanten Designparameter eines Nadelgreifers sowie eines Kratzengreifers näher untersucht. Desweiteren wird ein in der Größe einstellbarer Kratzengreifer zum Stapeln und Vereinzeln von Zuschnitten vorgestellt. OCHS (2010) führt ein schwingungsunterstütztes Greifsystem ein, welches piezoelektrisch erzeugte Schwingung zum Ablösen eines adhäsiv anhaftenden Textils nutzt. LIEN & DAVIS (2008) verwenden einen eben gestalteten

Coanda-Ejektor, um formlabile und poröse Materialien handzuhaben. In GROB-MANN ET AL. (2010) werden Verstärkungsstäbe in die Preform integriert, welche nach dem Handhabungsvorgang wieder entfernt werden. APMANN ET AL. (2010) verwenden an ein Gestell montierte Bernoulli-Greifer, um trockene CF-Zuschnitte vom Stapel zu vereinzeln und zu transportieren (siehe Abbildung 6).

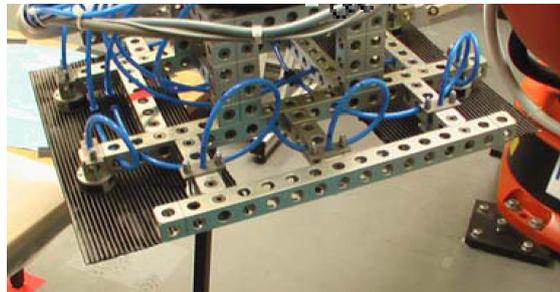


Abbildung 6: Transport eines CF-Zuschnittes mit Hilfe von Bernoulli-Greifern (APMANN ET AL. 2010)

Um ein geeignetes Wirkprinzip für das Greifen von CF-Textilien auszuwählen, führen SELIGER ET AL. (2003) eine Auswahlmatrix ein. Unter Berücksichtigung von Material-Kenndaten und Greifereigenschaften kann das passende Wirkprinzip für die weitere Planung des Systemdesigns selektiert werden. SCHAAF (2010) gibt mit Hilfe des in Abbildung 7 dargestellten Diagramms eine Entscheidungshilfe für die Auswahl des passenden Greifprinzips in Abhängigkeit von der spezifischen Luftdurchlässigkeit der Materialien und dem erreichbaren Differenzdruck.

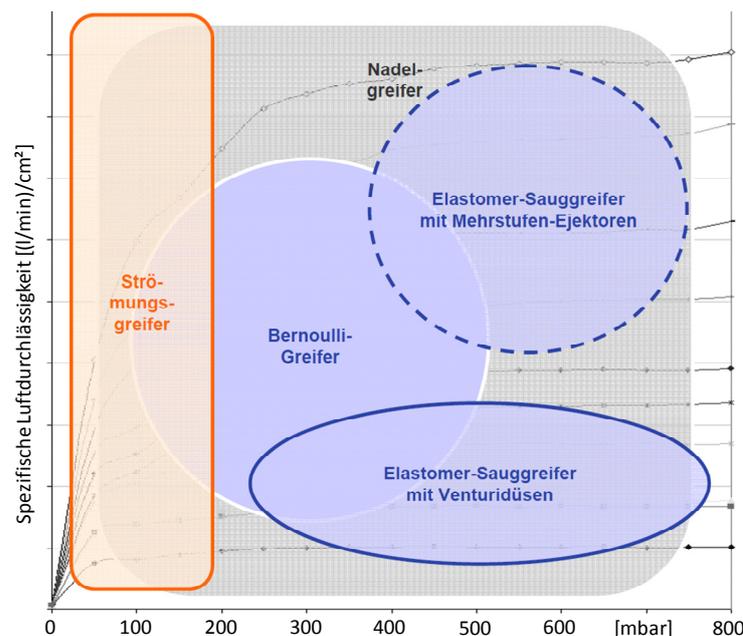


Abbildung 7: Diagramm zur Auswahl von Greifprinzipien (SCHAAF 2010)

2 Situationsanalyse

Für eine automatisierte Auswahl geeigneter Greifsysteme wird in BRECHER & EMONTS (2011) das Software-Tool „HandSup“ vorgestellt. Auf der Grundlage von im Vorfeld durchgeführten Versuchsergebnissen wird in Abhängigkeit von der Handhabungsaufgabe (Faserart, Luftdurchlässigkeit, Flächengewicht, Zykluszeit etc.) eine Rangliste an möglichen Greifsystemen vorgeschlagen. Das in STRABER (2012) und REINHART & STRABER (2011) vorgestellte methodische Vorgehen zur Entwicklung eines Greifsystems beinhaltet als Zwischenschritt ebenfalls die Selektion eines passenden Greifprinzips. Aus einem Portfolio an passenden Greifprinzipien werden zunächst umsetzbare Greifprinzipien ausgewählt und diese anschließend experimentell evaluiert. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen erfolgt anschließend die Auswahl des Greifprinzips. Auf der Basis des eingeführten Vorgehensmodells stellt STRABER (2012) die technische Realisierung eines hochflexiblen Greifsystems für das Absortieren von technischen Textilien vor. Hierbei kann eine konturselective Haltekraft durch die Integration von individuell verschließbaren Öffnungen in einen Niederdruckflächen-sauger erzeugt werden. Das Funktionsprinzip des Greifers sowie der Aufbau eines Moduls sind in Abbildung 8 dargestellt.

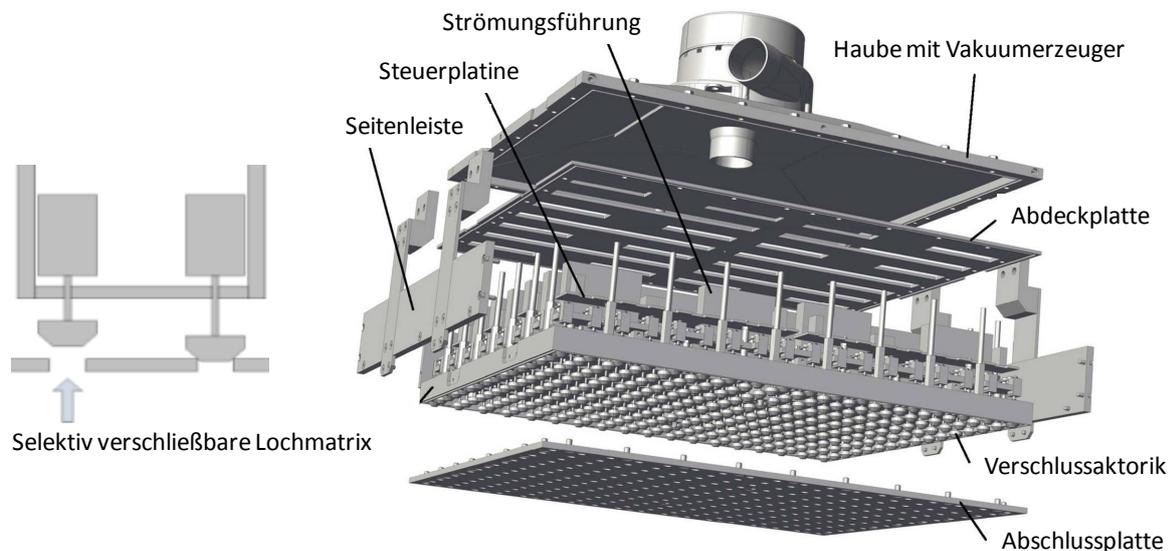


Abbildung 8: Handhabungssystem mit selektiv aktivierbarer Greiffläche (STRABER 2010)

Ebenfalls mit dem konturangepassten Greifen von CF-Zuschnitten befasst sich der in SCHUTZRECHT DE102005047645B4 vorgestellte Flächensauggreifer, dessen Greiffläche durch verschiebbare Kammernwände verändert werden kann. Bei dem von BRÖTJE-AUTOMATION GMBH (2010) entwickelten System erfolgt eine Adaption der Greiffläche durch eine selektive Ansteuerung der matrixförmig

angeordneten Saugelemente. Ein rekonfigurierbarer Greifer zur Handhabung und Vereinzelung von Zuschnitten wird in KOLLURU ET AL. (2000) vorgestellt. Auch hierbei kommen Flächensauger zum Einsatz, welche an verfahrbaren Kinematikeinheiten angebracht sind. Bei dem von BILSING AUTOMATION GMBH (2012) entwickelten Baukastensystem „Flexible Tooling“ handelt es sich ebenfalls um ein flexibel konfigurierbares Handhabungssystem, welches für Greifaufgaben in Presswerken und Karosseriebau entwickelt wurde.

2.2.3.2 Abrollende Greif- und Drapiersysteme

Für das Aufnehmen, Vereinzeln oder Ablegen von formlabilen Materialien mit einheitlicher, meist rechteckiger Zuschnittkontur werden häufig abrollende Greif- und Drapiersysteme verwendet. Während der sukzessiven Abrollbewegung wird die notwendige Aufnahmekraft auf einen linienförmigen mitwandernden Bereich konzentriert, was eine schonende Handhabung der formlabilen Materialien bei minimalem Krafteinsatz ermöglicht (GÖTZ 1991). Während des Ablegevorgangs wird durch die linienförmige Ausstreichbewegung der abrollenden Drapiersysteme sichergestellt, dass Lufteinschlüsse oder Falten vermieden werden und das Material gleichzeitig schonend abgelegt wird. Sowohl im industriellen Umfeld als auch im Bereich der Forschung existiert aufgrund dieser Vorteile eine Vielzahl von unterschiedlichen Ausprägungsformen.

Das BREMER WERK FÜR MONTAGESYSTEME GMBH (2012) bietet auf den Anwendungsfall zugeschnittene Automatisierungslösungen für die Herstellung von FVK-Bauteilen an. Für die automatisierte Herstellung eines Bootsrumpfes wird beispielsweise ein Tuchleger eingesetzt, welcher großflächige, rechteckige Glasfaserzuschnitte auf dem konvex gekrümmten Formwerkzeug abrollt (DÖRSCH 2010). Für eine automatisierte Herstellung des Flanschbereiches von Rotorblättern für Windenergieanlagen vertreibt WORTHMANN AUTOMATION GMBH (2011) einen Portalroboter mit Endeffektor, welcher im Rahmen des Forschungsprojekts PREBLADE zusammen mit dem Bremer Institut für Kunststofftechnik und der SGL Rotec entwickelt wurde (siehe Abbildung 9) (SGL ROTEC 2010, WORTHMANN AUTOMATION GMBH 2011).

2 Situationsanalyse



Abbildung 9: PREBLADE-Endeffektor zur automatisierten Herstellung von Rotorblättern (WORTHMANN AUTOMATION GMBH 2011)

Hierbei wird das textile Halbzeug, welches als Rollenware angeliefert wird, in einer Umwickleinheit auf den Hohlzylinder des Endeffektors umgespult und entsprechend der im Legehandbuch festgelegten Länge zugeschnitten. Mit Hilfe eines Portals können beliebig viele Lagen unterschiedlicher Breite und Länge auf einer ebenen Fläche abgelegt werden (WORTHMANN AUTOMATION GMBH 2011). Ebenfalls ein Portalablagensystem, das sogenannte Rapid Material Placement System (RMPS), verwendet die Firma MAG IAS (2011) zur Herstellung von Laminaten für Flügelschalen und Holme. Durch den modularen Aufbau des Systems können unterschiedliche Materialbreiten auf das Formwerkzeug aufgebracht werden.

Ziel des Forschungsprojektes PRO-CFK war es, für die Fertigung eines Rumpfschalensegments einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu erreichen. Da der Fokus auf dem Ablegen und der Handhabung textiler Halbzeuge lag, wurde der in Abbildung 10 dargestellte Rollgreifer für das Ablegen großer Textilien von der Rolle auf die Positivform einer Rumpfschale entwickelt.

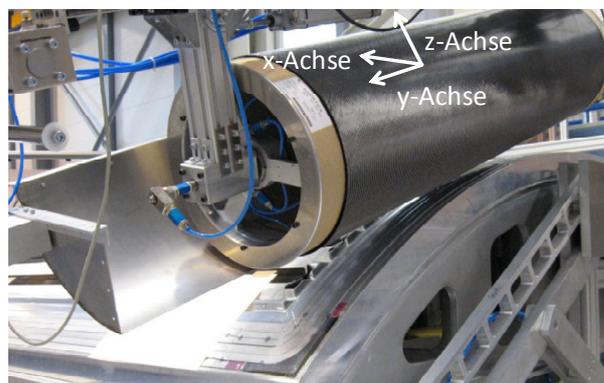


Abbildung 10: Rollgreifer zum automatisierten Ablegen von Textilrollen auf eine Rumpfschale (MÜLLER 2007)

Der Greifer ist in der Lage, Halbzeugrollen mit variierender Breite und Außendurchmesser aufzunehmen. Beim Ablegen auf einer konvex gekrümmten Oberfläche kann der Greifer durch Schwenken um die x-Achse und Rotieren um die z-Achse die Position der Halbzeugrolle an der Oberflächenkontur ausrichten. Die anschließende Abrollbewegung des Greifers entlang dieser Kontur wird von einem Portalroboter sowie von einem Rollenantrieb ausgeführt (MÜLLER 2007, PIEPENBROCK 2007).

Für das automatisierte Drapieren eines PKW-Dachteils werden die einzelnen Zuschnitte mit dem in Abbildung 20 vorgestellten Endeffektor im Formwerkzeug abgelegt. Um die Lagen miteinander zu verbinden, wird durch eine Auftragseinheit eine geringe Klebstoffmenge aufgebracht und anschließend die nachfolgende Schicht abgelegt. Mit Hilfe der Andrückrollen des entwickelten Doppelendeffektors (DEE) werden die Schichten in die Form drapiert. Abhängig von der zu drapierenden Geometrie wird für ebene Flächen eine zylindrische Rolle (siehe Abbildung 11 rechts) und für die gekrümmten Seitenflächen eine entsprechend gekrümmte Rolle verwendet (siehe Abbildung 11 links) (KORDI ET AL. 2008).

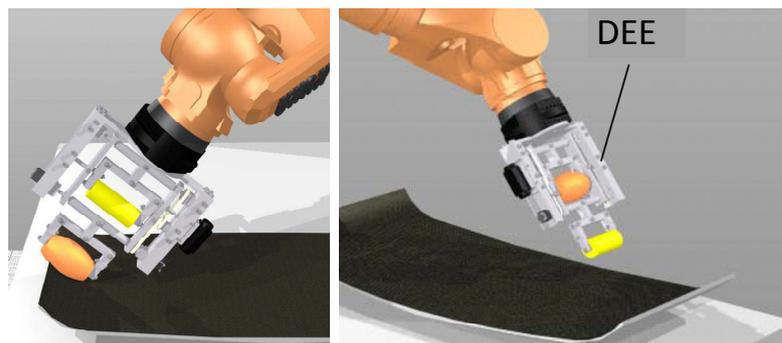


Abbildung 11: Automatisierter Drapierprozess mit unterschiedlichen Andrückrollen eines DEE (KORDI ET AL. 2008)

GÖTZ (1991) stellt in seiner Dissertation Grundlagen- und Anwendungswissen für eine automatisierte Montage flächiger Bauteile vor. Ausgehend von einer Analyse der charakteristischen Eigenschaften flächiger Bauteile wird ein Flächensauggreifer empfohlen, welcher sich an unterschiedliche Randbedingungen vielfältig anpassen kann. Im Rahmen der Arbeit werden u. a. verschiedene Anlagen zur automatisierten Montage flächiger Bauteile aufgezeigt. Exemplarisch wird ein Mattengreifer mit Vereinzelungsfähigkeit vorgestellt, bei welchem die gekrümmte Saugfläche aus Einzelsaugnapfen besteht. Für ein sicheres Vereinzeln vom Stapel müssen die meist lokal zentrierten Haftkräfte überwunden werden. Hierfür besitzt der Greifer für das erste Ablösen der Matten eine dichte

2 Situationsanalyse

Reihe hochelastischer Saugnäpfe, auf welche in der Vereinzelungsphase die volle Vakuumleistung konzentriert werden kann. Anschließend kann die Matte durch sukzessives Abrollen von dem Stapel abgeschält werden. Für die Handhabung von äußerst biegeweichen und dünnen Folien stellt GÖTZ (1991) einen trommelförmig ausgestalteten Niederdruckflächensauger vor. Der Greifer, an dessen zylindrischer Umfangsfläche Sauglöcher angebracht sind, kann die Folie in einer Abrollbewegung greifen. Um einen ausreichenden Differenzdruck Δp sicherzustellen, wird der Volumenstrom \dot{V} gezielt auf Längskammern im Inneren des Greifers aufgeteilt. Durch eine entsprechende Drosselung der Saugleitung erhält immer die gerade greifende Längskammer den Hauptanteil des Volumenstroms und einen nicht unterschreitbaren Differenzdruck. Für eine Erhöhung der Positionstoleranz empfiehlt GÖTZ (1991) eine durchlässige, elastische Schaumstoffschicht zur Verkleidung der Greiffläche.

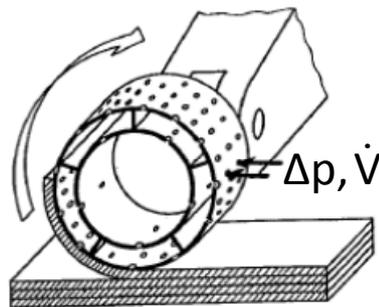


Abbildung 12: Aufbau eines trommelförmigen Flächensauggreifers (GÖTZ 1991)

MASEY & CALDWELL (2007) setzen ebenfalls ein abrollendes Handhabungssystem ein, um gekochte Lasagne-Scheiben aufzunehmen und in einem entsprechenden Behälter abzulegen. Schwierigkeiten bereiten hierbei die klebrige und formlabile Beschaffenheit der gekochten Lasagne-Scheiben sowie deren Positionierung im Behälter. Hierfür wurde ein Greifer entwickelt, welcher die gekochte Scheibe mit Hilfe einer Blende vom Förderband abschält und anschließend über eine abrollende Bewegung aufnimmt, so dass das andere Ende der Lasagne-Scheibe frei herunterhängt und zum Behälter transportiert werden kann (siehe Abbildung 13, links). Um die Lasagne-Scheibe im Behälter abzulegen, wird das freihängende Ende bis zum Behälterboden abgelassen. Durch die Bewegung des Greifers mit der Geschwindigkeit v und der Winkelgeschwindigkeit ω kann die gekochte Scheibe anschließend eingelegt werden (siehe Abbildung 13, rechts).

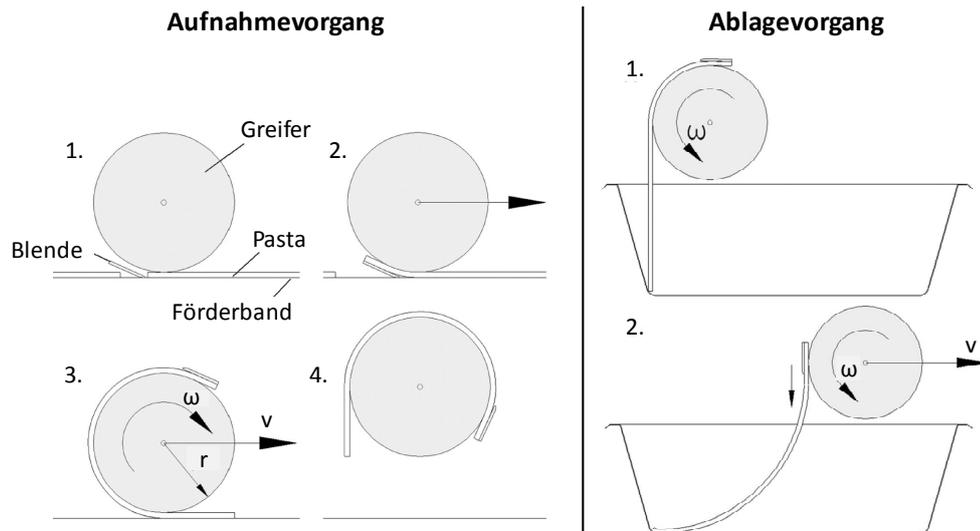


Abbildung 13: Bewegungsablauf eines Rollgreifers zum Aufnehmen von gekochten Lasagne-Scheiben (MASEY & CALDWELL 2007)

2.2.3.3 Systeme zur dreidimensionalen Verformung und Montage von formlabilen Bauteilen

Die Montage ist aus den Funktionen „Handhaben“, „Fügen“ und „Kontrollieren“ zusammengesetzt und kann als Zusammenbau von Körpern und formlosem Stoff definiert werden (GUTSCHE 1993, PETERSEN 2003, SPUR & STÖFERLE 1983, VDI 2860). Hierbei können bei der vorherrschenden Vielfalt an Montageaufgaben die realisierten Handhabungsfunktionen unterschiedliche Ausprägungen aufweisen. Insbesondere das Positionieren und Orientieren sind als Teilfunktionen des Handhabens von Bedeutung, da sie für eine dreidimensionale Verformung und Montage formlabiler Bauteile eine Herausforderung bei der technischen Realisierung darstellen. Eine dreidimensionale Verformung des formlabilen Bauteils kann entweder passiv durch das Andrücken einer elastischen Schicht oder aktiv durch den Einsatz von Aktorik und Kinematikeinheiten erreicht werden. Das Fügen ist nach DIN 8593 als das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken definiert. Für eine dreidimensionale Montage von formlabilen Bauteilen kann der Fügeprozess je nach Anwendungsfall individuell gestaltet werden. Für den betrachteten Preforming-Prozess entspricht das Fügen dem Aufschmelzen des Bindervlieses zur Fixierung der Lagen im Preformaufbau.

Beispiele für eine passive Verformung

Das Duroplast-Kontur-Tapelegen bezeichnet das Ablegen von Bändern, welche aus vorimprägnierten unidirektionalen Fasern bestehen und auf der Ober- und Unterseite mit einer Schutzfolie versehen sind. Gängige Halbzeugbreiten variieren zwischen 2,5 cm und 30 cm (MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Aufgrund des großvolumigen Bauraums der eingesetzten Verlegeköpfe werden mit dieser Technik vorwiegend große Strukturen mit geringer Formkomplexität (z. B. Flügelaußenhaut) sowie vorkonfektionierte, ebene Lamine hergestellt. Um auch ein Ablegen der Bänder über nicht ebene Geometrien zu ermöglichen, wird eine segmentierte Kompaktierungsvorrichtung in den Verlegekopf integriert, welche sich flexibel an die Oberflächengeometrie anpassen kann (siehe Abbildung 14).

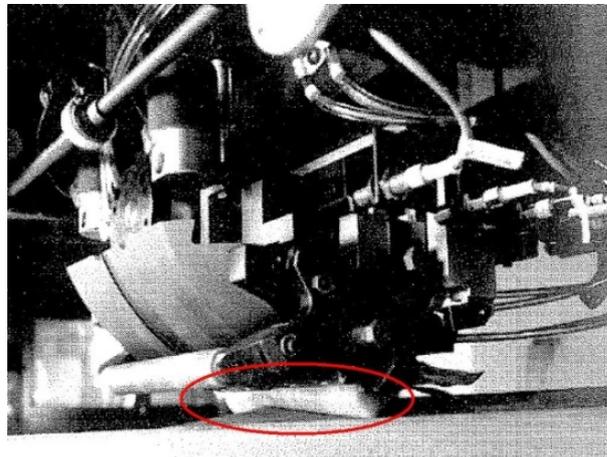


Abbildung 14: Segmentierte Kompaktierungsvorrichtung eines Duroplast-Kontur-Tapelegers (MITSCHANG & BERESHEIM 2004)

Im Zentrum der Arbeiten von MEYER (2008) steht die Entwicklung einer kostengünstigen Produktionsmöglichkeit für trockene Kohlenstofffaserpreforms mit Hilfe der Fiber-Patch-Preforming Technologie. Hierbei werden einzelne Faserpatches zugeschnitten, mit einem Vakuumfließband vereinzelt und anschließend berührungslos an den Ablegestempel einer Legevorrichtung übergeben. Der Stempel besteht aus thermisch und mechanisch stabilen Spezialsilikonem und integriert sowohl Ansaug- als auch Abblaskanäle. Um den thermoplastischen Binder der Patches aufzuschmelzen, befindet sich auf der Unterseite des Stempels eine Kohlenstofffaserheizung. Mit Hilfe des Stempels ist die Legevorrichtung in der Lage, die einzelnen Patches kraftflussgerecht auf dem Formwerkzeug zu fixieren (siehe Abbildung 15).

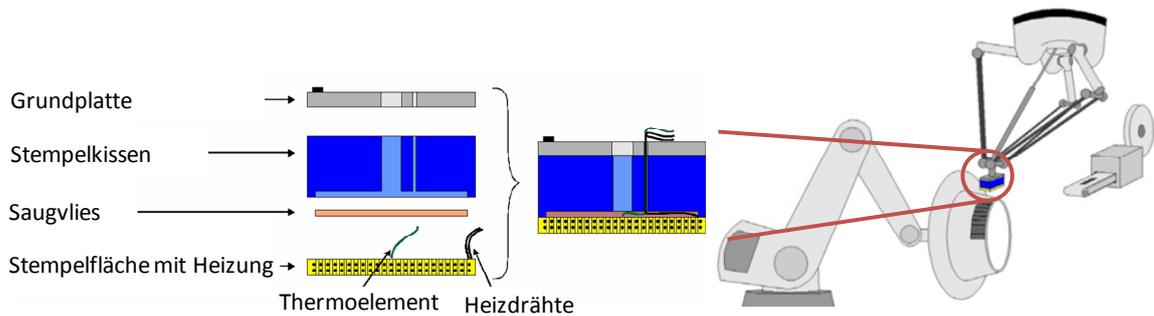


Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Ablegestempels (links) der Legevorrichtung der Fiber-Patch-Preforming Technologie (rechts) (MEYER 2008)

Zur Vereinzelung und Montage von haftkleberbeschichteten Matten auf einem gekrümmten Untergrund stellt GÖTZ (1991) ein roboterbasiertes Greifsystem vor, welches gekrümmt angeordnete und axial gelagerte Faltenbalgsaugnäpfe besitzt. Die Sauger sind in eine elastische Andruckschicht eingebettet, so dass ein höhen-tolerantes Fügen und Abstapeln der Selbstklebematten möglich ist. Durch die Krümmung der Greiffläche entsteht nicht nur eine Vereinzelungswirkung, sondern auch eine linienförmige Konzentration der lokalen Anpresskraft. Ein luftblasenfreies Anrollen der Selbstklebematten kann durch ähnliche Druckelastizitäten bei den Saugerelementen und der Schaumstoffschicht erreicht werden, so dass beim Fügen der Matte nur geringe Anpressdruckdifferenzen vorherrschen. Eine gegenüberliegende Anordnung der Greiffläche mit dazwischenliegender Vakuumversorgung ermöglicht eine kompakte Bauform sowie eine Verringerung der erreichbaren Taktzeit, da zwei Matten in einem Arbeitszyklus montiert werden können (siehe Abbildung 16).

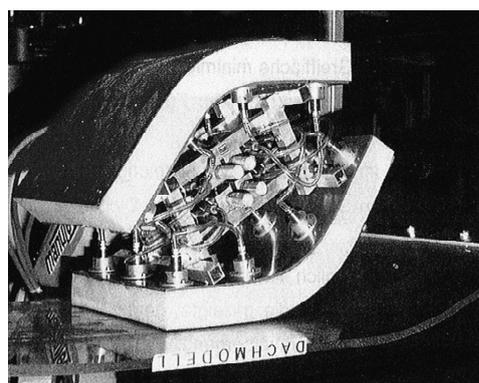


Abbildung 16: Greifer zur Montage von Selbstklebematten auf gekrümmtem Untergrund (GÖTZ 1991)

Beispiele für eine aktive Verformung

Bisher gibt es nur sehr wenige Firmen, welche Systeme für eine aktive Verformung von textilen Faserverbundhalbzeugen anbieten. Ein Beispiel hierfür ist das BREMER WERK FÜR MONTAGESYSTEME GMBH (2012), welche individuelle Automatisierungslösungen für die Handhabung und Verarbeitung von textilen Werkstoffen zum Aufbau von Faserverbund-Preforms anbietet und aufgabenspezifische Endeffektoren für verschiedenste Aufgabenstellungen der Prozesskette entwickelt. Der in Abbildung 17 dargestellte Endeffektor ist beispielsweise in der Lage, ein bereitliegendes Textil mit Hilfe von Niederdruckflächensaugern zu greifen und anschließend mittels der integrierten Kinematik aktiv zu verformen und auf ein dreidimensionales Formwerkzeug positionsgenau abzulegen.

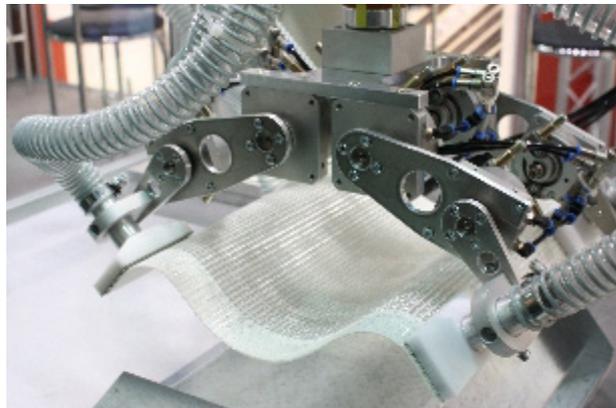


Abbildung 17: System zur dreidimensionalen Verformung von technischen Textilien (BREMER WERK FÜR MONTAGESYSTEME GMBH 2012)

Ziel des Forschungsprojektes „KITE hyLITE“ war die seriennahe Herstellung von Bauteilen, welche aus unidirektional verstärkten Einlegeelementen (UD-Einleger) und einer umgebenden Struktur aus langfaserverstärktem Thermoplast (LFT) bestehen. Das manuelle Ablegen des UD-Einlegers konnte durch die Entwicklung einer geeigneten Handhabungseinheit ersetzt werden. Um eine Beschädigung des UD-Einlegers während des Ablegevorgangs zu verhindern, wurden die Drehpunkte der Kinematikeinheit in die neutrale Faser des Einlegers gelegt, so dass eine Verschiebung der Greifpunkte während der Verformung verhindert wird (KÖHLER ET AL. 2009). Der Ablauf der Verformung sowie eine Darstellung der Greifeinheit ist in Abbildung 18 zu sehen.

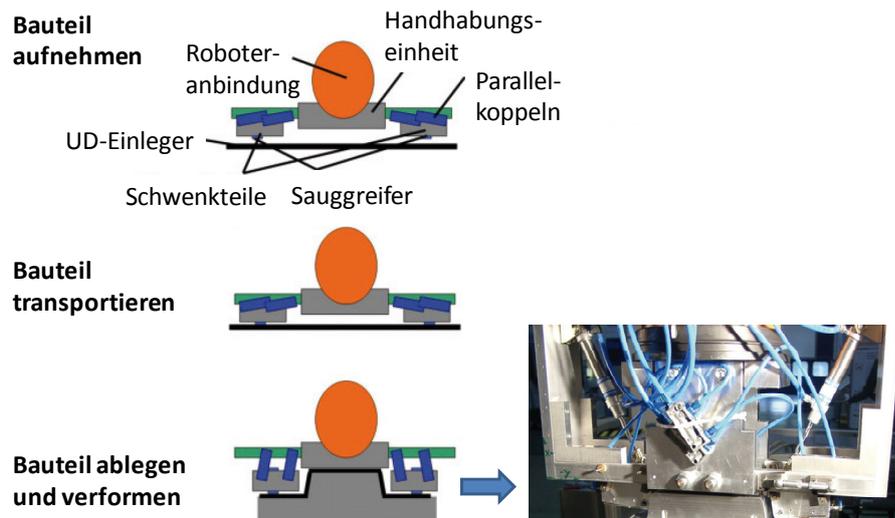


Abbildung 18: Handhabungseinheit zur Platzierung eines biegeschlaffen UD-Einlegers (KÖHLER ET AL. 2009)

Im Rahmen eines sogenannten „Multi-Step Preforming“-Prozesses werden in GREB ET AL. (2010) und GREB ET AL. (2011) Multiaxialgelege und Flechtbauteile in automatisierten Prozessketten zu endkonturnahen Preforms weiterverarbeitet. Hierfür wird u. a. ein robotergeführtes Handhabungswerkzeug eingesetzt, an welchem Nadelgreifer an verfahrbaren Teleskopprofilen angebracht sind. Der funktionale Aufbau des Greifers ermöglicht schnelle und reproduzierbare Pick&Place-Operationen, um den Einlegevorgang einer Glasfasermatte in ein konkav gekrümmtes Formwerkzeug zu automatisieren. Der Bewegungsablauf des Handhabungswerkzeuges ist in Abbildung 19 dargestellt. Eine integrierte Charge Coupled Device (CCD)- Kamera dient dabei zur Qualitätssicherung und Positionierung der Zuschnitte.

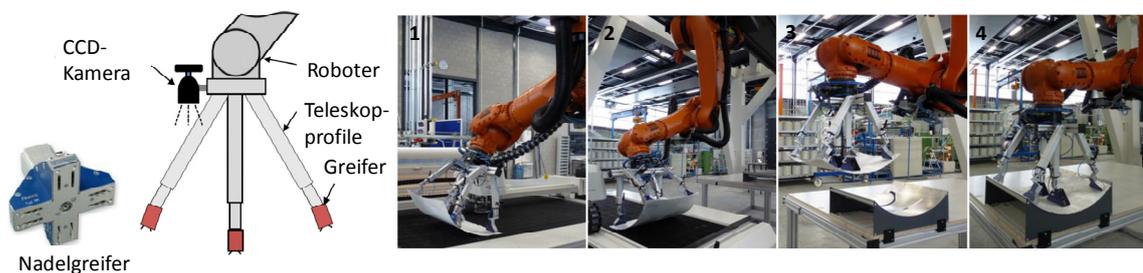


Abbildung 19: Aufbau des Handhabungsendeffektors und Prozessabfolge beim Ablegen einer Glasfasermatte (GREB ET AL. 2011)

KORDI (2009) stellt ein adaptives Greifsystem vor, welches aus einem Rahmen mit integrierter Verstellmechanik und austauschbaren Greifern besteht. Die Form des gegriffenen Textils kann dabei an die Geometrie des Formwerkzeuges

2 Situationsanalyse

angenähert werden, indem die äußeren Greifer relativ zu den inneren Greifern angehoben bzw. abgesenkt werden. Damit ist es möglich, verschiedene Formwerkzeugegeometrien, welche in drei Gruppen eingeteilt werden können (siehe Tabelle 1), nachzubilden. Zusätzlich sind die Greifwerkzeuge des Greifsystems schwenkbar gelagert, um sich beim Absetzen passiv an der Oberfläche des Formwerkzeuges ausrichten zu können. Die Verformung des adaptiven Greifsystems auf einer konkav gekrümmten sowie auf einer konvex geknickten Oberfläche ist in Abbildung 20 zu sehen.

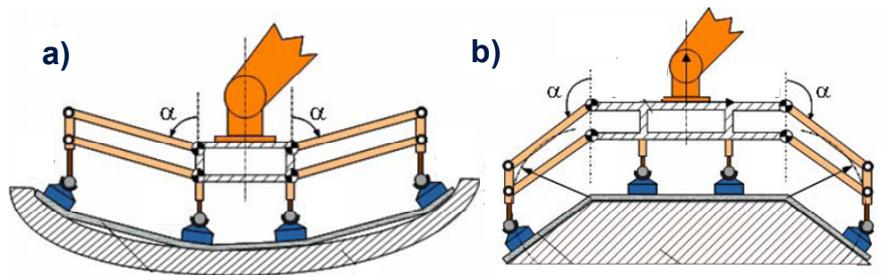


Abbildung 20: Adaptives Greifsystem während des Ablegevorgangs auf einer konkav gekrümmten (a) und konvex geknickten (b) Fläche (KORDI 2009)

Durch die bei den Validierungsversuchen eingesetzten Gefriergreifer ist eine schädigungsfreie Handhabung des Faserhalbzeugs möglich, wobei die Greifparameter jedoch stark von den Umgebungsbedingungen (z. B. Luftfeuchtigkeit, Raumtemperatur) abhängen. Nach der Textilablage durch das Greifsystem auf dem Referenzbauteil kommt für den Drapiervorgang ein Doppelwerkzeugwechsler zum Einsatz, welcher eine zylindrische und eine gekrümmte Andrückrolle integriert (siehe Abbildung 11).

In BRECHER & EMONTS (2011) wird ein neuartiges Greif- und Ablagesystem für Faserverbundhalbzeuge vorgestellt, welches den sogenannten Finray-Effekt ausnutzt, um sich verschiedenen komplexen Formen anzupassen. Der Finray-Effekt basiert auf dem biologischen Vorbild einer Fischflosse und ermöglicht bei Aufbringung einer externen Kraft eine hohe Beweglichkeit und damit eine flexible Anpassung an komplexe Formen (EBERT ET AL. 2008). Durch die Realisierung einer Finray-Gliedkette kann sich das in Abbildung 21 dargestellte Greifsystem flexibel an ein Bauteilspektrum, welches dem in Tabelle 1 ähnelt, anpassen. Für die Handhabung der Textilien können unterschiedliche Greifer in das System integriert werden.

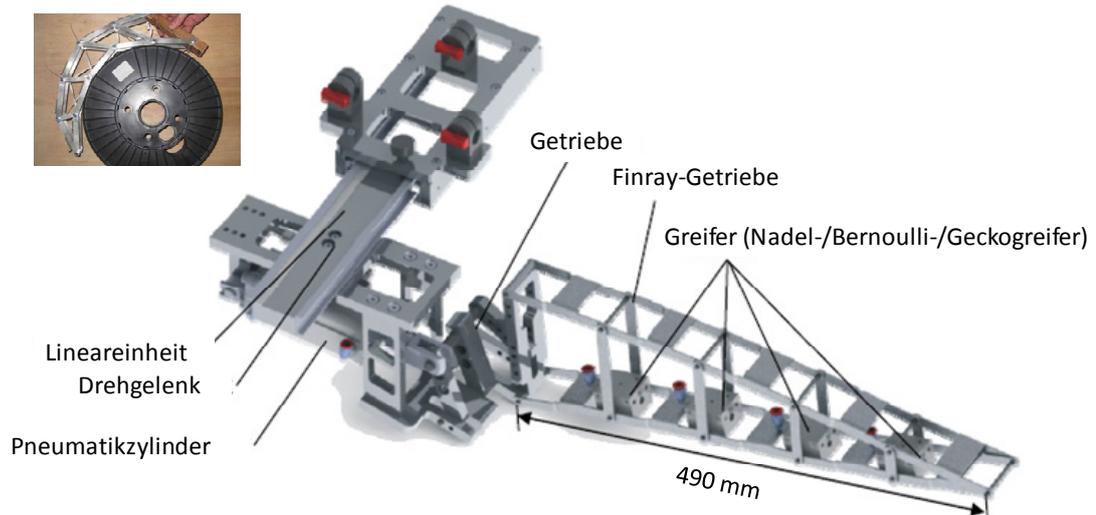


Abbildung 21: Finray-Greifsystem zur dreidimensionalen Ablage von Faserhalbzeugen (BRECHER & EMONTS 2011)

In SCHUTZRECHT DE 10152232 A1 wird eine Vorrichtung zum automatisierten Handhaben von konturvarianten Harzmatten beschrieben. Der vorgestellte Sauggreifer besteht aus matrixartig angeordneten Saugglocken, welche jeweils einzeln mit Vakuum beaufschlagt und über Hubzylinder höhenverstellbar angesteuert werden. Neben einem konturvarianten Aufnehmen der Matten ermöglicht der Aufbau ein Ablegen der Harzmatten auf einer gestuften Stapelvorrichtung. Hierzu wird eine Ausführungsvariante ohne Umgreifen und eine Ausführungsvariante mit Umgreifen unter Einsatz eines leistenförmigen Einformungswerkzeuges zum Drapieren der innenliegenden Kante vorgestellt.

Ein ähnliches Funktionsprinzip kommt in der in BRECHER & EMONTS (2011) vorgestellten Matrixgreiferkinematik zum Einsatz. Der Greifer besteht aus neun rasterförmig angeordneten Achsen, welche mit Hilfe von Antrieben einzeln verstellt werden können. Die einzelnen Achsen können dabei mit austauschbaren Standardgreifern bestückt werden. Um das Textil aufzunehmen, wird zur Ermittlung der erforderlichen Achsabstände und Aufnahmeposition das Formwerkzeug mit Hilfe von Laserabstandssensoren vermessen. Eine Regelung des Verfahrensalgorithmus der neun angetriebenen Achsen sorgt für ein faltenfreies Ablegen der Zuschnitte auf verschiedenen dreidimensionalen Formwerkzeugen (siehe Abbildung 22).

2 Situationsanalyse

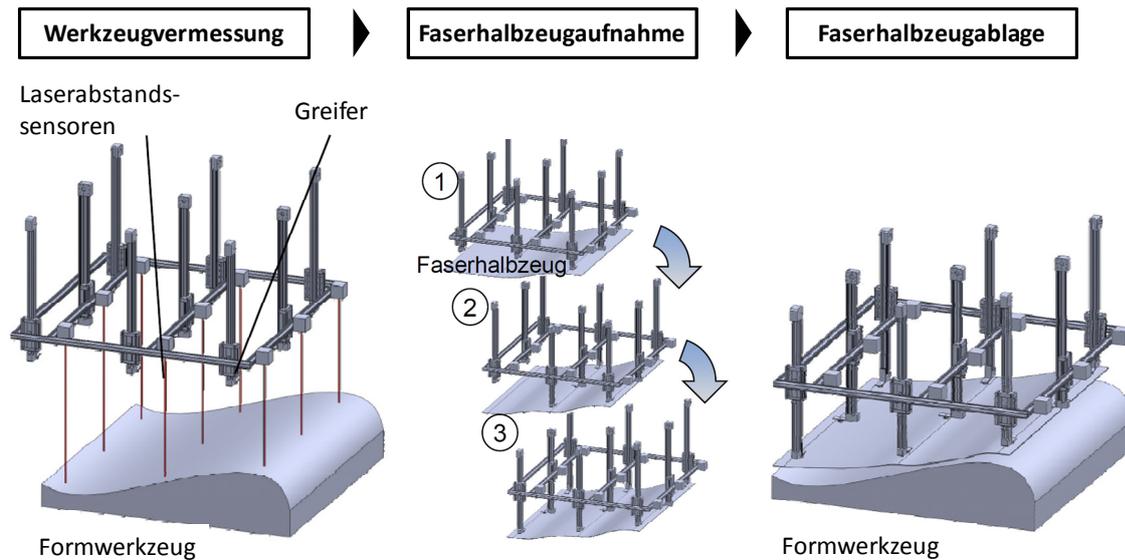


Abbildung 22: Matrixgreiferkinematik mit Laserabstandssensoren und einstellbaren Achsabständen (BRECHER & EMONTS 2011)

Um variierende Freiformflächen anzunähern, kommen auch in zahlreichen anderen Anwendungen matrixförmig angeordnete Stempel zum Einsatz, wobei die Stempelhöhe variabel eingestellt werden kann. Die technische Ausgestaltung der Stempel sowie der Einstellmechanismus unterscheiden sich hierbei je nach Anwendungsfall stark. Zur Realisierung eines formflexiblen Werkzeuges für das Spritzgießen verwendet HAGEMANN (2009) beispielsweise ein Nadelkissen. Das Einprägen einer Kavität erfolgt mit Hilfe einer Einstelleinheit, die jede einzelne Nadel in eine definierte Position verschieben kann. In SCHUTZRECHT DE 1003023 A1 wird eine Vorrichtung beschrieben, deren Stempel unabhängig voneinander vertikal verstellbar sind und über Arretierungseinrichtungen fixiert werden können.

Zur Herstellung von CFK-Rahmenstrukturen stellt HERKT (2009) eine roboterbaute Drapiereinheit vor. Die CFK-Bänder der Zuführeinheit werden zunächst zur Aktivierung des Binders erwärmt und anschließend durch Rollenmechanismen dreidimensional verformt. Ein integriertes Ultraschall-Schneidsystem schneidet das zugeführte CFK-Band abschließend in der richtigen Länge ab. Ein ähnliches Konzept zum kontinuierlichen Preformen von Profilen findet sich in FRAUENHOFER ET AL. (2007). Durch die induktive Erwärmung der bebinderten Halbzeuge mit Hilfe eines Induktorgates können Heizraten erzielt werden, welche bis zu $40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ betragen und somit zu einer wesentlichen Reduzierung der Prozesszeit führen. Die volumetrische Wirkungsweise der induktiven Erwär-

mung führt zudem zu einer homogenen Erwärmung des Binders (siehe Abbildung 23) (MAHRHOLZ ET AL. 2008).

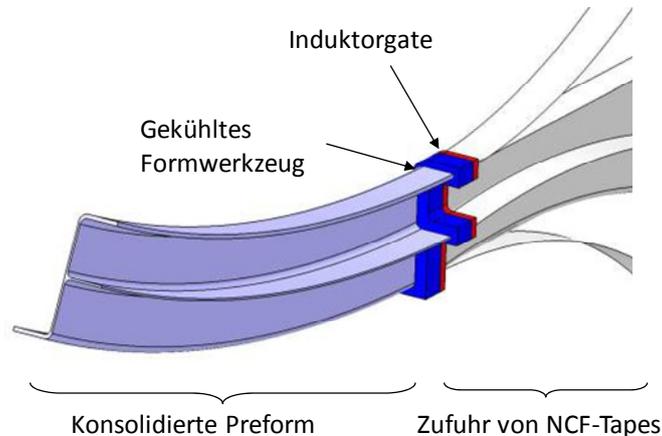


Abbildung 23: Induktives Preformen eines Profils (FRAUENHOFER ET AL. 2007)

2.2.4 Planungswerkzeuge und -methoden für die Montage von formlabilen Bauteilen

Die Softwareumgebung FiberSIM unterstützt die einzelnen Schritte des Entwicklungsprozesses für die Bauteilkonstruktion und Fertigung von Verbundwerkstoffprodukten. Die Integration in CAD-Systeme ermöglicht eine vollständig digitale Produktdefinition. Zum Umfang der Entwicklungssoftware zählen u. a. die Laminatdefinition, die Erstellung von Laminatgeometrien sowie die Simulation des textilen Verformungsprozesses. Anschließend erfolgt die automatische Generierung der notwendigen Fertigungsdaten. Hierzu zählen beispielsweise die Erstellung der Abwicklungsgeometrie der definierten Lagen und die automatische Erzeugung der Daten für Schneidsysteme sowie für vorhandene Laserprojektionssysteme, welche den manuellen Drapierprozess unterstützen. Für die Dokumentation des Herstellungsprozesses können mit Hilfe der Software sogenannte Legehandbücher und Fertigungsanweisungen erstellt werden (VISTAGY 2009). Eine Alternative zu FiberSIM stellt beispielsweise die Softwarelösung PAM-FORM dar, welche einen ähnlichen Funktionsumfang besitzt.

Im Anschluss an die Bauteilkonstruktion und Definition des Herstellprozesses erfolgt die Planung des Montageprozesses. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Methoden, welche die Planung automatisierter Montagesysteme fokussieren (SCHNEIDER 1999, DIESS 1988, SCHMIDT 1992, CUIPER 2000). Bei HOBMANN (1992) werden Zusammenhänge zwischen Produktgestaltung und möglichen Automatisierungslösungen beschrieben, wobei sicherzustellen ist,

dass bereits in der Konstruktionsphase Möglichkeiten einer automatisierten Montage berücksichtigt werden. Hierfür muss die Konstruktion von Produkt und Montagewerkzeug insbesondere bei der Festlegung der Fügeverfahren sowie der Grob- und Feingestaltung gleichzeitig und in wechselseitiger Abstimmung durchgeführt werden. Mit dem Ziel Rückschlüsse auf den zu erwartenden Automatisierungsaufwand und das notwendige Automatisierungskonzept zu ziehen, werden langgestreckte Bauteile anhand ihres Querschnittes, der Länge und der Änderung der Form über der Länge klassifiziert und anschließend die Auswirkungen auf Haupt- und Unterfunktionen der Handhabung erläutert. Als konkretes Anwendungsbeispiel der vorgestellten Lösungsmethodik dient die Planung einer automatisierten Montage einer Gehäusedichtschnur.

GÖTZ (1991) befasst sich schwerpunktmäßig mit der strukturierten Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige, meist formlabile Bauteile. Der wesentliche Ansatz der vorgestellten Planungsmethode ist die problemspezifische Vorgehensstrukturierung der zugrundeliegenden Montageaufgabe. Hierfür wird ein linearisiertes Planungsvorgehen in drei Hauptschritten (1. Analyse der Bauteileigenschaften und Fügeverfahren, 2. Gestaltung der Greiftechnik, 3. Ergänzende Komponenten und Prozesse) vorgestellt, wobei zu jedem Schritt das relevante Wissen zur Verfügung gestellt werden muss. Die Analysephase kann durch problemorientierte Checklisten, die Gestaltungsphase ebenfalls durch Checklisten, aber auch durch den baukastenartigen Einsatz von modularen Funktionsbausteinen gestaltet werden. Das zur Planung von Montagesystemen notwendige Grundlagen- und Anwendungswissen wird hierfür problemspezifisch aufbereitet und wesentliche Punkte mit Hilfe von strukturierten Checklisten zugänglich gemacht. Nach erstmaligem Durchlauf der drei Hauptschritte ist die Grobplanung des Montagesystems abgeschlossen. In einem zweiten Durchlauf desselben Planungsvorgehens erfolgt dann die Feingestaltung und Abstimmung der einzelnen Funktionen und Komponenten.

GUTSCHE (1993) hingegen betrachtet gezielt die automatisierte Montage technischer Textilien. Aufbauend auf einer Bestimmung der Bauteilkenngrößen werden die Grundlagen für prozessspezifische Montagemittel erarbeitet, wobei der Schwerpunkt auf Handhabungskomponenten liegt. Das vorgestellte Modell eines automatisierten Montageprozesses ermöglicht es, Beziehungen der einzelnen Tätigkeiten sowie ihre Funktion im Montageprozess zu ermitteln. In einer Prozessanalyse werden zunächst Eingangs- und Kenngrößen erfasst und auf Basis dieser Ergebnisse Strategien zum Greifen, Vereinzeln, Fügen und Kontrollieren für einen automatisierten Montageprozess erarbeitet. Die anschließende

Ableitung des Prozessmodells bildet die Grundlage für die Planung der Prozess- und Betriebsmittelgestaltung, bei der auf bestehende Planungsmethoden (GÖTZ 1991, VAN BRUSSEL 1990, VDI 2221) zurückgegriffen wird. Näher untersucht wird vor allem das Greifen von Textilien mit Hilfe von Kratzen und Nadeln, für die die geometrischen und technologischen Kenngrößen zur Auslegung der Endeffektoren ermittelt werden. Die Zusammenhänge zwischen Einstell- und Prozessparametern beim Handhaben, Fügen und Kontrollieren werden experimentell mit Hilfe einer roboterintegrierten Montagezelle für technische Textilien aufgezeigt. Die Montageplanung von Luftsäcken verdeutlicht beispielhaft die erarbeiteten Grundlagen der einzelnen Planungsphasen.

Die Weiterentwicklung der zum Preforming notwendigen Einzeltechnologien sowie die Ableitung einer Methode zur Gestaltung und Bewertung von mehrstufigen Preforming-Prozessen stellen die Schwerpunkte von GRUNDMANN (2009) dar. Für den mehrstufigen Preforming-Prozess werden zunächst die Prozessmodule Halbzeugherstellung, Zuschnitt, Handhabung, Qualitätssicherung sowie Fügen/Fixieren definiert. Für jedes Prozessmodul werden bestehende und neu entwickelte Einzeltechnologien in einem Preformcenter experimentell untersucht und somit eine Entscheidungsbasis innerhalb der Module generiert. Die entwickelte Methode zur Prozesskettenfindung umfasst vier Stufen. Die erste Stufe „Schaffung einer Entscheidungsbasis“ umfasst die Recherche aller zur Verfügung stehenden Technologien. Im folgenden Schritt „Verknüpfung der Prozessmodule“ werden die definierten Prozessmodule zu einer Prozesskette verknüpft, wobei es wichtig ist, möglichst viele Alternativen zu generieren. Im dritten Schritt „Entwicklung von Technologieketten“ werden die für einen konkreten Fertigungsauftrag relevanten Technologien durch Negativauswahl eingegrenzt, mit Hilfe eines morphologischen Kastens zu Technologieketten verknüpft und abschließend bewertet. Die vierte Stufe „Entwicklung von Fertigungsfolgen“ beinhaltet die Auswahl der notwendigen Produktionsmittel, die Planung der Fertigungsstruktur und der vollständigen Prozesskette sowie die abschließende Bewertung der Prozesskette mit Hilfe des entwickelten Softwaretools „EcoPreform“.

Um die zu erwartenden Kosten beim Einsatz einer FVK-Technologie transparent zu machen und somit eine objektive Entscheidungsbasis für Investitionsentscheidungen zu erzeugen, wird in SCHLIMBACH (2006) ein Berechnungstool zur Kostenanalyse vorgestellt. Im Rahmen einer ökonomischen Prozessanalyse werden zunächst die einzelnen Verfahren in technische Prozesse mit identifizierbaren Kostenpositionen aufgeteilt. Die anschließende Zykluszeitmodellierung erfolgt

allein mit Hilfe von physikalischen Prozessparametern. Auf Basis der ökonomischen Prozessanalyse sowie der Zykluszeitanalyse wird ein Softwaretool für die Berechnung der Herstellkosten für FVK-Verfahren entwickelt und die Funktionsweise anhand von zwei Fallbeispielen aufgezeigt.

2.2.5 Realisierung einer durchgängigen Prozesskette

Kommt bei der Bauteilentwicklung eine sequentielle Vorgehensweise zum Einsatz, so werden nach nur 5% Entwicklungsfortschritt bereits 70% der Herstellkosten bestimmt. Im Gegensatz dazu kommt der simultanen Einbindung aller Disziplinen in den Entwicklungsprozess zukünftig eine entscheidende Bedeutung zu. Hierunter fallen u. a. die Teilaspekte Materialauswahl, Auswahl des Fertigungsverfahrens, Prototypenherstellung sowie Serieneinführung. Der zielgerichtete Einsatz von Simulationswerkzeugen, mit denen Fertigungsschritte ohne die Verursachung von Folgekosten variabel an Modifikationen adaptiert werden können, schafft hierbei entscheidende Entwicklungsvorteile, da der komplette Fertigungsprozess virtuell abgesichert werden kann (KLEINEBERG ET AL. 2000). Ziel ist die Realisierung einer durchgehend digitalen Prozesskette nach dem Vorbild der Automobilindustrie, mit welcher sich um bis zu 80% verkürzte Inbetriebnahmezeiten erreichen lassen (KREBS 2010A). Bestehende Simulationen in der Composite-Prozesskette befassen sich derzeit vor allem mit der Halbzeugstruktur, dem Drapierverhalten, der LCM-Simulation der Fließfront, der Aushärte- und Verzugssimulation sowie der strukturmechanischen Bauteilsimulation (HINTERHÖLZL 2010), so dass für die Entwicklung und Auslegung von Faserverbund-Bauteilen zahlreiche Software-Werkzeuge verfügbar sind. Für die nachfolgende Planung des Fertigungsprozesses hingegen dominieren singuläre Insellösungen den Markt. Ziel ist es daher, neben dem Bauteildesign auch den Herstellungsprozess in einer durchgängigen digitalen Prozesskette unter Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis darzustellen (KREBS 2010B).

Vor diesem Hintergrund befasste sich das Forschungsprojekt Pro-Preform RTM mit der Erarbeitung eines durchgängigen Gesamtprozesses zur Herstellung von Vorformlingen für die RTM-Fertigung. Hierbei galt es insbesondere die Lücke zwischen Bauteilkonstruktion und bestehender Fertigungstechnik zu schließen. Die Durchgängigkeit der CAD-Daten über die Konstruktion, Bauteilauslegung, Gewinnung von Produktionsdaten bis hin zur Qualitätssicherung war daher ein zentraler Bestandteil des Forschungsprojektes. Im Zuge dessen wurde die Software PreformCAD entwickelt, welche die Schnittstelle zwischen dem Bauteildesign, dem eingesetzten Cutter und der Nähanlage bildet. Hierbei können die in

CAD-Systemen konstruierten Näh- und Schneidlinien importiert und mit notwendigen prozess- und qualitätsrelevanten Attributen versehen werden. Die weiterverarbeiteten Daten werden anschließend an die CNC-Steuerungen der Näh- und Schneidanlage exportiert (MITSCHANG 2004).

Ziel des Forschungsprojektes Redux war die Industrialisierung der robotergetriebenen Näh- und Schneidetechnik durch die Realisierung einer durchgängigen Prozesskette vom CAD-Modell bis hin zur Fertigung. Die im CAD-System definierten Nahtbahnen dienen als Eingangsgrößen für die Offline-Programmierung des Roboters und die Einstellung der benötigten Roboterparameter. Nach der Durchführung von Kollisionsuntersuchungen können automatisch die entsprechenden Roboternähprogramme generiert werden. Eine laterale und vertikale Bahnkorrektur erfolgt mit Hilfe der im Nähkopf integrierten Sensorik, welche die Differenz zwischen der Soll- und der Ist-Nahtbahn erkennt. Zur Qualitätssicherung der Preform überprüft und dokumentiert ein speziell entwickelter Sensor die angefertigte Naht, deren Position sowie die Verzerrung des vernähten Materials (STEINHILBER 2009).

Im Rahmen des Forschungsprojektes CFK-*Tex* wurde für den in Abbildung 8 dargestellten Endeffektor die Automatisierungssoftware CFK*Tex*.Office zur Darstellung einer durchgängigen Prozesskette vom Schneidprozess bis hin zum Absortier- und Einlagerungsprozess entwickelt. Die Software ermöglicht die Koordination aller beteiligten Komponenten der Produktionsumgebung, welche für einen automatisierten Absortierprozess eng aufeinander abgestimmt sein müssen. Zu den involvierten Subsystemen des CFK*Tex*.Office gehören eine Nesting-Software, ein industrieller Schneidisch, ein Inspektionssystem, eine Lagermöglichkeit, ein Absortierwerkzeug sowie dessen kinematische Anbindung (z. B. Industrieroboter). Als Nutzer der Software ist zum einen der Anwender „Engineer“ vorgesehen, welcher die Zuschnittaufgabe plant und das verwendete Material auswählt. Der Anwender „Arbeiter“ hingegen startet hinterlegte Schneidaufgaben und überwacht den Prozess. Nach dem Zuschnitt der Textilien und dem anschließenden Transport in den Absortierbereich werden die Saugkonfiguration und die Absortierposition des Endeffektors automatisch berechnet und bei Bedarf die passende Anzahl an Lagerfächern für die Ablage der gegriffenen Textilien angefordert (ANGERER ET AL. 2010).

KREBS (2010B) verwendet die Software DELMIA Robotics von Dassault Systèmes, um die Versuchsumgebung mit allen prozess- und kollisionsrelevanten Bestandteilen (z. B. Roboter, Formwerkzeug und Endeffektor) in der virtuellen

2 Situationsanalyse

Realität nachzubilden. Die Lageninformationen, welche in der Software CATIA V5 Composites Design generiert werden, können mit der Roboter-Simulation in DELMIA mit Hilfe eines Softwaremoduls verknüpft werden. Dieses Softwaremodul ermöglicht die Planung und das Generieren von Aufnahme-, Transport- und Ablegebahnen für den entwickelten Endeffektor (siehe Abbildung 24).

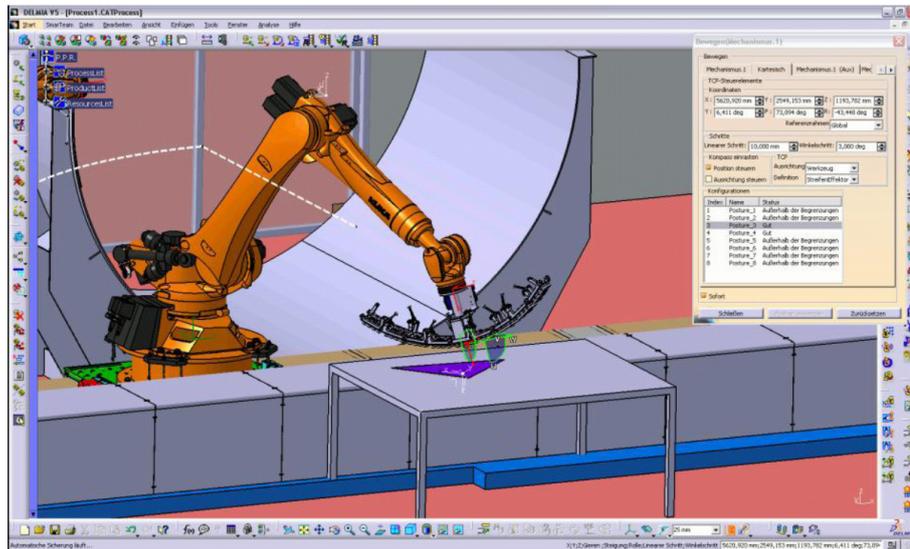


Abbildung 24: Softwaremodul in DELMIA V5 zur Bahnplanung (KREBS 2010B)

Bei Tapelegeverfahren kann der Tapelegekopf in Abhängigkeit von der Größe und Komplexität der Bauteile an verschiedenen Trägersystemen (z. B. Mehrachsroboter, Portalsystem) angebracht sein (AVK 2010). Die Firma MAG IAS (2011) beispielsweise liefert Produktionsanlagen für verschiedene Branchen wie z. B. Windkraft, Automobil und Luft- und Raumfahrt. Die entwickelte Software Advanced Composites Environment Suite (ACES) dient zur Offline-Programmierung, Anlagensimulation und Abschätzung der Maschinenauslastung und ist kompatibel mit verschiedenen CATIA-Versionen und der Software FiberSIM (siehe Abbildung 25).

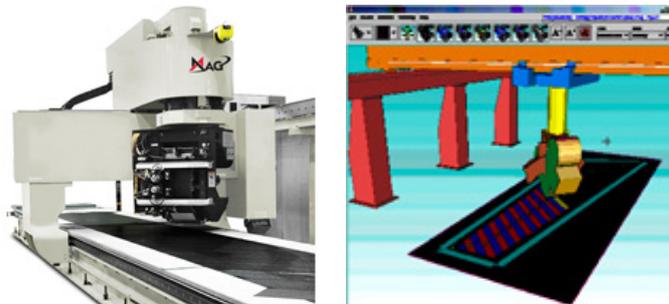


Abbildung 25: Tapelegeportalanlage (links) und Softwareumgebung ACES (rechts) (MAG IAS 2011)

Die Firma CORIOLIS COMPOSITES (2011) entwickelte einen leichten Roboterkopf zur Faserablage, welcher für komplexe Bauteilstrukturen und zur Abdeckung eines größeren Bewegungsbereiches geeignet ist. Zur Definition von Bewegungskurven und Festlegung von Legeparametern wird hierbei die Software CAT-Fiber verwendet (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Roboter mit Legekopf zur Faserablage (CORIOLIS COMPOSITES 2011)

2.2.6 Fazit

Im Hinblick auf die in Kapitel 1.3 dargestellte Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sowie die identifizierten Automatisierungshemmnisse (siehe Kapitel 2.1) wurde der Stand der Forschung und Technik analysiert. Eine zusammenfassende Bewertung der wichtigsten Rechercheergebnisse ist in Tabelle 2 aufgezeigt.

Bei der bestehenden Vielzahl an Klassifikationssystemen fällt auf, dass diese entweder sehr allgemein gehalten sind oder sich auf bestimmte Anwendungsbereiche (z. B. Umformtechnik) fokussieren. Teilweise wird hierbei bereits ein Bezug zum Fertigungsverfahren und Fertigungsaufwand hergestellt. Aufgrund der verfahrensspezifischen Eigenheiten ist ein Transfer dieser Klassifikationssysteme auf das Gebiet der FVK-Bauteile kaum möglich. Im Projekt Autopreforms erfolgt erstmals eine rudimentäre geometrische Einteilung von automatisiert herstellbaren CFK-Bauteilen. Ein detaillierter Bezug zwischen den geometrischen Eigenschaften des Lagenaufbaus und der Automatisierungslösung wird jedoch nicht hergestellt.

Die dargestellten Möglichkeiten zur Handhabung und Montage von formlabilen Bauteilen zeigen, dass unterschiedlichste Ausführungsvarianten verfügbar sind. Dabei handelt es sich meist um dem jeweiligen Anwendungsszenario angepasste Speziallösungen für 2D- bzw. 2,5D-Bauteile, welche den Herausforderungen der Preformherstellung (siehe Kapitel 2.1) nur eingeschränkt gerecht werden.

Desweiteren finden sich kaum Hinweise oder Richtlinien zur anwendungsspezifischen Auswahl und Auslegung der Systeme. Insbesondere eine definierte dreidimensionale Textilverformung sowie die Systemintegration der notwendigen Teilfunktionalitäten der Preformmontage sind bisher im Hinblick auf die Zielsetzung unzureichend gelöst. Vor dem Hintergrund der bestehenden Variantenvielfalt wird die Realisierung der notwendigen Systemflexibilität lediglich für das zweidimensionale Absortieren fokussiert und zufriedenstellend gelöst.

Planungswerkzeuge und -methoden bestehen für die Bauteilkonstruktion, für die Montageplanung sowie für die Kostenanalyse zur Technologieauswahl und -bewertung. Hierbei handelt es sich um singuläre, in sich geschlossene Lösungsbausteine für Teilgebiete des Entwicklungsprozesses von FVK-Bauteilen, nicht jedoch um eine ganzheitliche Betrachtungsweise, welche die einzelnen Entwicklungsschritte bei der Planung einer Automatisierungslösung für die Preformherstellung berücksichtigt und einen Bezug zwischen Anwendungsszenario und Auslegung der Automatisierungslösung herstellt.

Die Darstellung einer durchgängigen Prozesskette wurde für gewisse Herstellungsprozesse (z. B. Tapelegen, Nähverfahren) bereits erreicht. Insbesondere für sequentielle Preformingverfahren wird der Markt jedoch von singulären In-sellösungen für ausgewählte Teile des Herstellungsprozesses (z. B. Zuschneiden) dominiert. KREBS (2010B) stellt erstmals eine Offline-Bahnplanung unter Einbeziehung der spezifischen Lageninformationen vor. Offen bleiben hier jedoch die bahnsynchrone Ansteuerung sowie die Möglichkeit menschliches Erfahrungswissen und prozessspezifische Änderungen einzubringen.

Tabelle 2: Zusammenfassende Bewertung der wichtigsten Ergebnisse des Stands der Forschung und Technik

	Bauteilklassifizierung			Greif- und Montagesysteme			Planungswerkzeuge und -methoden			Automatisierte Prozesskette				
Coriolis Composites (2011)											○	●	◐	◑
MAG IAS (2011)												●	◐	◑
Krebs (2010)										●	●	○	○	
Angerer et al. (2010)										○	●	◐	○	
Schlimbach (2006)									○		○	●		
Grundmann (2009)	◐	●	○						○	○	◐	●		
Gutsche (1993)									●	●	●	◐		
Hoßmann (1991)									●	●	◐	○		
Brecher & Emonts (2011)					◐			◐						
Kordi (2009)					◐	◐		◐						
Greb et al. (2011)					◐	◐		○						
Meyer (2008)					○	○		◐						
Götz (1991)					◐	◐		◐	●	●	◐	○		
Müller (2007)					◐	◐		○						
Straßer (2012)					●	○		◐						
Apmann et al. (2010)					◐	○		○						
Schäfer (2002)	●	◐	○											
Tschätsch & Dietrich (2010)	●	◐	○											
Eberhardt (2007)	●	◐	○											
Zimmermann (1967)	◐	◐	○											
DIN 4000	○	◐	○											
Fertigungsbezug														
Analogien zu CFK-Bauteilen														
Berücksichtigung Lagenaufbau														
Varianten- und Konturvielfalt					◐									
Dreidimensionale Verformung					◐									
Funktionsintegration					◐	○								
Automatisierte Montagesysteme														
Werkzeugauswahl und -gestaltung														
Herstellung von Preforms														
Herstellung Lagenaufbau														
Durchgängigkeit														
Prozessspezifische Informationen														
Menschliches Erfahrungswissen														

2.3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Aufbauend auf der Analyse des Stands der Forschung und Technik wird die in Kapitel 1.3 dargestellte Zielsetzung weiter präzisiert.

Zur Realisierung einer Automatisierungslösung für das sequentielle Einzellagen-Preforming sind neuartige Werkzeugkonzepte notwendig, welche einen möglichst hohen Flexibilitätsgrad aufweisen. Die hohen Ansprüche hinsichtlich der enormen Variantenvielfalt müssen mit möglichst geringem Adaptionaufwand gemeistert werden. Die Entwicklung einer übertragbaren Methodik zur Realisierung derartiger Werkzeugkonzepte stellt daher einen Schwerpunkt der Arbeit dar. Einerseits müssen Wirkprinzipien für die benötigten Teilfunktionalitäten der Preformherstellung ermittelt und in die Werkzeugkonzepte integriert werden. Andererseits ist es notwendig, Möglichkeiten zu schaffen, um langjähriges menschliches Erfahrungswissen im Bereich der Fertigungsprozesse (z. B. Drapierstrategien) technisch abzubilden und Prozesse flexibel veränderbar zu gestalten. Für eine methodische Umsetzung der Automatisierungslösung ist es weiterhin dringend erforderlich, übertragbare Hinweise und Richtlinien zur Auswahl und Gestaltung eines passenden Werkzeugkonzeptes zu erarbeiten. Ziel ist es, dass dies anwendungsspezifisch, basierend auf einer systematischen Klassifizierung von FVK-Bauteilen geschehen kann. Im Gegenzug ist es aber auch notwendig, die jeweiligen Grenzen der Werkzeugkonzepte transparent darzustellen, um bereits in der Phase der Bauteilkonstruktion ein „Design for Automation“ forcieren zu können.

Für eine industrielle Akzeptanz der Werkzeugkonzepte ist es wichtig, eine durchgängige, rechnergestützte Prozesskette bei der Weiterverarbeitung relevanter Daten zu schaffen. Basierend auf den erzeugten Daten der Bauteilkonstruktion soll es möglich sein, Bewegungsabläufe vorab festzulegen, zu simulieren und bereits offline eine entsprechende Bahn mit bahnsynchronen Ansteuerbefehlen zu generieren. Eine flexible, individuelle Festlegung des Prozessablaufes sowie die Integration des menschlichen Erfahrungswissens stellen dabei besondere Herausforderungen für die Bahngenerierung und Ansteuerung des Gesamtsystems dar.

Ziel ist es weiterhin, eine exemplarische Automatisierungslösung in einer Versuchsanlage umzusetzen und deren Leistungsfähigkeit anhand eines industriellen Referenzszenarios aus der Luftfahrt zu erproben und zu bewerten. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können relevante Prozessparameter ermittelt, Zusammenhänge aufgezeigt und weitere Forschungsfelder identifiziert werden.

2.4 Systemeingrenzung

Da sowohl Materialien als auch Bauteilkomponenten und Herstellungsprozesse im Bereich der Faserverbundtechnik äußerst vielfältig sind und teilweise eine schnelllebige Entwicklung durchlaufen, ist es sinnvoll und wichtig, die Themenstellung im Vorfeld zu fokussieren und eine Systemeingrenzung vorzunehmen. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Fertigungsprozess, bei welchem einzelne Lagen zu Preforms weiterverarbeitet werden. Aufgrund der Bedeutsamkeit liegt der Fokus hierbei auf CF-Textilien, wobei die Arbeitsergebnisse auch auf andere trockene technische Halbzeuge (z. B. Glasfaser, Aramidfaser, Naturfaser etc.) übertragbar sein sollen. Von der Betrachtung ausgeschlossen sind Prepreg-Materialien, da diese sich hinsichtlich Materialverarbeitung und -eigenschaften grundlegend unterscheiden und hierfür anders gestaltete Lösungen erforderlich sind.

Für die folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass der Zuschnitt für den Drapierprozess bereits vereinzelt bereit gestellt wird. Auf vorgelagerte Prozesse wie z. B. Schneiden, Absortieren, Lagerung, Reinigung des Formwerkzeuges etc. wird somit im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Dem Preforming-Prozess nachgelagerte Arbeitsschritte (beispielsweise das Entformen der fertigen Preform oder die Erstellung eines Vakuumaufbaus) sowie wiederkehrende Zwischenarbeitsschritte (z. B. Vorkompaktierung des Lagenaufbaus) werden ebenfalls nicht betrachtet. Desweiteren werden im Rahmen der Arbeit keine Systeme entwickelt oder eingesetzt, welche die bisher rein optische Qualitätskontrolle des Werkers ersetzen. Diese Themenkomplexe würden zum einen den Rahmen der Arbeit übersteigen, zum anderen bestehen hierfür teils ausgereifte technische Lösungen. Die Ergebnisse der vorgenommenen Systemeingrenzung sind in Abbildung 27 dargestellt.

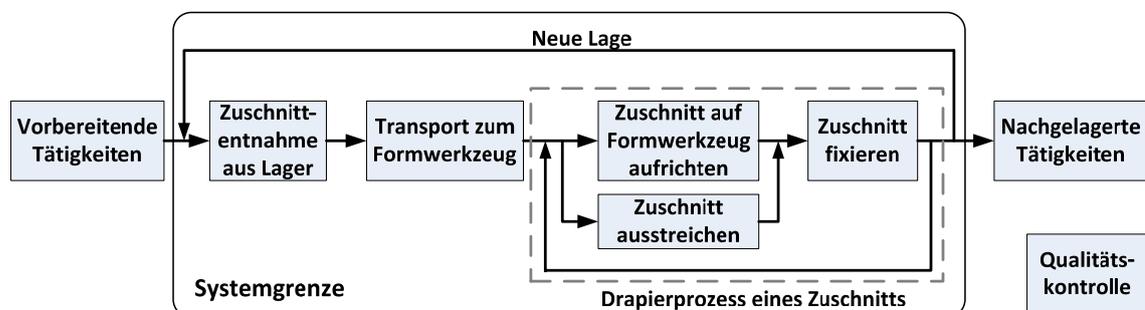


Abbildung 27: Darstellung der Systemgrenze durch Funktionsmodellierung der Teilfunktionen des manuellen Fertigungsprozesses

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

3.1 Allgemeines

Basierend auf einer Analyse des Stands der Forschung und Technik erfolgt eine systematische Klärung der Anforderungen (EHRENSPIEL 2003). Die übergeordnete Zielsetzung ist dabei ein ganzheitlicher Ansatz, welcher neben einem anwendungsspezifischen Endeffektor-Design auch die Einbindung in eine durchgängige rechnergestützte Prozesskette beinhaltet. Aus der Zielsetzung sowie den notwendigen Arbeitsschritten zur Preformherstellung lassen sich die grundlegenden Anforderungen an eine Automatisierungslösung ableiten:

- *Aufnahme von Zuschnitten*
Die zu drapierenden Zuschnitte werden auf einem Lagersystem bereit gestellt. Die Zuschnitte können hinsichtlich des zum Einsatz kommenden Materials, der Kontur und Größenausdehnung deutlich variieren. Für den anschließenden Transport zum Formwerkzeug müssen die bereitliegenden Zuschnitte konturselektiv gegriffen werden.
- *Definiertes Verformen der gegriffenen Zuschnitte*
Das gegriffene Textil muss gemäß dem definierten Lagenaufbau positionsgenau auf dem Formwerkzeug abgelegt werden. Festgelegte Legestrategien haben einen gewünschten und kalkulierten Verzug des Zuschnitts auf dem Formwerkzeug zur Folge, so dass es ggf. notwendig ist, vorgegebene Legestrategien einzuhalten. Die gegriffenen Zuschnitte müssen zerstörungsfrei und reproduzierbar auf Formwerkzeugen, welche sich hinsichtlich geometrischer Eigenschaften und Größenausdehnung stark unterscheiden können, abgelegt werden.
- *Fixierung der Zuschnitte auf dem Formwerkzeug*
Durch thermische Aktivierung eines Bindervlieses wird das Textil positionsgenau auf dem Formwerkzeug fixiert. Eine Kompaktierung des Lagenaufbaus während des Abkühlprozesses führt dabei zu einem verbesserten Drapierergebnis. Lufteinschlüsse im Lagenaufbau sind unbedingt zu vermeiden.

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

Zusätzlich lassen sich nachfolgende Anforderungen für die Realisierung einer durchgängigen Prozesskette zur Bahnplanung und Ansteuerung des Endeffektors ableiten:

- *Festlegung der Legestrategie*
Plattformunabhängig muss es möglich sein, in einer CAD-Umgebung individuell Legestrategien für einen automatisierten Prozess zu definieren. Desweiteren muss bei der Definition der Legestrategie die Möglichkeit bestehen, menschliches Erfahrungswissen einzubringen und diese bei Bedarf nachträglich ändern zu können.
- *Ableitung von Roboterbahnen*
Als Kinematikeinheit wird ein Industrieroboter favorisiert, da sich dadurch ein sehr hoher Flexibilitätsgrad erreichen lässt. Die definierten Legkurven bilden die Grundlage für die automatische Erzeugung von Roboterbahnen. Diese müssen bereits in der virtuellen Realität hinsichtlich Kollisionen und Erreichbarkeit überprüft werden.
- *Erzeugung von bahnsynchronen Ansteuersignalen*
Entlang der generierten Roboterbahn müssen Ansteuersignale ausgeführt werden, welche zu festgelegten Bahnpunkten am Endeffektor vordefinierte Aktionen auslösen. Notwendige Prozessparameter sind zu hinterlegen und bei Bedarf aufzurufen.

Da eine automatisierte Herstellung des Lagenaufbaus stets in direktem Vergleich zu manuellen Preforming-Prozessen steht, sind bei der Umsetzung einer Automatisierungslösung die gegebenen industriellen Anforderungen zu erfüllen. Um den Anspruch nach Flexibilität hinsichtlich Variantenvielfalt überprüfen zu können, kommen für die Erprobung des automatisierten Systems unterschiedliche industrielle Referenzbauteile zum Einsatz. Gemessen an einer manuellen Fertigung sind dabei technische und wirtschaftliche Mindestanforderungen zu erfüllen.

3.2 Technische Anforderungen

Der Faserverlauf sowie das Einhalten von vordefinierten Abläufen und Prozessparametern haben maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften und Qualität eines CFK-Bauteils. In speziellen Arbeitsanweisungen werden daher die technischen Anforderungen bei der Bauteilherstellung spezifiziert:

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

- *Positioniergenauigkeit*
Abweichungen gegenüber der Sollposition einer Lage haben eine direkte Auswirkung auf die Bauteilqualität, da der Kraftfluss durch den Faserverlauf und somit durch die Anordnung der Zuschnitte bestimmt wird. Auch eine Abweichung der vorgegebenen Faserorientierung beeinflusst die mechanischen Bauteilkennwerte negativ.
- *Fremdmiteleintrag*
Um unerwünschte chemische Reaktionen zu vermeiden, darf der Lagenaufbau nur mit bereits zertifizierten Hilfsstoffen in Kontakt gebracht werden. Generell gilt es, das Einbringen von Zusatzstoffen oder Fremdkörpern zu vermeiden.
- *Drapierqualität*
Auf eine hohe Drapierqualität ist zu achten, da lokale Störungen des Faserverlaufs im Verbund (z. B. Ondulationen, Änderungen der Faserorientierung, Beschädigung der Faserschichte) zu einer Verringerung der Bauteilqualität führen.
- *Verarbeitungsbedingungen*
Die vorgegebenen Umgebungsbedingungen (z. B. Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur), aber auch Prozessvorgaben (z. B. maximale Verarbeitungstemperatur, Schutz vor Kontaminationen) müssen eingehalten werden.

Neben den gegebenen technischen Anforderungen des Herstellungsprozesses muss ein automatisiertes System zusätzlich Anforderungen der nachfolgend genannten Aspekte erfüllen:

- *Sicherheit*
Zahlreiche Richtlinien und Normen regeln die Sicherheitsbestimmungen von Maschinen und Anlagen (DIN EN ISO 12100, RICHTLINIE 2006/42/EG 2006). Für den industriellen Betrieb ist die Einhaltung aller behördlichen und gesetzlichen Vorschriften zwingend erforderlich.
- *Prozessparameter*
Um die fertigungsrelevanten Prozessparameter an das Anwendungsszenario anpassen zu können, müssen diese einstellbar sein und ggf. auf den vorgegebenen Sollwert geregelt werden. Desweiteren müssen wichtige Prozessparameter kontinuierlich überwacht und dokumentiert werden.
- *Zykluszeit*
Gemessen an der manuellen Fertigungsgeschwindigkeit wird durch den automatisierten Prozess eine deutliche Verringerung der Prozesszeit

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

angestrebt, wobei die Sollvorgabe der Zykluszeit je nach Bauteil variieren kann.

Typische Kennwerte für ausgewählte technische Anforderungen sind in Anhang 10.1 aufgeführt.

3.3 Wirtschaftliche Anforderungen

Neben der Erfüllung aller technischen Anforderungen stellt die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems im industriellen Umfeld ein weiteres wichtiges Kriterium für eine Investitionsentscheidung dar (DÄUMLER & GRABE 2007).

An eine wirtschaftliche Gestaltung moderner Montagesysteme werden daher zahlreiche Anforderungen gestellt, welche die Kategorien Technologie/Organisation, ökonomische Effizienz sowie Flexibilität betreffen (FELDMANN & SLAMA 2001). Im Hinblick auf eine angestrebte automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms sollen resultierende Anforderungen der drei Kategorien näher untersucht und spezifiziert werden.

Technologie und Organisation

Aus der Technologie bzw. Organisation resultierende Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit eines Systems tangieren sowohl vorkommende Einzelkomponenten als auch deren mechatronische Einbindung und Zusammenspiel im Gesamtsystem. Um den wirtschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die eingesetzten Technologien insbesondere folgende Punkte erfüllen:

- *Modularer Aufbau*
Ein modulares Design der eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten ermöglicht es, notwendige Anpassungen schnell und aufwandsarm vornehmen zu können. Hierbei kann zwischen Individual- und Basismodulen unterschieden werden.
- *Standardisierung*
Der Einsatz von standardisierten, bereits erprobten Systemkomponenten führt zu einer Reduzierung der Kosten und der Entwicklungszeit sowie zu einer Steigerung der Anlagenverfügbarkeit.
- *Einfaches, wartungsfreundliches Design*
Um im Fehlerfall auftretende Stillstandszeiten oder notwendige Umrüstmaßnahmen so kurz wie möglich zu halten, muss ein montage- und wartungsfreundlicher Aufbau realisiert werden.

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

- *Definition von Schnittstellen*
Durch die Schaffung definierter Schnittstellen sowohl im Bereich der Hardware als auch bei Software- und Ansteuerungskomponenten ist eine schnelle und einfache Integration in die bestehende Produktionsumgebung möglich.
- *Intuitive Bedienung*
Eine intuitive Bedienung und Anwendungsprogrammierung der Automatisierungslösung führt zu einer Verkürzung der Inbetriebnahme- und Einrichtzeiten sowie zu einer Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit. Desweiteren soll das System derart gestaltet sein, dass die Mitarbeiter von zeitraubenden Routinetätigkeiten (z. B. Einteachen von Roboterbahnen) entlastet werden.
- *Robuste, verschleißarme Prozesse*
Um Stillstands- bzw. notwendige Umrüstzeiten zu vermeiden und das System möglichst langlebig zu gestalten, ist es das Ziel, die eingesetzten Funktionsprinzipien und Prozesse robust und verschleißarm zu gestalten.
- *Energie- und Ressourceneffizienz*
Für einen effizienten Anlagenbetrieb ist es erforderlich, den notwendigen Energie- und Medienverbrauch während Betriebs- und Stillstandszeiten zu minimieren. Desweiteren ist es sinnvoll, bereits den Entsorgungsprozess der Anlage bzw. eine mögliche Wiederverwendbarkeit zu bedenken.

Ökonomische Effizienz

Vor dem Hintergrund eines steigenden Rationalisierungsdrucks im globalen Wettbewerb werden hinsichtlich der ökonomischen Effizienz hohe Anforderungen an ein Montagesystem gestellt. In Bezug auf die zu entwickelnde Automatisierungslösung sind folgende Anforderungen von Relevanz:

- Schnelle Amortisation der Erstinvestitionskosten und lange Nutzungsdauer
- Hohe Systemauslastung, geringe Stillstandszeiten
- Geringe Instandhaltungs- und Betriebskosten
- Kurze Inbetriebnahme- und Rüstzeiten
- Geringe Montagezeit, Verkürzung der erreichbaren Taktzeiten
- Geringer Aufwand an notwendigen Personalkosten

Zur Bewertung der ökonomischen Effizienz und als Entscheidungsgrundlage für Investitionen stehen verschiedene Berechnungsmethoden zur Verfügung. Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Realisierungsalternativen im Vergleich zur

3 Anforderungen an eine automatisierte Montage von Faserverbund-Preforms

manuellen Fertigung kann z. B. mit Hilfe der statischen Kostenvergleichsrechnung ermittelt werden (siehe Kapitel 7).

Flexibilität

Flexibilität stellt eine Systemeigenschaft dar, welche die Möglichkeit eines Systems beschreibt, sich innerhalb bestimmter Grenzen an Änderungen der Zustände oder Bedingungen anzupassen (SCHMIDT 1992). Nach SCHMIDT (1992) kann Flexibilität bei Montagesystemen definiert werden als „die Anpassbarkeit eines Systems an Änderungen bei den zu produzierenden Produkten, den Produktionsanforderungen sowie den Produktionsbedingungen“. Hierbei wird zwischen interner und externer Flexibilität unterschieden. Bei der internen Flexibilität kann das System in Grenzen universell eingesetzt werden, wobei die Anpassung durch einfache Informationsverarbeitung (z. B. Programmierung) vorgenommen werden kann. Die externe Flexibilität hingegen umfasst den Tausch von produktspezifischen Standardkomponenten. SEVERIN (1987) differenziert bei Bearbeitungs- und Montagezellen den Begriff Flexibilität hinsichtlich Rüstflexibilität, Ablaufflexibilität, Zeitflexibilität, Mengenflexibilität, Funktionsflexibilität, Personalflexibilität und Störungflexibilität. In der Praxis erweist sich häufig eine sinnvolle Kombination verschiedener Flexibilitätsmaßnahmen bei der Strukturierung einer Montageaufgabe als zielführend (SCHMIDT 1992).

Im Hinblick auf die festgelegte Aufgabenstellung wird unter Flexibilität die Anpassungsfähigkeit der Automatisierungslösung auf möglichst viele Anwendungsszenarien in der Preformherstellung verstanden. Der Fokus bei der Realisierung des Endeffektors liegt demnach auf der Bewältigung der vorhandenen Variantenvielfalt, welche sowohl die zu verarbeitenden Zuschnitte als auch die eingesetzten Formwerkzeuge betrifft (siehe Kapitel 2.1). Gemäß der in SCHMIDT (1992) definierten internen Flexibilität müssen Prozessparameter, Greifpunkte, Drapierstrategie zur Verformung und Positionierung der Zuschnitte sowie deren Fixierung auf dem Formwerkzeug durch eine entsprechende Programmierung individuell einstellbar sein. Ein modularer Aufbau sowie der Einsatz von Standardschnittstellen stellt die externe Flexibilität des Systems sicher. Durch eine individuelle Gestaltung und den Austausch einzelner Module ist eine Erweiterung der Systemgrenzen für andere Anwendungen und eine Anpassung der Funktionsfähigkeit möglich.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

4.1 Angestrebtes Zielszenario und abgeleitete Arbeitsschwerpunkte

Für eine durchgängige Automatisierung des Preforming-Prozesses sind noch zahlreiche Herausforderungen zu überwinden (siehe Kapitel 2.2.6). Aufgrund des aufgezeigten Potentials ist es jedoch notwendig, Preforms reproduzierbar in hoher Qualität herstellen zu können. Der angestrebte, zukünftige Ablauf für eine automatisierte Preformherstellung ist in Abbildung 28 dargestellt.

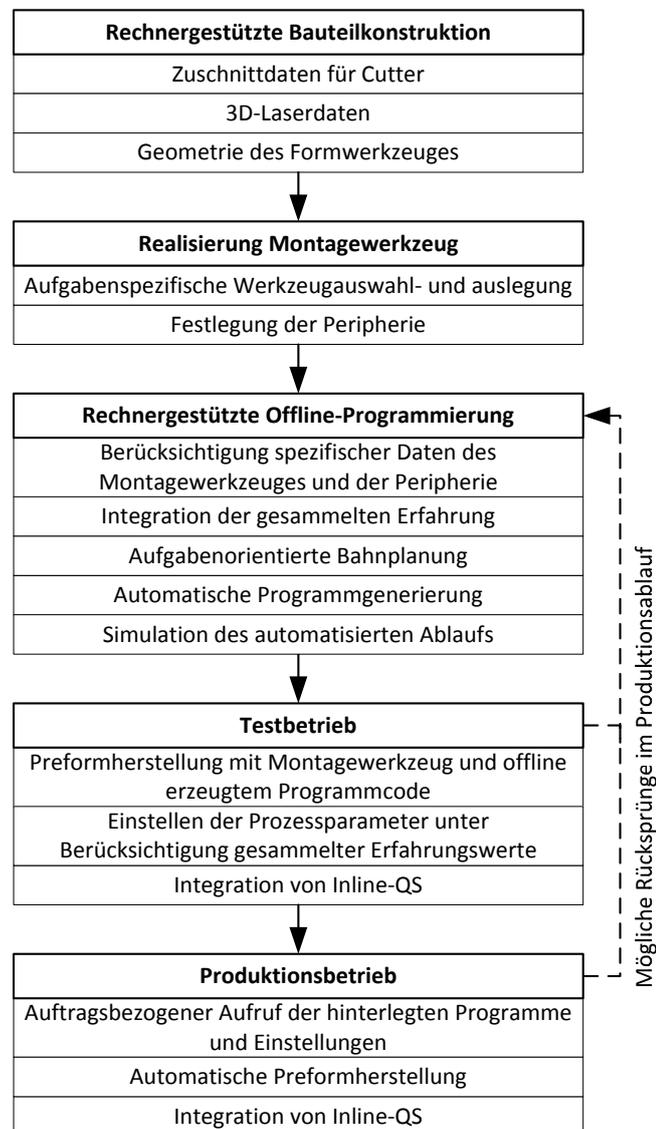


Abbildung 28: Ablauf einer durchgängig automatisierten Preformherstellung

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Das Zielszenario basiert auf industriell etablierten Softwarewerkzeugen zur Bauteilkonstruktion und bettet sowohl die Realisierung eines Montagewerkzeuges als auch die notwendige aufgabenorientierte Bahnplanung in einen durchgängigen Prozessablauf ein. Im anschließenden Testbetrieb des Systems können Prozessparameter ermittelt, die Qualität überwacht, Abläufe und Einstellungen optimiert und in Datenbanken abgespeichert werden. Die hinterlegten Programme, welche Roboterbahnen, optimale Prozessparameter und Einstellungen enthalten, werden im nachfolgenden Produktionsbetrieb je nach zu drapierendem Bauteil und Zugschnitt auftragsbezogen aufgerufen.

Um das Zielszenario zu erreichen, ist eine Methodik erforderlich, welche die gezielte Entwicklung eines adäquaten Montagewerkzeuges sowie dessen rechnergestützte Offline-Programmierung zur Einbindung in eine durchgängige Prozesskette berücksichtigt. Durch die konsequente Anwendung der Methodik wird die Möglichkeit geschaffen, eine geeignete Entwicklungslösung für ein gegebenes Anwendungsszenario umzusetzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein exemplarisches Referenzszenario aus der Luftfahrt gewählt, jedoch soll die Methodik auch auf vergleichbare Aufgabenstellungen anderer Branchen anwendbar sein.

Vor dem Hintergrund des identifizierten Handlungsbedarfs, den ermittelten Anforderungen sowie der aufgezeigten Motivation befasst sich die Methodik mit der Lösung der folgenden Arbeitsschwerpunkte:

- Systematische Analyse und Klassifikation eines Anwendungsszenarios hinsichtlich relevanter geometrischer Merkmale
- Auswahl von physikalischen Wirkprinzipien zur Abbildung der Teilfunktionen sowie deren wirkstrukturelle Verknüpfung zu einem geeigneten Montagewerkzeug
- Richtlinien zur Auswahl geeigneter Automatisierungslösungen sowie zur aufgabenspezifischen Gestaltung eines Montagewerkzeuges für die Erstellung des Preformaufbaus
- Leitlinien zur Umsetzung eines „Design for Automation“ bereits in der Bauteilentstehungsphase
- Hinweise zur Festlegung der Drapierstrategie und Ableitung von resultierenden Legekurven
- Erzeugung einer durchgängigen Prozesskette zur aufgabenorientierten Bahnplanung und Ansteuerung des Montagewerkzeuges

4.2 Methodik zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Unter dem Gesichtspunkt einer umfassenden Automatisierung der Preformherstellung wird ein methodisches Vorgehen entwickelt, dessen Schwerpunkte die anwendungsorientierte Umsetzung eines Montagewerkzeuges sowie eine rechnergestützte Offline-Programmierung zur Realisierung einer durchgängigen Prozesskette sind. Diese beiden tragenden Säulen finden sich auch in der schematischen Darstellung der entwickelten Methodik wieder (siehe Abbildung 29).

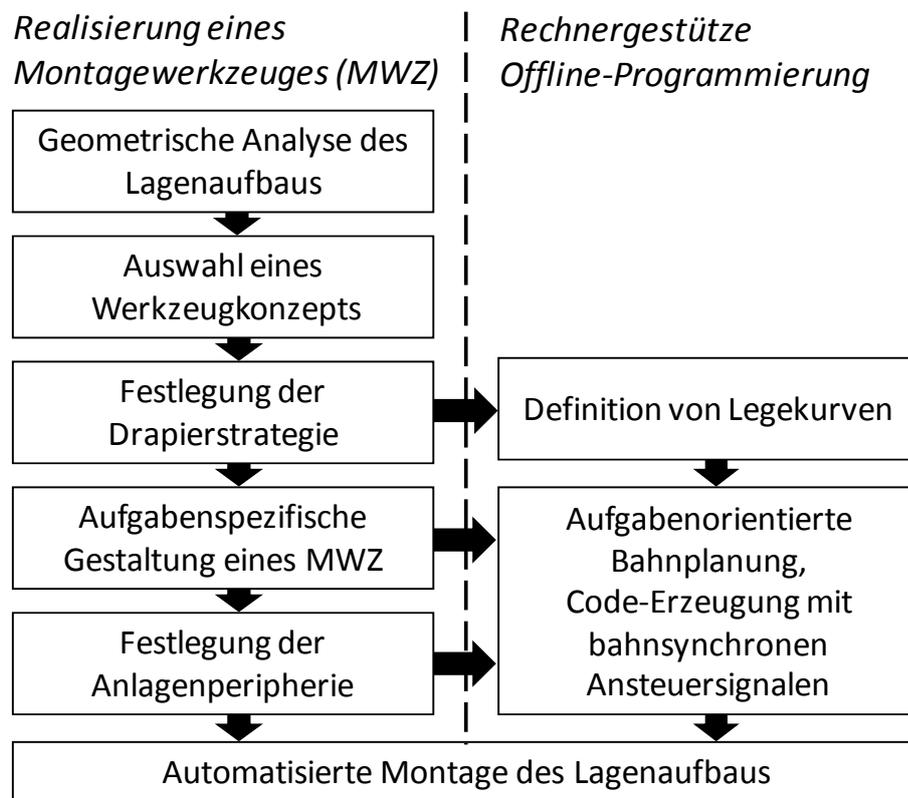


Abbildung 29: Methodik zur Umsetzung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Der in Abbildung 29 links dargestellte Strang zur Realisierung eines Montagewerkzeuges beinhaltet fünf Schritte, welche für eine automatisierte Montage des Lagenaufbaus durchlaufen werden. Eine Analyse des angestrebten Lagenaufbaus im Hinblick auf für die Automatisierung relevante Geometriemerkmale bildet die Grundlage für die nachfolgende Auswahl des passenden Werkzeugkonzepts. Hierbei können sowohl die im Stand der Forschung und Technik aufgezeigten Lösungen, welche den Anforderungen des Anwendungsszenarios gerecht werden, als auch neuartige Systeme verwendet werden. Für die Entwicklung neuer

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Automatisierungslösungen kommen etablierte Entwicklungsmodelle zum Einsatz, welche in unterschiedlichem Detaillierungsgrad einen chronologischen Ablauf der Entwicklungsphasen bis hin zur Konzeption beinhalten (z. B. VDI 2221). Nach der Auswahl des Werkzeugkonzepts wird im nächsten Schritt die Drapierstrategie festgelegt, welche das Vorgehen zur Textilaufnahme sowie zur positionsgenauen Ablage des Textils auf dem Formwerkzeug umfasst. Auf Basis der bisherigen Ergebnisse erfolgt eine weitere Detaillierung des ausgewählten Werkzeugkonzepts im Hinblick auf das zu drapierende Anwendungsszenario. Nach abgeschlossener Feinauslegung ist es notwendig, das Montagewerkzeug in eine passende Anlagenperipherie einzubinden. Neben der Auswahl der benötigten Komponenten (z. B. Roboter, Positionierungsvorrichtung für Formwerkzeuge) ist es ebenfalls wichtig, den automatisierten Ablauf simulativ zu überprüfen, um Änderungsbedarf hinsichtlich des Montagewerkzeuges, der Anlagenperipherie oder der Drapierstrategie frühzeitig zu erkennen und umzusetzen.

Im Sinne einer ganzheitlichen mechatronischen Betrachtung und einer Parallelisierung von mechanischer Ausgestaltung und Ansteuerungsentwicklung befasst sich die rechte Spalte der in Abbildung 29 dargestellten Methodik mit der rechnergestützten Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges. Zunächst ist es notwendig, die festgelegte Drapierstrategie in ein Format zu überführen, welches in den nachfolgenden Schritten rechnerbasiert weiterverarbeitet werden kann. Dies geschieht durch die Definition von Legekurven auf der Formwerkzeugoberfläche, welche die Grundlage für die nachfolgenden Arbeitsschritte bilden. Hierzu zählen die Generierung der Roboterbahn für die Textilaufnahme und -ablage, die Positionierung des Textils auf dem Endeffektor sowie die Konfiguration der notwendigen bahnsynchronen Stellsignale zur Ansteuerung des Montagewerkzeuges. Der automatisch erzeugte Robotercode beinhaltet den definierten Bewegungsablauf sowie eine zielgerichtete Ansteuerung des Montagewerkzeuges mit Hilfe von bahnsynchronen Funktionsaufrufen.

Die systematische Vorgehensweise zur Realisierung eines dem Produktionsszenario angepassten Montagewerkzeuges in Kombination mit einer rechnergestützten Offline-Programmierung führt zu einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms. Der Montageprozess weist dabei die notwendige Flexibilität auf, so dass während dem Testbetrieb, welcher dem Produktivbetrieb vorgelagert ist, die Drapierstrategie individuell angepasst und Prozessparameter zur Optimierung des Montageprozesses modifiziert werden können.

Die beschriebene Methodik ermöglicht es dem Anwender, individuelle Realisierungsansätze für eine automatisierte Preformherstellung zu finden und unterstützt ihn bei der detaillierten Ausarbeitung einer Lösung. Nach der Vorstellung des betrachteten Referenzszenarios werden in den folgenden Kapiteln die einzelnen Bausteine der Methodik detailliert erklärt und somit eine Basis geschaffen, welche durch zukünftige Erkenntnisse oder Forschungsergebnisse erweitert und ausgebaut werden kann. Kapitel 4.4 befasst sich mit den notwendigen Schritten zur Realisierung des Montagewerkzeuges (siehe Abbildung 29 links). Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 4.5 die Integration der aufgabenorientierten Bahnplanung und Ansteuerung (siehe Abbildung 29 rechts).

4.3 Referenzszenario

Die in der Arbeit entwickelte Methodik soll anhand eines industriellen Referenzszenarios aus der Luftfahrt exemplarisch beschrieben werden. Dies dient der Verdeutlichung der Methodik, welche für ein beliebiges Bauteilspektrum anwendbar ist. Die ausgewählten Formwerkzeuge entspringen realen Anwendungen und spiegeln repräsentativ die hohe Variantenvielfalt des vorherrschenden Produktportfolios wider (siehe Abbildung 30). Der Lagenaufbau der dazugehörigen Preforms wird bisher ausschließlich manuell hergestellt.

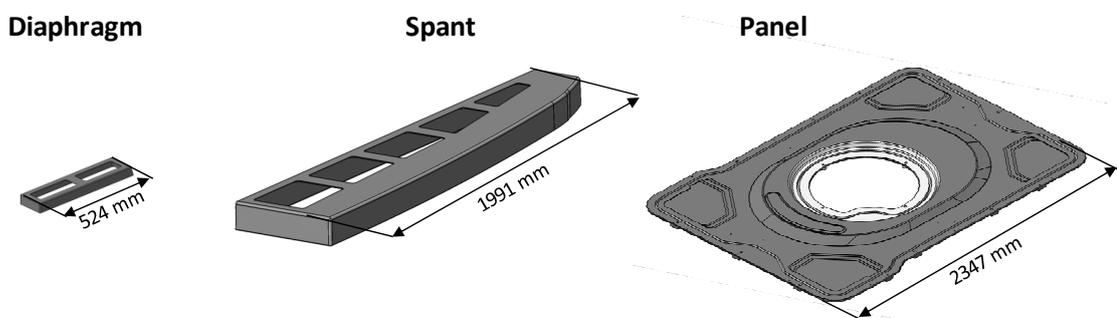


Abbildung 30: Formwerkzeuge der industriellen Referenzbauteile Diaphragm, Spant und Panel

Die ausgewählten Formwerkzeuge zeigen deutlich die große Diversifikation möglicher geometrischer Merkmale, welche in einem automatisierten Prozess bewältigt werden müssen. Da die Zuschnitte auf der Oberfläche des Formwerkzeuges abgelegt werden, ist diese neben der Zuschnittgeometrie ausschlaggebend für die Komplexität des Drapiervorgangs. Um auch hier ein repräsentatives Abbild zu geben, wurden sowohl großflächige Zuschnitte als auch kleine Verstärkungsstrukturen mit jeweils sehr unterschiedlichen Zuschnittkonturen

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

ausgewählt. Ein Auszug typischer Zuschnittgeometrien der Referenzbauteile ist in Abbildung 91 aufgeführt.

Häufige Vertreter der eingesetzten textilen Halbzeuge sind Gewebe und zunehmend auch Gelege (MITSCHANG & BERESHEIM 2004). Im Gegensatz zu Geweben tritt bei Gelegen keine Ondulation der Faserbündel auf, so dass die mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern nicht beeinträchtigt werden. Sogenannte Multiaxial-Gelege (MAG) sind aus mehreren, unterschiedlich ausgerichteten unidirektionalen (UD) Gelegeschieden aufgebaut, welche miteinander vernäht sind. Um ein möglichst breites Spektrum der eingesetzten Materialien abzudecken, werden die in Abbildung 31 dargestellten textilen Halbzeuge betrachtet. Die Gradangabe entspricht dabei der Faserorientierung in Relation zur Produktionsrichtung des Halbzeuges. Alle Materialien sind einseitig mit einem thermoplastischen Bindervlies versehen, dessen Flächengewicht 12 g/m² beträgt. Der Schmelzbereich des Bindervlieses liegt zwischen 87-100°C.

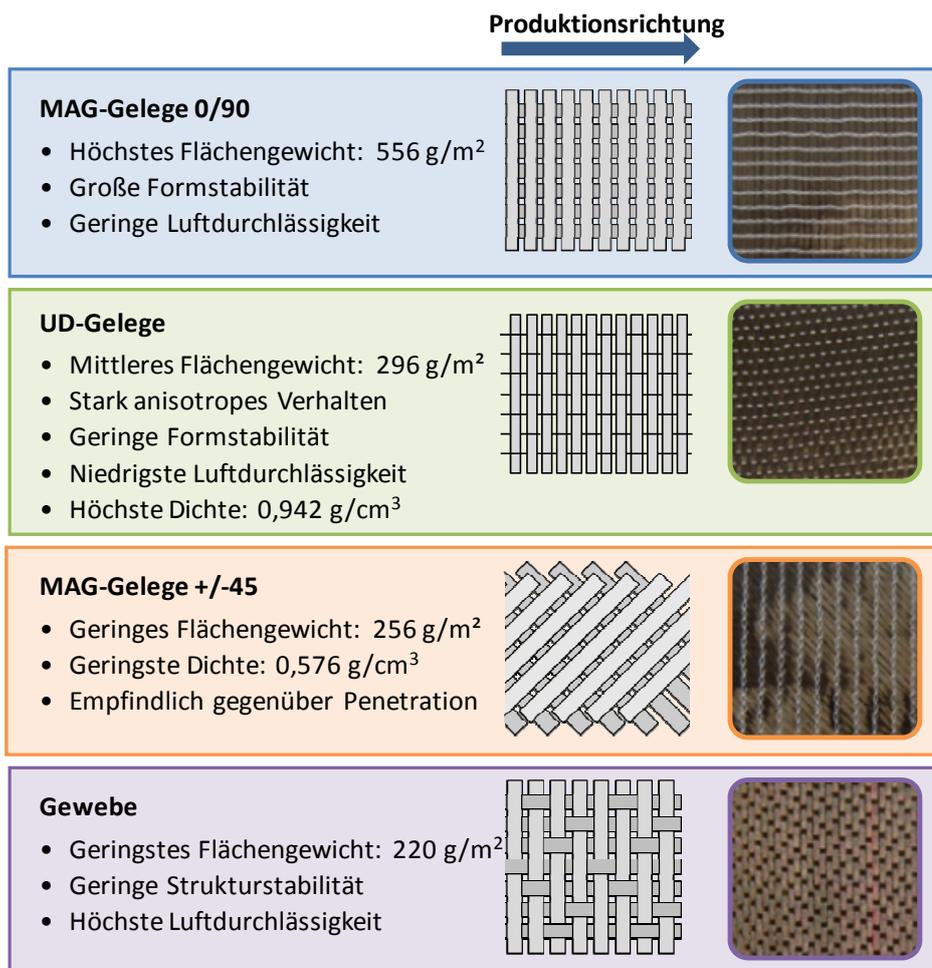


Abbildung 31: Stellvertretend ausgewählte Referenzmaterialien (in Anlehnung an STRAßER 2012)

4.4 Vorgehen zur Realisierung eines Montagewerkzeuges

4.4.1 Geometrische Analyse des Lagenaufbaus

Allgemeines

Eine genaue Analyse des Lagenaufbaus und der vorkommenden relevanten geometrischen Merkmale der Preform bildet die Grundlage für die anschließende aufgabenorientierte Auswahl und Gestaltung eines passenden Montagewerkzeuges. Ziel ist es, eine Strukturierung der Legeaufgabe vorzunehmen, um so kritische Bereiche des Drapierprozesses zu identifizieren und daraus Handlungsrichtlinien für die Umsetzung der Automatisierungslösung abzuleiten.

Die notwendige dreidimensionale Verformung jeder einzelnen Lage eines Preformaufbaus beeinflusst maßgeblich die erforderliche Leistungsfähigkeit des Montagewerkzeuges. Jede Lage des Preformaufbaus wird daher zunächst im Hinblick auf das Auftreten und die Ausprägung von fertigungsrelevanten geometrischen Merkmalen untersucht. Mögliche Schwierigkeiten bei einer automatisierten Herstellung des Lagenaufbaus können dadurch frühzeitig identifiziert und visualisiert werden. Die Ausprägungsstufen auftretender geometrischer Merkmale können im Folgenden dem ermittelten Leistungsbereich von möglichen Automatisierungslösungen zugeordnet werden (siehe Kapitel 4.4.2.5), wodurch eine aufgabenorientierte Auswahl und die nachfolgende Auslegung des eingesetzten Montagewerkzeuges ermöglicht wird. Darüber hinaus ist es durch eine strukturierte Analyse der fertigungsrelevanten geometrischen Merkmale möglich, bei bereits bestehenden Automatisierungslösungen mit bekanntem Leistungsbereich schon in der Produktentstehungsphase ein automatisierungsgerechtes Bauteildesign zu verwirklichen.

Da aus der Analyse des Stands der Forschung und Technik keine Klassifizierungsmöglichkeiten für Lagenaufbauten bei Preforms bekannt sind, welche den vorherrschenden Anforderungen genügen, wird im Folgenden ein systematisches Vorgehen für die geometrische Analyse des Lagenaufbaus vorgestellt, welches auf verschiedenste Bauteilformen übertragbar und anwendbar ist.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Vorgehen bei der geometrischen Analyse des Lagenaufbaus

Für die geometrische Analyse der Lagenaufbauten von Preforms wird ein vierstufiges Vorgehen angewandt:

1. Identifikation relevanter geometrischer Merkmale
2. Entwicklung von Skalen
3. Klassifikation der Einzellagen
4. Erstellung eines Netzdiagramms

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Vorgehens detailliert erklärt und anhand von Beispielen aus dem Referenzszenario verdeutlicht.

1. Identifikation relevanter geometrischer Merkmale

Im ersten Schritt werden fertigungsrelevante geometrische Merkmale ermittelt, welche die Komplexität des Lagenaufbaus beschreiben und damit auch den Schwierigkeitsgrad für eine Automatisierung bestimmen. Erfahrungswissen aus dem manuellen Fertigungsprozess bildet die Grundlage für die Auswahl der betrachteten Geometriemerkmale. Diese Auswahl an Merkmalen ist nicht als starr anzusehen, sie kann vielmehr durch weitere, sinnvoll erscheinende Merkmale bedarfsgerecht ergänzt werden. Gewonnene Erkenntnisse aus bereits eingesetzten Automatisierungslösungen können beispielsweise die Auswahl der Merkmale erweitern. Um die nachfolgende Entwicklung von Skalen zu vereinfachen, sollten die identifizierten Merkmale möglichst anhand eines oder mehrerer eigenschaftsbeschreibender Parameter quantifizierbar sein.

Für das vorliegende Referenzszenario werden exemplarisch folgende, den Lagenaufbau beschreibende Geometriemerkmale ausgewählt (siehe Abbildung 32):

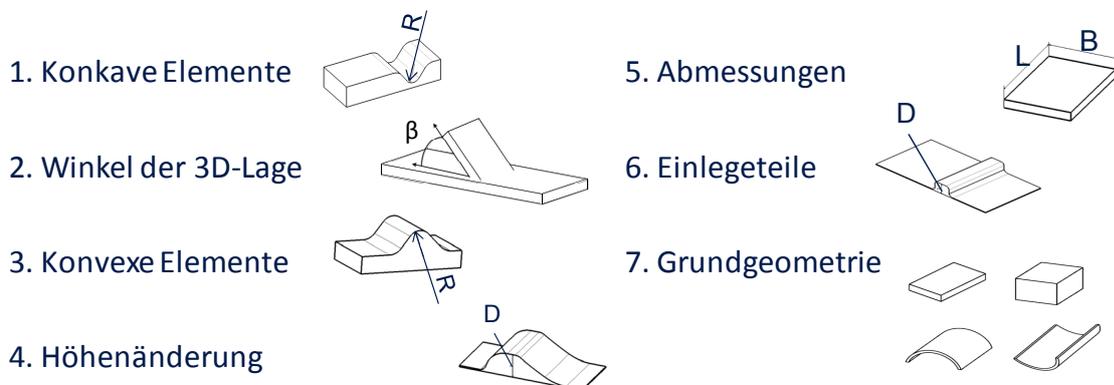


Abbildung 32: Geometriemerkmale zur Beschreibung des Lagenaufbaus des Referenzszenarios

2. Entwicklung von Skalen

Im folgenden Arbeitsschritt werden die Ausprägungsstufen der identifizierten Geometriemerkmale festgelegt. Durch den Grundsatz, die Skaleneinteilung so fein wie nötig und so grob wie möglich zu wählen, ist eine sinnvolle Abstufung der quantifizierbaren Merkmale möglich. Erfahrungswissen, beispielsweise aus bereits durchgeführten Vorversuchen, kann ebenfalls bei der Einteilung der Skalenbereiche einfließen, so dass diese nicht starr festgelegt sind, sondern iterativ angepasst werden können. Den einzelnen Skalenbereichen wird anschließend jeweils ein Wert zugeordnet. Da eine stärkere Merkmalsausprägung auch eine Erhöhung der Fertigungskomplexität bedeutet, steigt der vergebene Wert proportional zur Merkmalsausprägung an. Bei nicht quantifizierbaren Merkmalen (z. B. Grundgeometrie) erfolgt die Wertzuteilung durch den Anwender. Je schwieriger die Merkmalsausprägung für eine Automatisierung angesehen wird, umso höher ist demnach der vergebene Wert. Für die Geometriemerkmale aus Abbildung 32 werden beispielhaft Skalenbereiche festgelegt und dazugehörige Werte vergeben (siehe Tabelle 3).

3. Klassifikation der Einzellagen

Im dritten Schritt wird jede Lage einer Preform auf das Auftreten der identifizierten Geometriemerkmale hin untersucht. Gemäß der vorliegenden Merkmalsausprägung erfolgt für jedes Merkmal eine lagenindividuelle Wertzuweisung. Durch die Klassifikation aller auftretenden Einzellagen ist es möglich, sich einen Überblick über die Drapieraufgabe zu verschaffen und diese systematisch zu strukturieren. Zur Verdeutlichung des Vorgehens werden beispielhaft verschiedene Einzellagen des vorliegenden Referenzszenarios klassifiziert (siehe Tabelle 3).

4. Erstellung eines Netzdiagramms

Im vierten Schritt wird die erarbeitete Klassifizierung in die Darstellungsform eines Netzdiagramms überführt. Jede Achse des Netzdiagramms wird einem Geometriemerkmal zugeordnet und in die festgelegten Werte der Skalenbereiche unterteilt. Anschließend kann die bereits durchgeführte Klassifikation der Einzellagen in das neu entstandene Netzdiagramm übertragen werden. Durch die intuitive und anschauliche Darstellungsform auftretender Merkmalsausprägungen im Netzdiagramm können anspruchsvolle Stellen im Lagenaufbau schnell identifiziert und die Drapieraufgabe für den Anwender visualisiert werden. Da in dem Netzdiagramm Lagen verschiedener Referenzbauteile Eingang finden, kann die Zugehörigkeit einer Lage zu einem bestimmten Referenzbauteil über eine

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Farbunterscheidung, Symbole oder Indizes gekennzeichnet werden (siehe Abbildung 43).

Merkmal	Grenzen (mm)	Wert	Lage 1(P)	Lage 2(P)	Lage a(P)	Lage 1(S)	Lage 2(S)	Lage b(S)	Lage 1(D)	Lage 2(D)	Lage c(P)
Konkave Elemente	R>100	1				1	1	1	1	1	1
	80<R<=100	2		2							
	65<R<=80	3	3		3						
	50<R<=65	4									
	R<=50	5									
Konvexe Elemente	R>50	1				1	1	1	1	1	1
	20<R<=50	2									
	10<R<=20	3	3								
	5<R<=10	4		4	4						
	R<=5	5									
2D Lagenabmessung	L<1000,B<500	1				1					
	L<1000,B<1000	2					2		1	1	1
	L<1500,B<1000	3		3				3			
	L<1500,B<1500	4			4						
	L<2000,B<1500	5	5								
	L<2000,B<2000	6									
	L<2500,B<2000	7									
Grundgeometrie	Platte	1	1	1	1						
	Quader	2				2	2	2	2	2	2
	Konvexe Schale	3									
	Konkave Schale	4									
Winkel der 3D-Lage	$\beta < 15^\circ$	1	1		1	1	1	1	1	1	1
	$15^\circ \leq \beta < 30^\circ$	2		2							
	$30^\circ \leq \beta < 45^\circ$	3									
	$45^\circ \leq \beta < 60^\circ$	4									
	$60^\circ \leq \beta < 75^\circ$	5									
	$75^\circ \leq \beta < 90^\circ$	6									
Höhenänderungen	D<5	1				1	1	1	1	1	1
	5<=D<10	2									
	10<=D<20	3		3	3						
	20<=D<50	4	4								
	50<=D<100	5									
	D>=100	6									
Einlegeile	D<5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5<=D<10	2									
	10<=D<20	3									
	20<=D<50	4									
	D>=50	5									

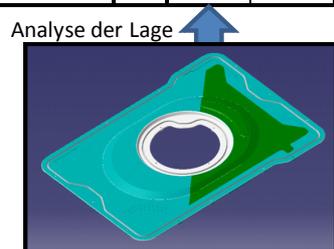


Tabelle 3: Einteilung der dreidimensionalen Einzellagen gemäß der Ausprägung geometrischer Merkmale (P=Panel, S=Spant, D=Diaphragm)

4.4.2 Anforderungsgerechte Auswahl eines Werkzeugkonzepts

4.4.2.1 Entwicklung neuartiger Montagewerkzeuge

Anwendung bestehender Entwicklungsmodelle

Bei der Bearbeitung neuartiger Entwicklungsaufgaben, welche eine zeitliche Limitierung und einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen, ermöglicht die Anwendung von unterstützenden Entwicklungsmodellen ein zügiges und zielgerichtetes Arbeiten während des Entwicklungsprozesses (PONN & LINDEMANN 2008). Für die Entwicklung von Montagewerkzeugen für die automatisierte Preformherstellung ist daher die Anwendung von geeigneten Vorgehensmodellen unverzichtbar. Hierbei können etablierte Vorgehensmodelle zum Einsatz kommen, welche einen chronologischen Ablauf der Entwicklungsphasen beinhalten. In unterschiedlichem Detaillierungsgrad weisen die Entwicklungsmodelle der VDI 2221, des Pyramidenmodells der Konkretisierungsebenen (PONN & LINDEMANN 2008) sowie die Arbeitsschritte des methodischen Konzipierens (PAHL ET AL. 2007) eine chronologische Abfolge der in Abbildung 33 dargestellten Entwicklungsphasen auf.

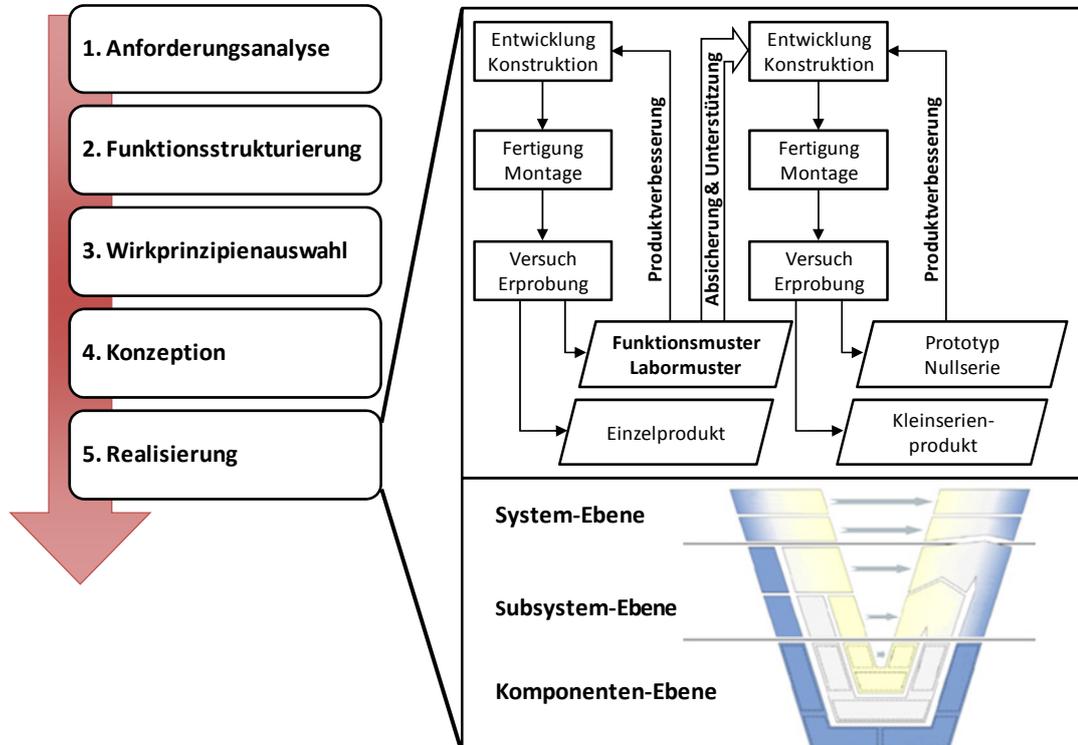


Abbildung 33: Chronologische Entwicklungsschritte und Detaillierung der Realisierungsphase (VDI 2221, BENDER 2005)

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Entwicklungsschrittes „Realisierung“ ist eine weitere Detaillierung und Unterstützung anhand von geeigneten Vorgehensmodellen notwendig. Da eine direkte Überführung der Wirkprinzipien und der erarbeiteten Konzepte in einen kosten- und zeitintensiven Prototypenaufbau äußerst risikoreich ist, wird in einem ersten Planungs-, Entwicklungs-, Konstruktions-, Fertigungs- und Montagedurchlauf zunächst ein Funktionsmuster umgesetzt, welches als Versuchsplattform fungiert. Identifiziertes Optimierungspotenzial fließt anschließend in die Entwicklung eines verbesserten Funktionsmusters bzw. eines prototypischen Montagewerkzeuges ein. Diese Maßnahme führt zu einer Verkürzung der Inbetriebnahmezeit und zu einer Senkung des Entwicklungsrisikos. Vor allem aber kann mit Hilfe des realisierten Funktionsmusters getestet und bewertet werden, welche Ausprägungsstufen der im Netzdiagramm dargestellten Geometriemerkmale in zufriedenstellender Qualität drapiert werden können. Damit ist es möglich, bereits in einem frühen Entwicklungsstadium abzuschätzen, ob der angestrebte Prototyp in der Lage sein wird, das vorliegende Bauteilspektrum automatisiert zu drapieren bzw. welche Modifikation oder Optimierungsmaßnahmen hierfür notwendig sind.

Da es sich sowohl bei dem Funktionsmuster als auch bei dem Prototyp um ein mechatronisches System handelt, welches neben der erforderlichen Mechanik auch Elektronik und Softwarekomponenten beinhaltet, empfiehlt sich in der Realisierungsphase die Anwendung des 3-Ebenen-Vorgehensmodells nach BENDER (2005), welches das V-Modell der VDI 2206 erweitert. Wichtig ist es hierbei, sowohl mechanische als auch steuerungstechnische Komponenten simultan weiterzuentwickeln und dabei für eine enge Abstimmung und Koordination der Einzeldisziplinen Mechanik, Hardware und Software zu sorgen. Basierend auf einer produktspezifischen Anforderungsanalyse erfolgt der Systementwurf, welcher schrittweise innerhalb der Einzeldisziplinen konkretisiert wird. Im Anschluss an den Entwurfs- und Realisierungsprozess auf Komponentenebene erfolgt sukzessive die Systemintegration bis hin zum fertigen Produkt, wobei ein ständiger Abgleich mit den Anforderungen bzw. dem angestrebten Entwurf des linken Astes erfolgt.

Anforderungsanalyse

Ein Großteil der gängigen Entwicklungsmodelle beinhaltet eine Analyse der auftretenden Anforderungen. Neben den Anforderungen, welche aus dem vorliegenden Anwendungsszenario resultieren (siehe Kapitel 4.4.1), bestimmen vor allem material- und prozessspezifische sowie wirtschaftliche Faktoren die Ausgestaltung des Montagewerkzeuges. Die auftretenden prozessspezifischen und

wirtschaftlichen Anforderungen wurden bereits in Kapitel 3 aufgeführt. Auch materialspezifische Einflussgrößen wirken sich auf den Schwierigkeitsgrad der Drapieraufgabe aus und stellen daher anforderungsrelevante Faktoren für das Montagewerkzeug dar. In STRABER (2012) werden materialspezifische Einflussfaktoren nach Eigenschaftsklassen strukturiert und Untersuchungsverfahren für die Bestimmung der relevanten Materialkennwerte vorgestellt.

Basierend auf den ermittelten Anforderungen wird anschließend eine Strukturierung der abgeleiteten Funktionen vorgenommen. Zudem können aus den identifizierten Anforderungen Bewertungskriterien für die Auswahl geeigneter Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionalitäten abgeleitet werden.

Funktionsstrukturierung

Die Funktionsstrukturierung beinhaltet die Analyse der notwendigen Funktionen und des vorliegenden organisatorischen Umfelds innerhalb der ausgewählten Systemgrenze (DECHENT ET AL. 1991). Daraus werden Funktionsmodelle generiert, welche die Eigenschaften der Funktionen und die dazugehörigen Relationen auf abstrakter Ebene abbilden. Dadurch können komplexe Abläufe übersichtlich strukturiert und in überschaubare Teilfunktionen unterteilt werden, so dass Abläufe, Abhängigkeiten und Zusammenhänge des Systems anschaulich und verständnisfördernd abgebildet werden. Eine Funktionsstrukturierung wird eingesetzt, um sowohl vorhandene als auch neu zu entwickelnde Systeme zu analysieren (LINDEMANN 2005), wobei die VDI 2803 als Leitfaden für eine strukturierte Vorgehensweise dienen kann.

Für die Erstellung eines Funktionsmodells werden zunächst die relevanten Basisfunktionen identifiziert, welche die Grundlage für eine abstrakte Produktbeschreibung darstellen. Im Falle der Preformherstellung müssen für jede Textillage drei Funktionen ausgeführt werden:

1. Greifen
2. Positionieren und Orientieren (entspricht Drapierprozess)
3. Fixieren

Die Preformherstellung kann als Zusammenbau von Textilien und somit als Montageprozess eingeordnet werden (VDI 2860, GUTSCHE 1993, SPUR & STÖFERLE 1983). Das Greifen sowie das Positionieren und Orientieren stellen dabei Teilfunktionen des Handhabens dar. Das Fixieren durch thermische Aktivierung des Binders bildet einen Fügeprozess ab. Der Teilprozess Kontrollieren entspricht der Überprüfung der Lagenzuschnitte (siehe Abbildung 34).

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms



Abbildung 34: Montageprozess mit Basis- und Teilfunktionen

Desweiteren kann entsprechend der Wichtigkeit der einzelnen Funktionen zwischen Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden (VDI 2803). Da die Hauptfunktionen „Greifen“, „Positionieren und Orientieren“ und „Fixieren“ für den Einsatz des Montagewerkzeuges essentiell sind, sind diese möglichst in das Montagewerkzeug zu integrieren, wohingegen die Nebenfunktionen „Teilezufuhr“, „Bewegen“ und „Kontrollieren“ an externe Einheiten ausgelagert werden können.

In einem ablaufstrukturierten Funktionsmodell werden die zeitlich-logischen Abhängigkeiten der einzelnen Funktionen verdeutlicht. Beispielhaft ist dies für den manuellen Preforming-Prozess in Abbildung 27 dargestellt. Für die Neuentwicklung eines automatisierten Systems kann es jedoch erforderlich sein, die bisherige Funktionsstruktur zu ändern und Abläufe geschickt zu variieren. Eine ablaforientierte Funktionsmodellierung für den automatisierten Preforming-Prozess ist exemplarisch in Abbildung 35 gezeigt.

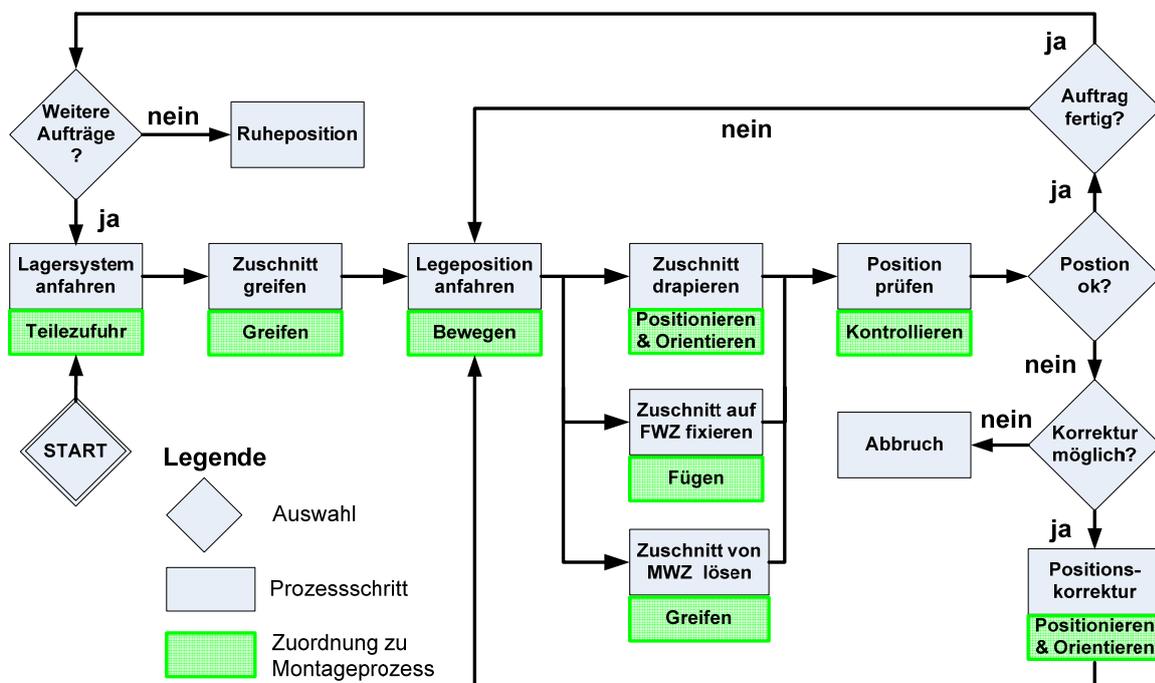


Abbildung 35: Ablauforientierte Funktionsmodellierung

Wirkprinzipienauswahl

Die Funktionsmodellierung dient der Vorbereitung zur Suche nach Lösungsalternativen, so dass auf der Grundlage der identifizierten Hauptfunktionen basierend auf physikalischen Effekten geeignete Wirkprinzipien ausgewählt werden (LINDEMANN 2005). In der anschließenden Konzeptphase werden diese dann entsprechend der Funktionsmodellierung kombiniert, so dass eine Wirkstruktur entsteht (EHRLENSPIEL 2003).

Bei der Auswahl des Wirkprinzips für die Teilfunktion „Greifen“ kann auf die umfangreichen Vorarbeiten aus STRABER (2012) zurückgegriffen werden. Aus einem breiten Spektrum an Greifprinzipien wird basierend auf einer strukturierten Vorgehensweise und detaillierten Voruntersuchungen das Niederdruckflächensaugen für Einsatz bei Faserverbundtextilien eindeutig als potenzialträchtigste Alternative ausgewählt. Die Vorteile des Niederdruckflächensaugens liegen dabei in der Greifgüte, der Wirtschaftlichkeit sowie der Möglichkeit zur Flexibilisierung der Greiffläche.

Für die verbleibenden Teilfunktionen „Positionieren und Orientieren“ sowie „Fixieren“ bilden die Vorarbeiten von DUTZ (2008) eine erste Basis. Hierin werden mögliche Wirkprinzipien beschrieben, teilweise experimentell untersucht und anschließend bewertet. Zur Auswahl potenzialträchtiger Wirkprinzipien kommt die in Abbildung 36 dargestellte Vorgehensweise zum Einsatz, in welche sich auch die Ergebnisse von DUTZ (2008) einordnen lassen (siehe Anhang 10.2).

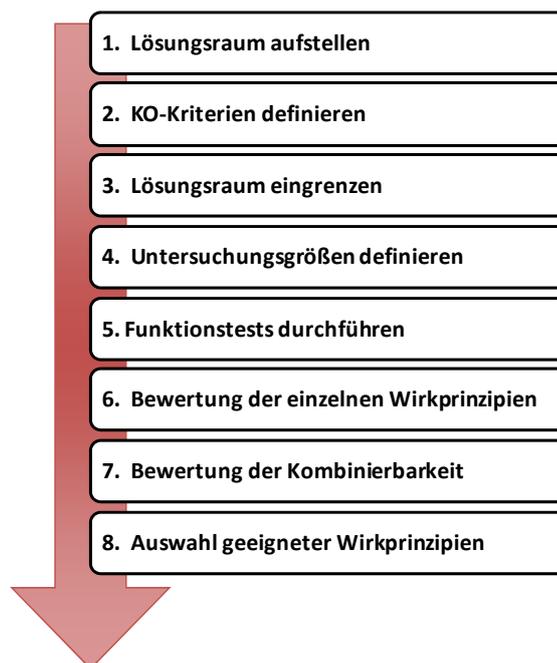


Abbildung 36: Vorgehensweise zur Auswahl von Wirkprinzipien

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Zu Beginn gilt es einen Lösungsraum aufzustellen, welcher sowohl etablierte Systeme als auch innovative oder unkonventionelle Ansätze beinhaltet. Die Aufstellung eines möglichst umfassenden Lösungsraums kann dabei durch Anwendung von Kreativtechniken unterstützt werden (DÖRNER 1990, HIGGINS 1994, SCHLICKSUPP 1999). Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, wird der Lösungsraum anschließend eingegrenzt, indem KO-Kriterien definiert werden. Dabei handelt es sich um übergreifende oder teilfunktionsspezifische Eigenschaften, die zu einem Ausschluss des Wirkprinzips führen. Für die verbleibenden Wirkprinzipien werden aus der Anforderungsanalyse erfassbare Untersuchungsgrößen definiert, anhand derer anschließend eine Bewertung erfolgen kann. Zur Evaluierung der Wirkprinzipien gilt es, eine funktionsfähige Lösung zu wählen, welche eine möglichst potenzialträchtige und repräsentative Umsetzungsmöglichkeit darstellt (STRABER 2012). In den anschließenden Funktionstests muss der Versuchsaufwand durch sinnvolle Einschränkungen und eine methodische Vorgehensweise ohne Ergebnisverlust reduziert werden. Ein Fokus liegt hierbei in der Betrachtung des Worst-Case-Szenarios. Insbesondere die Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Positionieren und Orientieren“ müssen dabei an den kritischen Geometriemerkmale der vorliegenden Formwerkzeuge getestet werden (siehe Kapitel 4.4.1). Bei Bedarf können diese Geometriemerkmale für Versuchszwecke auch in einem speziell angefertigten Formwerkzeug zusammengefasst werden. Um aus den bestehenden Alternativen eine Auswahl für die potenzialträchtigsten Wirkprinzipien treffen zu können, erweist sich das Hilfsmittel der Nutzwertanalyse als geeignet, da hier auch nicht monetäre Faktoren in die Entscheidung mit einfließen können (ZANGENMEISTER 1973). Die einzelnen Lösungsalternativen lassen sich dadurch gemäß ihrem ermittelten Nutzwert ordnen. Prozessbedingt besteht eine starke Wechselwirkung zwischen den einzelnen Wirkprinzipien, da gerade während des Drapierprozesses alle drei Hauptfunktionen nahezu simultan ausgeführt werden (siehe Abbildung 35). Die Kombinationsfähigkeit mit anderen Wirkprinzipien ist deshalb ein wichtiges Kriterium für die Auswahl derjenigen Wirkprinzipien, welche in der anschließenden Konzeptphase zu einer Wirkstruktur verdichtet werden. Da im Hinblick auf das Gesamtsystem die singular bewerteten Einzelfunktionen nicht zwingend die optimale Lösung für das Gesamtsystem darstellen, muss zudem die Kombinationsfähigkeit der Einzelsysteme bewertet werden. Um die Anzahl der Lösungsalternativen einzuschränken, werden im Rahmen der Nutzwertanalyse die Kombinationsmöglichkeiten der drei ranghöchsten Wirkprinzipien bewertet (siehe Anhang 10.2).

Aufbauend auf den Ergebnissen in Anhang 10.2 kann durch ergänzende Vorversuche ermittelt werden, dass für die Teilfunktion „Positionieren und Orientieren“

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

ein elastisches Element in Kombination mit einer Drapierrolle das größte Potenzial aufweist. Durch die ausstreichende Abrollbewegung und die linienförmige Kontaktfläche wird das Textil nur mit geringen Spannungen belastet. Zudem führt das elastische Element am Umfang der Drapierrolle im Rahmen der möglichen Stauchung zu einer flächigen Formanpassung des Textils an komplexe Oberflächen. Gleichzeitig kann dadurch auch eine Nachgiebigkeit im Werkzeug zum Ausgleich von Höhentoleranzen integriert werden. Die Teilfunktion „Fixieren“, welche die thermische Aktivierung des Bindervlieses beinhaltet, kann über eine Widerstandsheizung realisiert werden. Hierbei wird ein Heizdraht mäanderförmig auf ein hitzebeständiges und luftdurchlässiges Trägermaterial aufgenäht. Die Vorteile dieses Wirkprinzips liegen in der hohen Formflexibilität und Gestaltungsfreiheit, welche auch die Möglichkeit der lokalen Wärmeeinbringung impliziert.

Abbildung 37 gibt einen Überblick über die zur Preformherstellung notwendigen Haupt- und Nebenfunktionen des Montageprozesses. Die Nebenfunktionen „Teilezufuhr“, „Bewegen“ und „Kontrollieren“ können hierbei von peripheren Einrichtungen übernommen werden. Für die einzelnen Hauptfunktionen des Montagewerkzeuges sind jeweils die potenzialträchtigsten Wirkprinzipien und die Vorteile im Bezug auf das Referenzszenario aufgeführt.

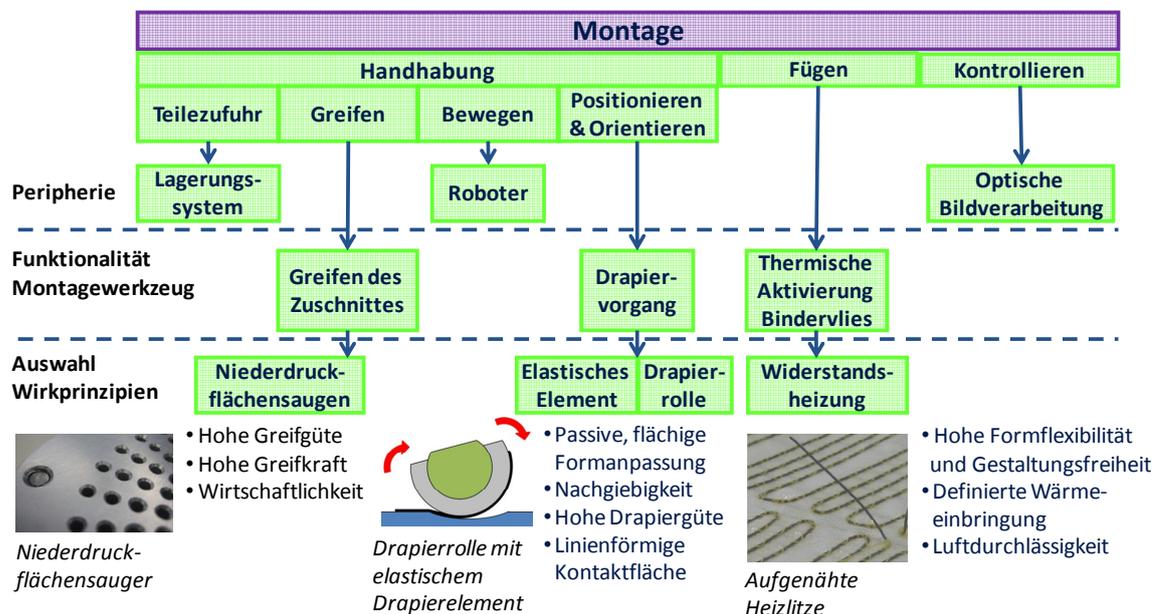


Abbildung 37: Übersicht über notwendige Funktionalitäten des Montagewerkzeuges und dazugehörige Wirkprinzipien

4.4.2.2 Konzeption modularer Montagewerkzeuge

Auf Basis der identifizierten Wirkprinzipien erfolgt die Konzeption eines geeigneten Montagewerkzeuges. Die Qualität des Gesamtkonzepts bestimmt dabei bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess den Erfolg des späteren Produkts (LINDEMANN 2005). Bei der Verknüpfung der Wirkprinzipien zu einer Wirkstruktur in einem funktionsfähigen Gesamtkonzept müssen dabei insbesondere technische, wirtschaftliche und prozessbedingte Anforderungen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3).

Aus den Ergebnissen der Funktionsmodellierung (siehe Abbildung 35) kann durch eine genaue Analyse des Prozessablaufs eine weitere Detaillierung vorgenommen werden, aus der sich zwei Grundfunktionalitäten des Montagewerkzeuges ableiten:

1. *Selektive Greiffunktionalität*

Beim Greifen konturvarianter Zuschnitte mit Hilfe eines Niederdruckflächengreifers ist es zur Minimierung des Fehlluftstromes notwendig, unbedeckte Bereiche der Greiffläche zu verschließen. Dadurch kann der zum Greifen notwendige Druckabfall über dem Greifgut erzeugt werden. Während des Drapiervorgangs besteht die Anforderung, einzelne Textilbereiche nach erfolgter Fixierung auf dem Formwerkzeug gezielt von der Greiffläche zu lösen, wohingegen das restliche Textil in definierter Position am Montagewerkzeug gehalten werden muss. Die dazu notwendige selektive Greiffunktionalität des Montagewerkzeuges muss aufgrund der bestehenden Variantenvielfalt flexibel an verschiedene Zuschnittgeometrien adaptierbar sein.

2. *Selektive Heizfunktionalität*

Einzelne Textilbereiche werden durch thermische Aktivierung des Bindervlieses fixiert, sobald sie lagerichtig auf dem Formwerkzeug positioniert sind. Die restlichen Textilbereiche hingegen dürfen nicht erhitzt werden, da dies zu einem undefinierten bzw. ungewünschten Anhaften des Textils führen könnte. Vor diesem Hintergrund ist eine selektive Heizfunktionalität in das Montagewerkzeug zu integrieren. Analog zur menschlichen Tätigkeit kann dadurch ein fortschreitender Fixierprozess, ausgehend von einem bereits positionsgenau fixierten Bereich, abgebildet werden.

Für eine größtmögliche Flexibilisierung wird eine konsequente Modularisierung des Gesamtsystems angestrebt. Die strukturelle Untergliederung in funktionelle

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Submodule ermöglicht eine fokussierte Lösungssuche gemäß den Anforderungen des jeweils vorliegenden Anwendungsszenarios. Das entscheidende Submodul stellt dabei die Drapiereinheit dar, da es die identifizierten Wirkprinzipien und die beiden Grundfunktionalitäten integriert und einen starken Vernetzungsgrad zu weiteren Submodulen (Trägereinheit, Niederdruckflächensaugen, elastisches Element, Widerstandsheizung) aufweist. Eine schematische Übersicht über die abgeleiteten Submodule des Montagewerkzeuges, deren Zusammenhänge und Schnittstellen wird in Abbildung 38 gezeigt.

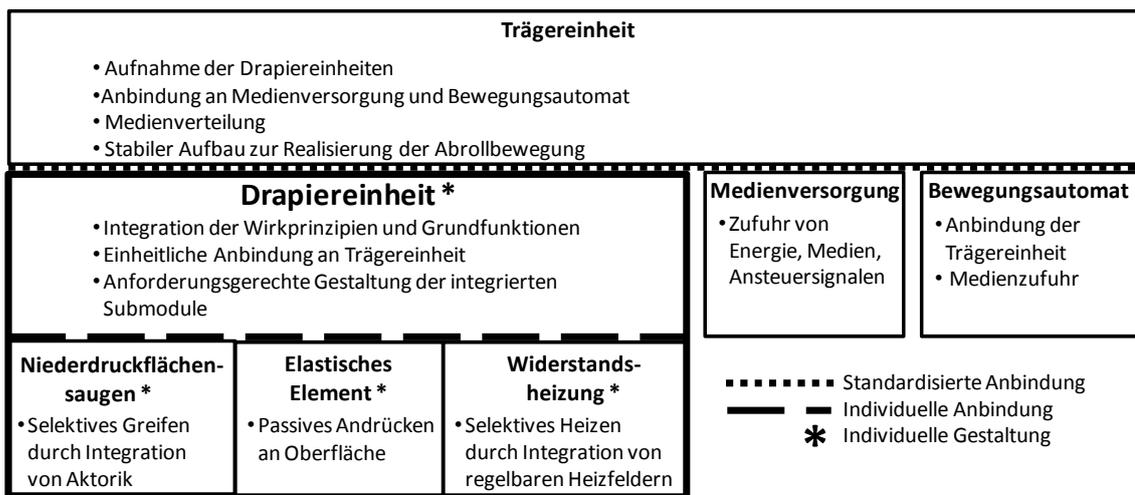


Abbildung 38. Übersicht über die vorhandenen Submodule des Montagewerkzeuges

Die Drapiereinheiten werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit als modulare Kammern konzipiert. Bei der Gestaltung des Montagewerkzeuges ist die Anbindung der Kammern an die Trägereinheit einheitlich und möglichst standardisiert zu gestalten. Im Gegensatz dazu erfolgt die Gestaltung der Kammern und der integrierten Submodule (Niederdruckflächensaugen, elastisches Element und Widerstandsheizung) individuell, so dass eine dem vorliegenden Anwendungsszenario angepasste Lösung realisiert werden kann. Variationsmöglichkeiten für die Ausgestaltung einer Drapiereinheit und der integrierten Submodulen finden sich in Anhang 10.3.

Das Submodul „Trägereinheit“ muss während des Drapierprozesses auftretende mechanische Belastungen durch einen ausreichend stabilen Aufbau aufnehmen. In der Funktion als Bindeglied beinhaltet die Trägereinheit die kinematische Anbindung an den Bewegungsautomaten (z. B. 6-Achsen-Knickarmroboter), die Zufuhr und Verteilung der benötigten Medien (z. B. Volumenstrom, elektrische Leistung, Ansteuersignale) sowie die Determination der funktionellen

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Aufnahmegestaltung der Drapiereinheiten. Zusammen mit der Ausgestaltung der Drapiereinheiten bestimmt die Trägerstruktur die äußere Form des Montagewerkzeuges. Aufbauend auf den Ergebnissen der Wirkprinzipienauswahl wird dabei eine ausstreichende Abrollbewegung des Montagewerkzeuges favorisiert, wobei zwei geometrische Grundprinzipien als konzeptionelle Basis für eine weitere Detaillierung im Entwicklungsprozess vorgeschlagen werden (siehe Abbildung 39):

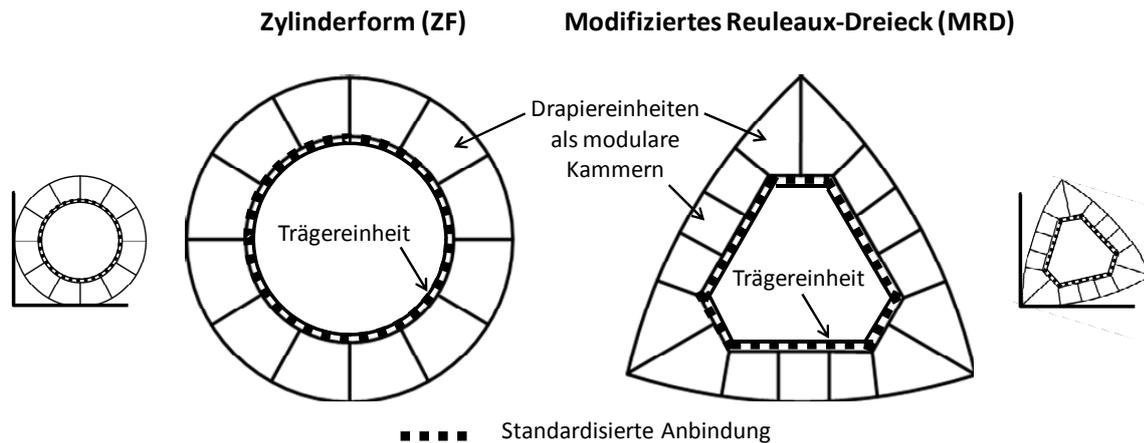


Abbildung 39: Basiskonzepte für die Gestaltung eines Montagewerkzeuges

Durch das Vorkommen von Eckkammern ermöglicht das modifizierte Reuleaux-Dreieck (MRD) im Gegensatz zur Zylinderform (ZF) auch das automatisierte Drapieren von konkaven Winkeln (z. B. bis zu 90°) im Preformaufbau. Müssen noch geringere Winkel im Lagenaufbau bewältigt werden, so ist es möglich, auf den Einzelfall zugeschnittene Spezialgeometrien des Montagewerkzeuges einzusetzen (Beispiele hierzu finden sich im Anhang 10.4). Gemäß dem vorliegenden Anwendungsszenario kann anschließend eine Entscheidung über die Auswahl des passenden Basiskonzepts (siehe Kapitel 4.4.2.5) sowie über die detaillierte Ausgestaltung der einzelnen Drapiereinheiten und der Trägerstruktur getroffen werden.

4.4.2.3 Absicherung mit Hilfe von Funktionsmustern

Da es sich bei den Montagewerkzeugen um neuartige Systeme mit hoher Komplexität handelt, werden zunächst Funktionsmuster umgesetzt, welche bereits über den vollen Funktionsumfang verfügen, jedoch im Vergleich zum angestrebten Montagewerkzeug eine vereinfachte, auf funktionsrelevante Bestandteile reduzierte Ausführungsvariante darstellen. Die Funktionsmuster fungieren als

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

flexible Entwicklungsplattform, um die eingesetzte Wirkstruktur zu erproben. Durch realitätsnahe Vorversuche kann der kostenintensive und risikobehaftete Entwicklungsprozess bei der Umsetzung eines Montagewerkzeuges abgesichert werden, wertvolles Erfahrungswissen in den nachfolgenden Konstruktionsprozess einfließen und diesen beschleunigen. Zur Absicherung der in Abbildung 39 dargestellten Basiskonzepte ist eine möglichst repräsentative und auf funktionsrelevante Alleinstellungsmerkmale reduzierte Umsetzungsvariante der Funktionsmuster angestrebt. Stellvertretend für die Basiskonzepte wird daher zum einen ein Ausschnitt eines Zylindersegments und zum anderen die Eckkammer des modifizierten Reuleaux-Dreiecks realisiert (siehe Abbildung 40).

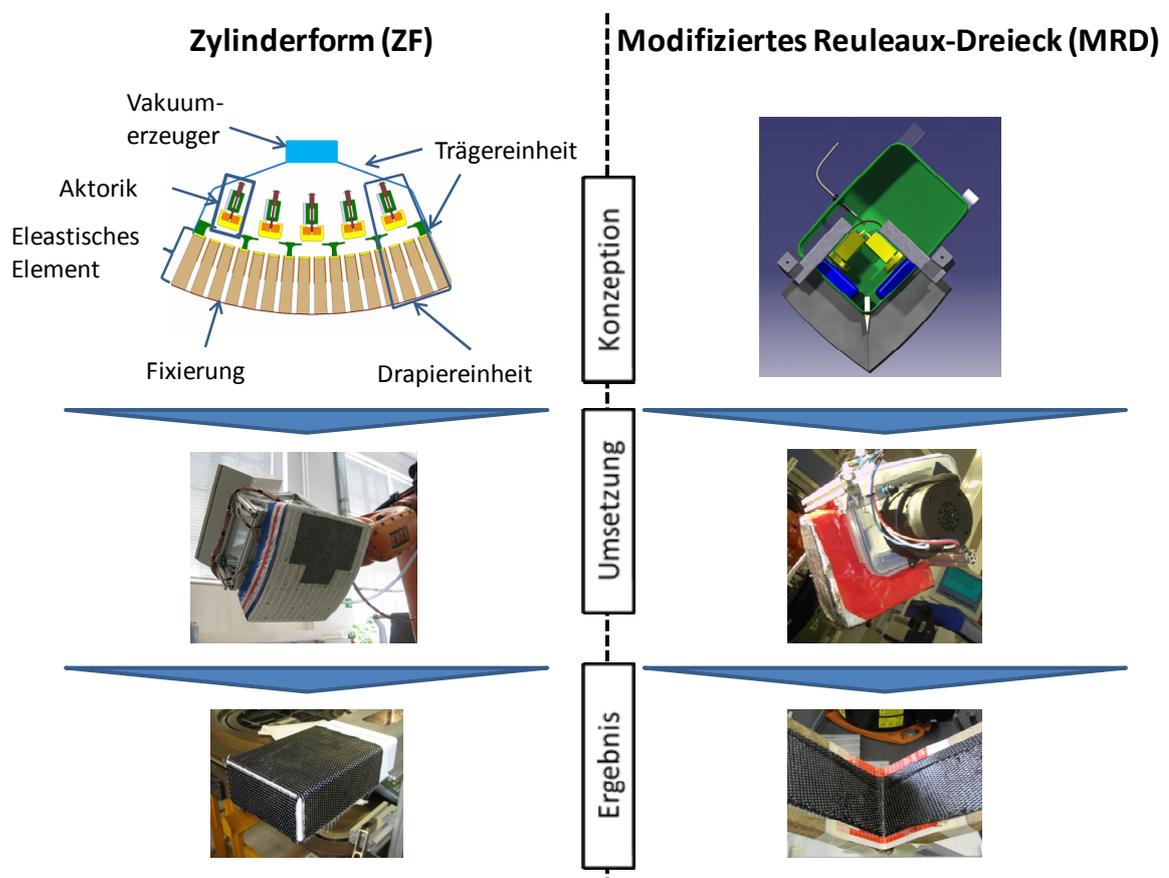


Abbildung 40: Umgesetzte Funktionsmuster für das Basiskonzept Zylinderform (links) und modifiziertes Reuleaux-Dreieck (rechts)

Bei der Umsetzung der Funktionsmuster wird besonderen Wert auf einen modularen Aufbau gelegt, da dadurch das Zusammenspiel der Wirkprinzipien frühzeitig erprobt sowie einzelne Bestandteile bedarfsorientiert gewechselt und optimiert werden können. Als Umsetzungsvariante für die selektive Greiffunktionalität werden einzelne Saugkammern über bistabile Hubmagneten individuell verschlossen bzw. geöffnet. Durchgangsbohrungen im hitzebeständigen, elastischen

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Schaumstoffelement leiten den Luftstrom zum Vakuumerzeuger, so dass über dem Textil der zum Greifen notwendige Differenzdruck erzeugt werden kann. Ein gezieltes Heizen von einzelnen Textildbereichen wird durch geregelte Widerstandsheizfelder auf der Oberfläche des Funktionsmusters realisiert, welche einen selektiv aktivierbaren Saugbereich bedecken.

Mit Hilfe der Funktionsmuster können orientierende Vorversuche zur Absicherung der prinzipiellen Grundfunktion durchgeführt werden (LINDEMANN 2005). Zudem ist es möglich, wichtige Prozessparameter (Differenzdruck, Heizzeit, Heizdauer etc.) zu erfassen, um unter der Annahme der Parametrierbarkeit eine schnelle Inbetriebnahme der relevanten Einstellgrößen beim prototypischen MWZ vorzunehmen. Die Funktionsmuster werden anhand von repräsentativen Bauteilgeometrien getestet (siehe Kapitel 5.2.2). Mit allen vier Referenzmaterialien kann ein prozesssicheres Greifen und eine positionsgenaue und zerstörungsfreie Fixierung des Textils auf dem Formwerkzeug erreicht werden, so dass von einer Skalierbarkeit der Ergebnisse auf das angestrebte Montagewerkzeug ausgegangen werden kann.

4.4.2.4 Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Montagewerkzeuges

Für die Auswahl eines Montagewerkzeuges, welches auf das vorliegende Anwendungsszenario abgestimmt ist, ist es wichtig den Leistungsbereich potenzieller Montagewerkzeuge zu kennen. Hierbei gilt es zu bewerten, in welcher Qualität die identifizierten Geometriemerkmale und deren Ausprägungsstufen (siehe Abbildung 32 und Tabelle 3) drapiert werden können. Anhand von prototypischen Hilfsaufbauten oder bestehenden Merkmalsausprägungen an den vorhandenen Formwerkzeugen ist es möglich, Versuche zur Bestimmung der Drapierqualität mit existierenden Montagewerkzeugen oder Funktionsmustern durchzuführen (siehe Abbildung 41). Bei Bedarf müssen dabei die im Vorfeld festgelegten Merkmalsgrenzen angepasst und eine feinere bzw. gröbere Auflösung der Intervalle gewählt werden. Falls keine praktische Untersuchung der Leistungsfähigkeit möglich ist, wird durch die subjektive Abschätzung der voraussichtlichen Drapierqualität zunächst eine Arbeitsannahme getroffen, welche anhand von späteren Versuchen verfeinert und detailliert wird.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

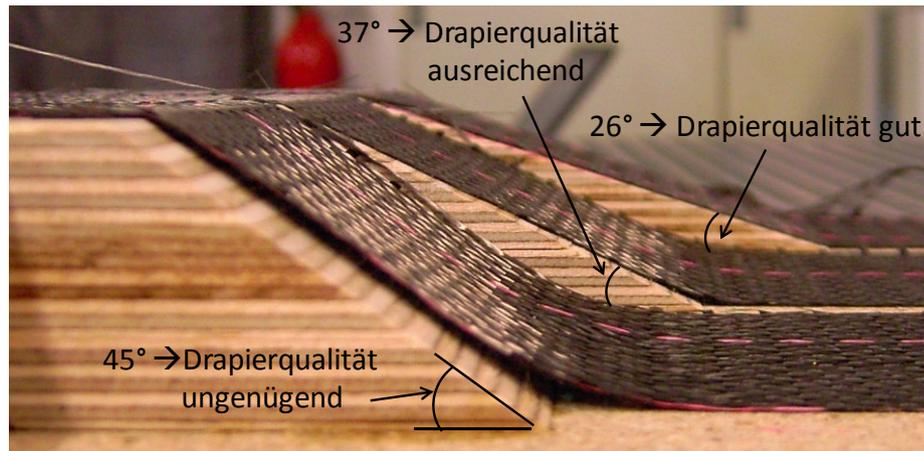


Abbildung 41: Exemplarische Drapierversuche an einem Hilfsaufbau zur Bewertung des Geometriemerkmals "Winkel der 3D-Lage"

Die Bewertung der erreichten Drapierqualität erfolgt anhand der Werteskala gemäß der VDI 2225. Die einzelnen Bewertungsstufen sind sowohl durch Punkte als auch verbal definiert und klar voneinander abgegrenzt. Mit der Bewertung der Drapierqualität wird die Eignung eines Montagewerkzeuges für das untersuchte Spektrum an Geometriemerkmale festgelegt. Die Bewertung wurde für die Basiskonzepte „Zylinderform“ und „Modifiziertes Reuleaux-Dreieck“ durchgeführt (siehe Anhang 10.5), so dass sich die erreichte Drapierqualität und damit die Leistungsfähigkeit der beiden Konzepte in die übersichtliche Darstellungsform eines Netzdiagramms überführen lassen (siehe Abbildung 42).

Das Netzdiagramm dient dazu, auf übersichtliche Weise die Leistungsfähigkeit eines Montagewerkzeuges im Hinblick auf Ausprägungsstufen vorkommender Geometriemerkmale darzustellen. Das erstellte Netzdiagramm kann durch weiterführende Versuche ständig erweitert und verfeinert werden, so dass mit der Zeit eine solide Datenbasis zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines MWZ zur Verfügung steht. Diese anschauliche Darstellungsform, welche für alle potenziellen Automatisierungslösungen angewandt werden kann, ist die Grundlage für die nachfolgende Auswahl eines geeigneten Montagewerkzeuges.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

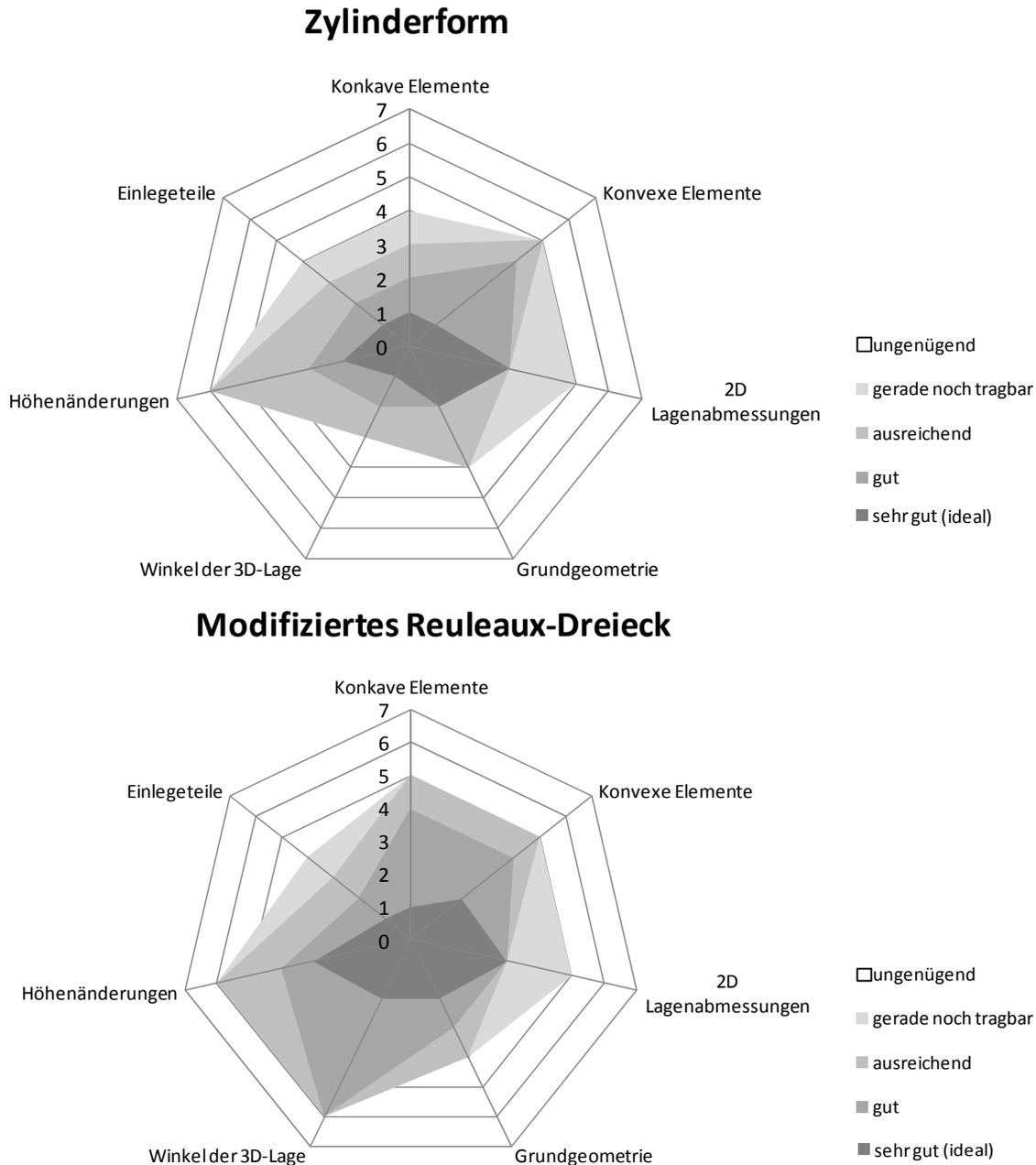


Abbildung 42: Netzdiagramm zur Veranschaulichung der geometrischen Leistungsfähigkeit der Basiskonzepte

4.4.2.5 Auswahl eines passenden Montagewerkzeuges

Für eine automatisierte Erstellung des Lagenaufbaus besteht aus Anwendersicht das Ziel, aus der Vielzahl an bestehenden Automatisierungsmöglichkeiten diejenige umzusetzen, welche für das vorliegende Anwendungsszenario am besten geeignet ist. Ein zweistufiges Vorgehen bildet hierbei die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines Montagewerkzeuges.

1. Diagrammabgleich

Im ersten Schritt erfolgt die Korrelation zwischen der Leistungsfähigkeit der Montagewerkzeuge und dem Lagenaufbau einer Preform. Hierzu wird das Netzdiagramm, welches die Leistungsfähigkeit eines Montagewerkzeuges beschreibt (siehe Abbildung 42), dem Netzdiagramm, welches die auftretenden Merkmalsausprägungen aller zu drapierenden Einzellagen enthält, überlagert. Liegen alle Geometriemerkmale der Einzellagen im Bereich einer mindestens ausreichenden Drapierqualität, so kann das Montagewerkzeug für eine Automatisierung des Lagenaufbaus zum Einsatz kommen, ohne dass Modifikationen oder Zusatzuntersuchungen notwendig sind (siehe Abbildung 43).

2. Analyse der Randbereiche

Sind hingegen einzelne Merkmale im Bereich gerade noch tragbarer oder ungenügender Drapierqualität angesiedelt (siehe Markierung in Abbildung 43), so ist eine gesonderte Betrachtung der Merkmalsausprägungen in den Randbereichen des Leistungsspektrums notwendig.

Bei dem Leistungsbereich „gerade noch tragbar“ handelt es sich um einen Grenzbereich, dessen real vorliegende Drapierqualität am Anwendungsszenario nochmals gezielt untersucht werden muss. Dazu werden praktische Drapierversuche (z. B. mit Hilfe von Funktionsmustern) mit der betroffenen Einzellage am Anwendungsszenario durchgeführt und die erreichte Drapierqualität von Experten bewertet. Wird das Drapierergebnis als ungenügend eingestuft oder liegen weitere Geometriemerkmale im Leistungsbereich „ungenügend“, so kann das Leistungsspektrum des betrachteten Montagewerkzeuges durch den ergänzenden Einsatz von speziellen Nachdrapierwerkzeugen gezielt erweitert werden. Ausgehend vom bereits fixierten Bereich des Zuschnittes wird dabei das Textil durch das Nachdrapierwerkzeug verformt und positionsgenau fixiert. Dadurch ist es möglich, bestehende Defizite auszugleichen und auch Geometriemerkmale außerhalb des Leistungsspektrums automatisiert zu drapieren. Die Gestaltung der notwendigen Nachdrapierwerkzeuge richtet sich dabei nach den Anforderungen der Geometriemerkmale und muss folglich individuell und situationsangepasst vorgenommen werden. Beispiele für mögliche Nachdrapierwerkzeuge finden sich im Anhang 10.6. Abbildung 43 stellt exemplarisch die Erweiterung des Leistungsbereiches des zylinderförmigen MWZ durch den Einsatz eines Nachdrapierwerkzeuges für das Geometriemerkmal „Winkel der 3D-Lage“ dar.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

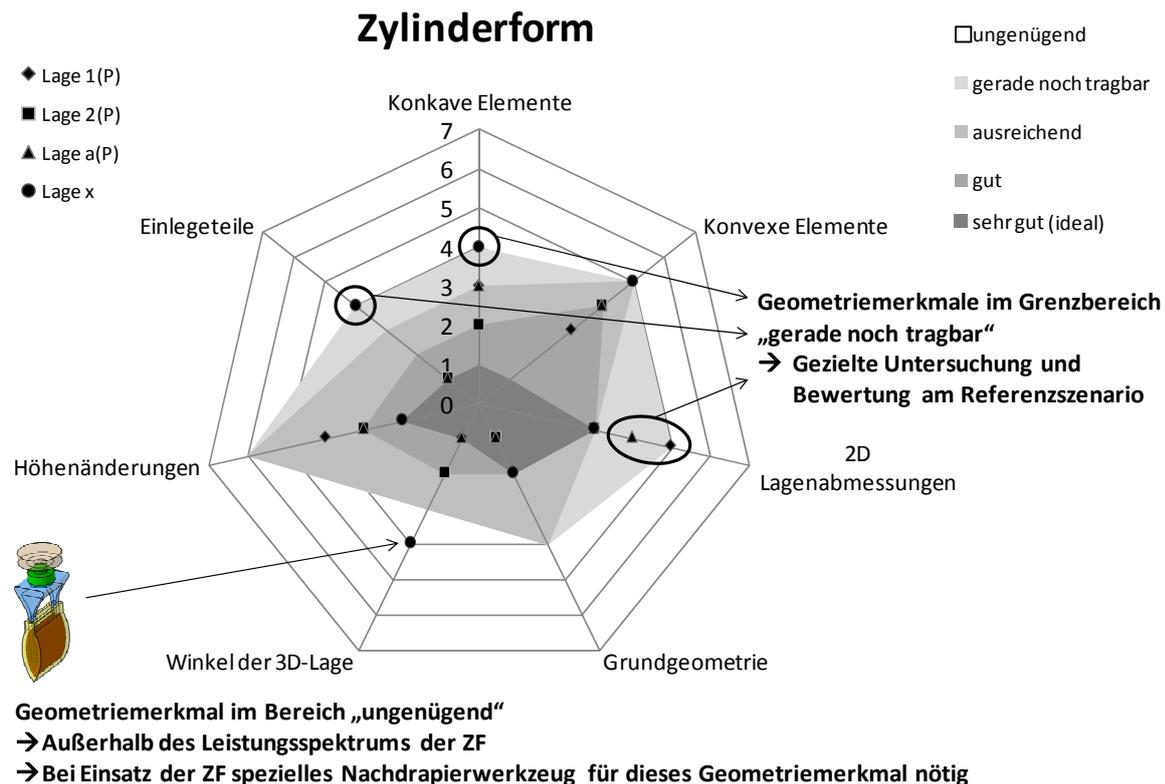


Abbildung 43: Erweiterung des Drapierbereichs mit Hilfe eines Nachdrapierwerkzeuges

4.4.3 Festlegung der Drapierstrategie

Allgemeines

Bei der Auslegung und Erstellung des Lagenaufbaus wird der Konstrukteur durch spezielle Softwarewerkzeuge (z. B. FiberSIM, CATIA Composite Design, Laminate Tools) unterstützt. Aus der räumlichen Schicht des Lagenaufbaus leitet sich anschließend die ebene Schneidgeometrie der Zuschnitte ab (MEUNIER & KNIBBS 2007). Bei ebenen oder einfach gekrümmten Bauteiloberflächen kann die Schneidgeometrie durch eine Abwicklung der Zuschnitte erzeugt werden. Bei komplexeren Bauteilen mit Freiformflächen hingegen ist zur Ermittlung der Schneidgeometrie eine Simulation des Drapiervorgangs notwendig, bei der die individuellen Drapiereigenschaften der verwendeten Halbzeuge durch FEM-Modelle abgebildet und die Verzerrungen und Spannungen der Fasern berechnet werden. Die abgeleitete Schneidgeometrie wird dabei von der Art des eingesetzten Halbzeugmaterials, der Orientierung der Lagenrichtungen und der in der Simulation verwendeten Drapierstrategie beeinflusst. Die Drapiersimulation umfasst u. a. zwei gängige Drapierstrategien, welche in Abbildung 44 dargestellt sind. Als Drapierstrategie wird dabei das Vorgehen zum

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Ablegen von CF-Zuschnitten auf dem Formwerkzeug durch eine systematische Anordnung von Bewegungsabfolgen verstanden.

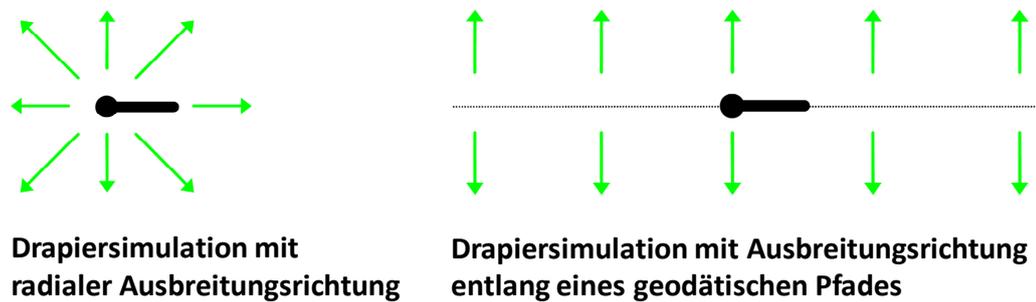


Abbildung 44: Methoden zur Drapiersimulation (VISTAGY 2009)

Die links dargestellte Drapiersimulation berechnet die textile Verformung, wenn die Lage an einer definierten Position abgelegt und von dort aus strahlenförmig nach außen ausgestrichen wird. Im Gegensatz dazu berechnet die rechts dargestellte Drapiersimulation die Textilverformung entlang eines geodätischen Pfades, von dem ausgehend die Berechnung lotrecht nach außen fortgesetzt wird. Auch in anderen Literaturstellen wird eine Drapierstrategie empfohlen, welche ausgehend von einem definierten Kontaktpunkt oder einer Fläche das Textil in mehreren Drapierabfolgen sukzessive verformt (siehe Abbildung 45) (WANG J. ET AL. 1999, HANCOCK & POTTER 2006).

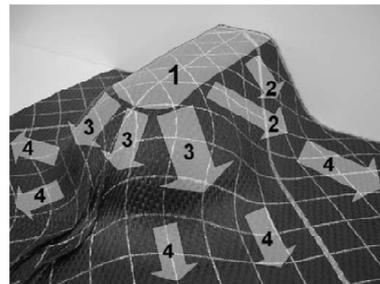


Abbildung 45: Mehrstufige Drapierstrategie an einem Beispielbauteil (HANCOCK & POTTER 2006)

In HANCOCK & POTTER (2006) wird desweiteren ein Simulationstool vorgestellt, welches ausgehend vom berechneten Verzug von Kett- und Schussfaden mögliche Drapiersequenzen vorschlägt. Nach der initialen Fixierung werden zunächst stark deformierte Bereiche drapiert, wobei für eine konkave Textilverformung eine lokale Kraft aufgebracht werden muss. Für ein gutes Drapiererergebnis empfiehlt WANG J. ET AL. (1999) weiterhin, einen Verzug der Faserstruktur durch Scherspannungen insbesondere auf großflächigen Bauteilbereichen zu vermeiden.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Drapierstrategien für den Einsatz eines automatisierten Montagewerkzeugs

Der Einsatz von Montagewerkzeugen zum automatisierten Drapieren von Zuschnitten erfordert ebenfalls den Einsatz von Drapierstrategien. Um auch beim automatisierten Prozess eine hohe Bauteilqualität zu erreichen, lehnen sich diese an den manuellen Drapierprozess an. Gesammeltes Erfahrungswissen und wichtige Erkenntnisse aus manuellen Drapierstrategien werden daher soweit wie möglich auch in den automatisierten Prozess eingebunden.

Durch das Abrollen der Montagewerkzeuge auf der Oberfläche der Formwerkzeuge entsteht eine fortschreitende linienförmige Ausstreichbewegung, die die Gefahr von Faltenbildung und Lufteinschlüssen deutlich verringert und zugleich den manuellen Ausstreichprozess nachbildet. Analog zur manuellen Drapierstrategie erfolgt die Verformung des Textils in einem mehrstufigen, iterativen Prozess. Ausgehend von einer initialen Fixierung des Textils, welche in einer primären Legekurve des Montagewerkzeuges erfolgt, kann das Textil sukzessive in mehreren sekundären Legekurven verformt und positionsgenau fixiert werden. Um Scherspannungen zu vermeiden, ist es vorteilhaft, die primäre Legekurve so zu wählen, dass eine möglichst großflächige Fixierung des Textils entlang der Faserstruktur erfolgt. An den bereits fixierten Bereich schließen sich die sekundären Legekurven an. Die Legekurven können individuell vom Anwender festgelegt und bei Änderungsbedarf entsprechend angepasst werden. Durch die hohe Flexibilität bei der Wahl der Bewegungsabfolgen ist es möglich, bestehendes Erfahrungswissen und Prozess-Knowhow im automatisierten Drapierprozess abzubilden. Ein zusätzlicher Freiheitsgrad entsteht durch die elastische Drapiersicht, welche auf der Bauteiloberfläche eine individuelle Kompression während des Abrollprozesses ermöglicht. Abbildung 46 zeigt beispielhaft einen mehrstufigen Drapierprozess bestehend aus einer großflächigen primären Legekurve (1) und zwei sekundären Legekurven (2, 3).

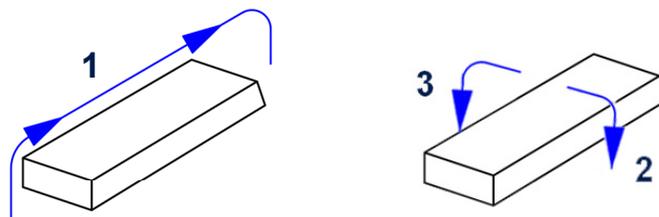


Abbildung 46: Mehrstufige Drapierstrategie am Beispiel des Referenzbauteils Diaphragm

4.4.4 Aufgabenspezifische Gestaltung eines Montagewerkzeuges

Mit Hilfe der in Kapitel 4.4.2.5 beschriebenen Vorgehensweise kann im Hinblick auf das vorliegende Anwendungsszenario das passende Basiskonzept ausgewählt werden. Zur Verkürzung der Entwicklungszeiten ist eine effiziente Vorgehensweise notwendig, welche es dem Konstrukteur ermöglicht, zügig und anforderungsgerecht eine detaillierte Ausgestaltung des Montagewerkzeuges vorzunehmen. Dabei haben verschiedenste Einflussgrößen des Anwendungsszenarios eine direkte Auswirkung auf die Auslegung der Einzelkomponenten des Montagewerkzeuges. Eine aufgabenspezifische Gestaltung des Montagewerkzeuges ist daher für eine Bewältigung des komplexen Drapierprozesses unerlässlich. Hierfür kommt ein dreistufiges Vorgehen zum Einsatz:

1. Auslegung der Werkzeuggeometrie
2. Auslegung der integrierten Teilfunktionen
3. Feinauslegung und Optimierung durch Analyse (z. B. FEM)

Zu 1.: Auslegung der Werkzeuggeometrie

Nach einer geometrischen Grobauslegung erfolgt mit zunehmendem Detaillierungsgrad die Feinauslegung des Montagewerkzeuges. Abbildung 47 gibt einen Überblick über die konsekutive Vorgehensweise der aufgabenspezifischen geometrischen Auslegung des Montagewerkzeuges.

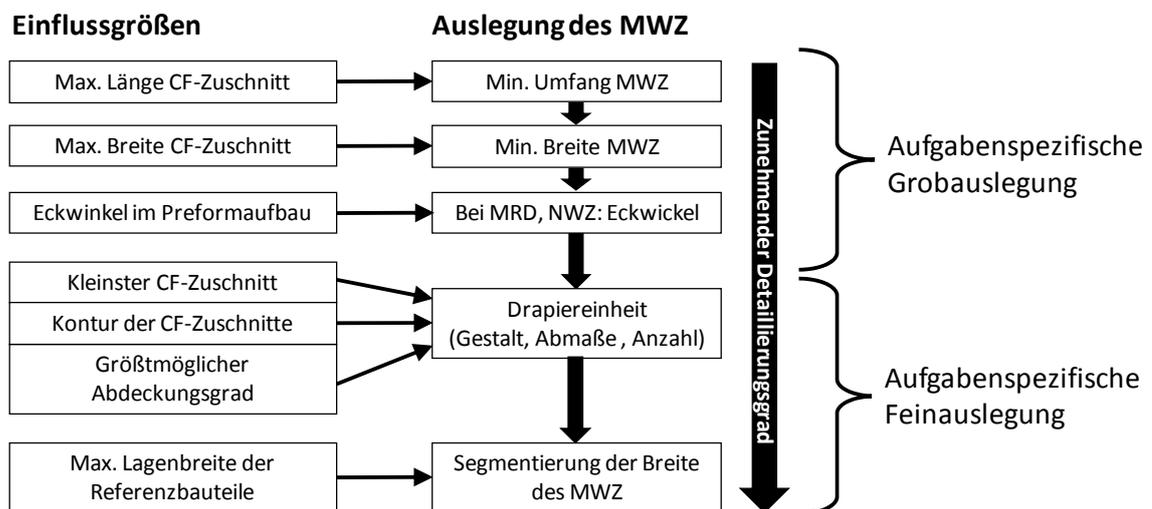


Abbildung 47: Vorgehen zur geometrischen Auslegung des Montagewerkzeuges

Bezugnehmend auf Abbildung 47 wird nachfolgend auf die einzelnen Teilschritte eingegangen. Die verwendeten Formelzeichen sind in Abbildung 48 anhand von beispielhaften Zeichnungen beschrieben.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

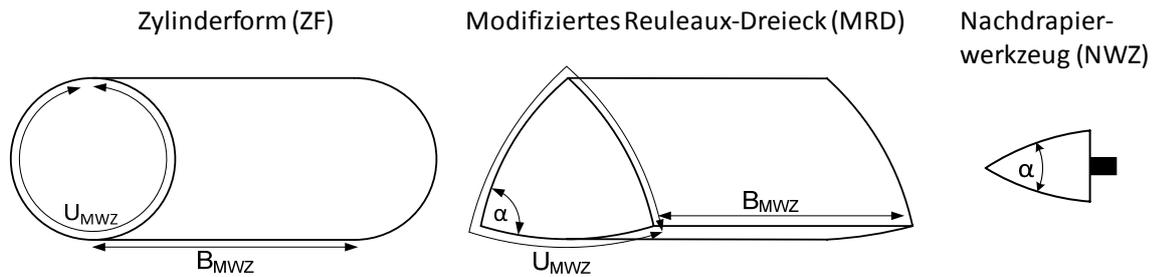


Abbildung 48: Geometrische Kenngrößen der Montagewerkzeuge

Minimaler Umfang des Montagewerkzeuges

Die maximal auftretende Textillänge l_{\max} muss am Umfang des Montagewerkzeuges U_{MWZ} gegriffen werden können. Es gilt daher:

$$U_{\text{MWZ}} \geq l_{\max} \quad (4-1)$$

Minimale Breite des Montagewerkzeuges

Die maximal auftretende Textilbreite b_{\max} muss mindestens der Breite des Montagewerkzeuges B_{MWZ} entsprechen:

$$B_{\text{MWZ}} \geq b_{\max} \quad (4-2)$$

Eckwinkel α (nur bei MRD oder Nachdrapierwerkzeug)

Für Winkel β im Preformaufbau, welche außerhalb der Leistungsfähigkeit des Montagewerkzeuges liegen, kommt eine Eckgeometrie zum Einsatz, welche entweder in ein MRD oder in ein Nachdrapierwerkzeug integriert ist. Für den Winkel α der Eckgeometrie muss daher gelten:

$$\alpha < \beta_{\min} \quad (4-3)$$

Auslegung der Drapiereinheit

Im ersten Schritt gilt es, die grundsätzliche Form der verwendeten Drapiereinheiten auszuwählen. Jede geöffnete Drapiereinheit, die bei dem Greifvorgang nicht vollständig mit einem Zuschnitt bedeckt ist, führt zu einem Fehlluftstrom, welcher den Druckabfall über dem Textil und somit auch die Haltekraft verringert. Der durchschnittliche Überdeckungsgrad \ddot{U}_0 der geöffneten Saugkammern stellt somit eine charakteristische Kenngröße dar. Zur Ermittlung von \ddot{U}_0 werden die

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Überdeckungsgrade der geöffneten Kammern \ddot{U}_{DE} addiert und anschließend durch die Anzahl der geöffneten Kammern n_{DE} dividiert. Der Überdeckungsgrad einer geöffneten Kammer \ddot{U}_{DE} ist durch das Verhältnis der Fläche des CF-Textils auf der Drapiereinheit $A_{CF,DE}$ zur Fläche einer Drapiereinheit A_{DE} charakterisiert.

$$\ddot{U}_{\phi} = \frac{\sum \ddot{U}_{DE}}{n_{DE}} \text{ mit } \ddot{U}_{DE} = \frac{A_{CF,DE}}{A_{DE}} \quad (4-4)$$

Durch eine geschickte Anordnung der Zuschnitte auf der Mantelfläche und eine Verkleinerung der Drapiereinheiten unter Berücksichtigung des steigenden Komplexitätsgrades (z. B. Ansteuerung, kleinerer Bauraum etc.) kann der durchschnittliche Überdeckungsgrad erhöht werden (siehe Abbildung 49).

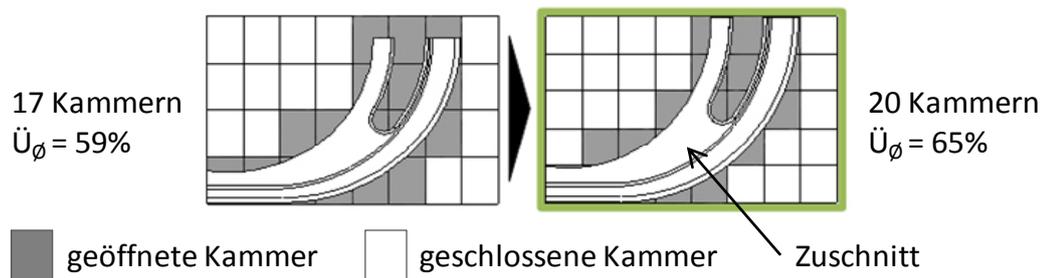


Abbildung 49: Steigerung des durchschnittlichen Überdeckungsgrades während des Greifvorgangs durch Verringerung der Kammerngröße

Die Optimierungsaufgabe zur Maximierung des durchschnittlichen Überdeckungsgrades wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

Segmentierung der Breite des Montagewerkzeuges

Um sich an verschiedene Preformgeometrien anzupassen, kann die Breite des Montagewerkzeuges B_{MWZ} in Segmente unterteilt werden, so dass eine individuelle Konfiguration der Werkzeugbreite und eine Reduktion des zu bewegenden Gewichtes möglich ist. Durch die Adaption der Werkzeugbreite bei kleinen Preformaufbauten werden zudem der Platzbedarf und damit auch die Kollisionsgefahr während des Drapierprozesses verringert.

Zu 2.: Auslegung der integrierten Teilfunktionen

Im Anschluss erfolgt die Auslegung der integrierten Teilfunktionen (siehe Abbildung 37). Die Teilschritte bei der Auslegung sowie auftretende Einflussgrößen sind in Abbildung 50 dargestellt und nachfolgend erläutert.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

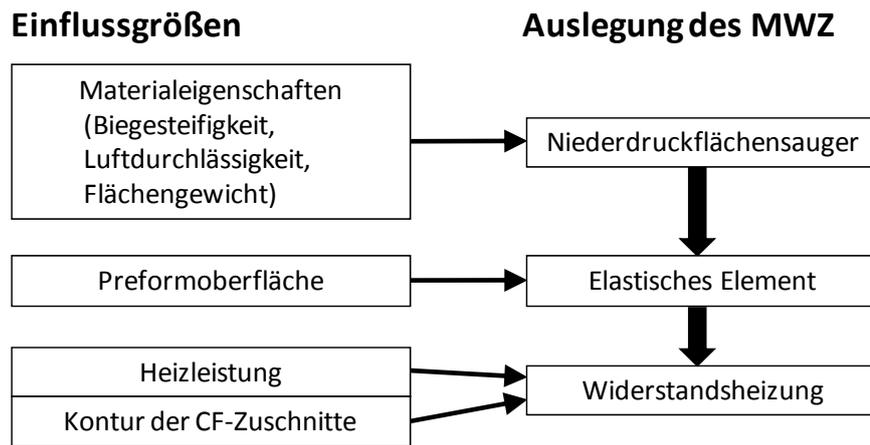


Abbildung 50: Vorgehen bei der Auslegung der integrierten Teilfunktionen

Auslegung des Niederdruckflächensaugers

Bohrungsabstand, -durchmesser und -muster des Niederdruckflächensaugers müssen derart ausgelegt werden, dass alle vorkommenden Materialien prozesssicher und ohne Beulenbildung gegriffen werden können. Auf Basis der relevanten Materialkennwerte Luftdurchlässigkeit, Flächengewicht und Biegesteifigkeit erfolgt die Auslegung des Niederdruckflächensaugers und des Vakuumerzeugers. Übertragbare Hinweise zur Gestaltung des Greifsystems finden sich in MONKMAN (2007) und STRABER (2012).

Auslegung des elastischen Elements

Das elastische Element muss in der Lage sein, Unebenheiten auf dem Formwerkzeug auszugleichen. Die maximale Oberflächenerhöhung x des Formwerkzeuges, die in einer ebenen Roboterbahn überfahren werden soll, bestimmt dabei die notwendige Kompressionsfähigkeit und Höhe der elastischen Schicht (siehe Abbildung 51).

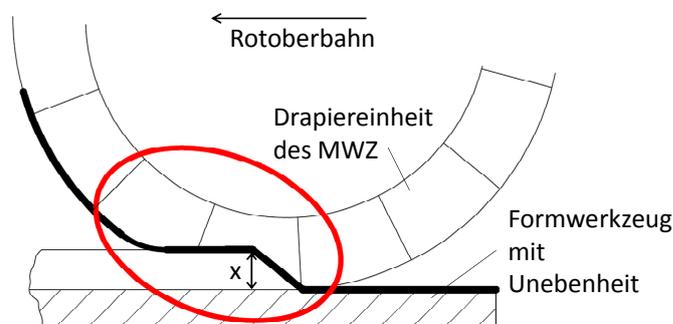


Abbildung 51: Kompression der elastischen Schicht bei Unebenheiten

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Die Oberfläche des elastischen Elements kann entsprechend den vorkommenden Zuschnitten und Formwerkzeugoberflächen individuell gestaltet werden. Bei der Materialauswahl gilt es, auftretende Prozessbedingungen zu berücksichtigen, so dass sich luftdurchlässige Materialien mit geringer Partikelemission, hoher Temperaturbeständigkeit und Strukturstabilität als besonders geeignet erweisen.

Auslegung der Widerstandsheizung

Die Ausgestaltung der Widerstandsheizung orientiert sich ebenfalls an den vorkommenden Zuschnittgeometrien und Formwerkzeugoberflächen. Wird eine höhere Auflösung der selektiven Heizfunktionalität benötigt, so kann bei Bedarf eine Drapiereinheit auch mehrere Heizfelder aufweisen. Auch hier muss ein Kompromiss zwischen Funktionalität und Komplexitätszuwachs gefunden werden. Für eine homogene und flächige Erwärmung des Textils ist ein möglichst enges Verlegen der Heizdrähte auf einem temperaturbeständigen und luftdurchlässigen Trägermaterial notwendig. Das Trägermaterial mit dem aufgebrauchten Heizdraht muss aufgrund der starken mechanischen Beanspruchung während des Drapierprozesses eine hohe Flexibilität, Robustheit und Temperaturbeständigkeit aufweisen. Die prozessspezifischen Anforderungen beeinflussen maßgeblich die Auslegung der benötigten Heizleistung. Dabei müssen die benötigte Schmelztemperatur und die vorgegebene Prozesszeit bei allen eingesetzten Materialien auch unter Einwirkung von Störeinflüssen (z. B. kühlender Luftstrom, Wärmeabfuhr über Formwerkzeug) prozesssicher eingehalten werden. Um dies zu erreichen, ist u. a. die Integration einer Sensorik zum Aufbau einer Temperaturregelung notwendig. Bei der direkten Temperaturmessung werden hochempfindliche Sensoren in die Heizfelder eingebracht. Bei der indirekten Methode hingegen kann über die temperaturabhängige Widerstandsänderung des Heizdrahtes die durchschnittliche Temperatur ermittelt werden, so dass der Einsatz von spezieller Sensorik entfällt.

Zu 3.: Feinauslegung und Optimierung durch FEM-Analyse

Das Berechnungsverfahren der Finiten Elemente Methode (FEM) dient zur Feinauslegung und konzeptionellen Optimierung des Montagewerkzeuges. Durch strukturmechanische Berechnungen können Festigkeitsuntersuchungen (z. B. auftretende Spannungen und Verformungen bei Belastung) vorgenommen werden und eine gewichtsoptimierte Konstruktion umgesetzt werden. Der Aufbau geeigneter Simulationsmodelle ermöglicht die Analyse der Strömungseigenschaften des unterdruckbasierten Greifsystems sowie eine strömungsgünstige Auslegung der Teilmodule und deren Komponenten.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

4.4.5 Festlegung der Anlagenperipherie

Im Anschluss an die aufgabenspezifische Ausgestaltung des Montagewerkzeuges gilt es, die notwendige Anlagenperipherie für eine automatisierte Preformfertigung zu planen. Falls es sich dabei nicht um einen kompletten Neuentwurf handelt, müssen vorhandene Restriktionen und Abläufe der bestehenden Produktionsumgebung bei der Planung berücksichtigt werden. Ziel ist es, durch das in Abbildung 52 dargestellte Vorgehen eine passende Auslegung und eine reibungslose Umsetzung der automatisierten Anlage zu ermöglichen, Nebenprozesse (Materialbereitstellung, Logistik, Positionierung der Formwerkzeuge etc.) frühzeitig einzubinden und somit die Inbetriebnahmezeit zu verkürzen.

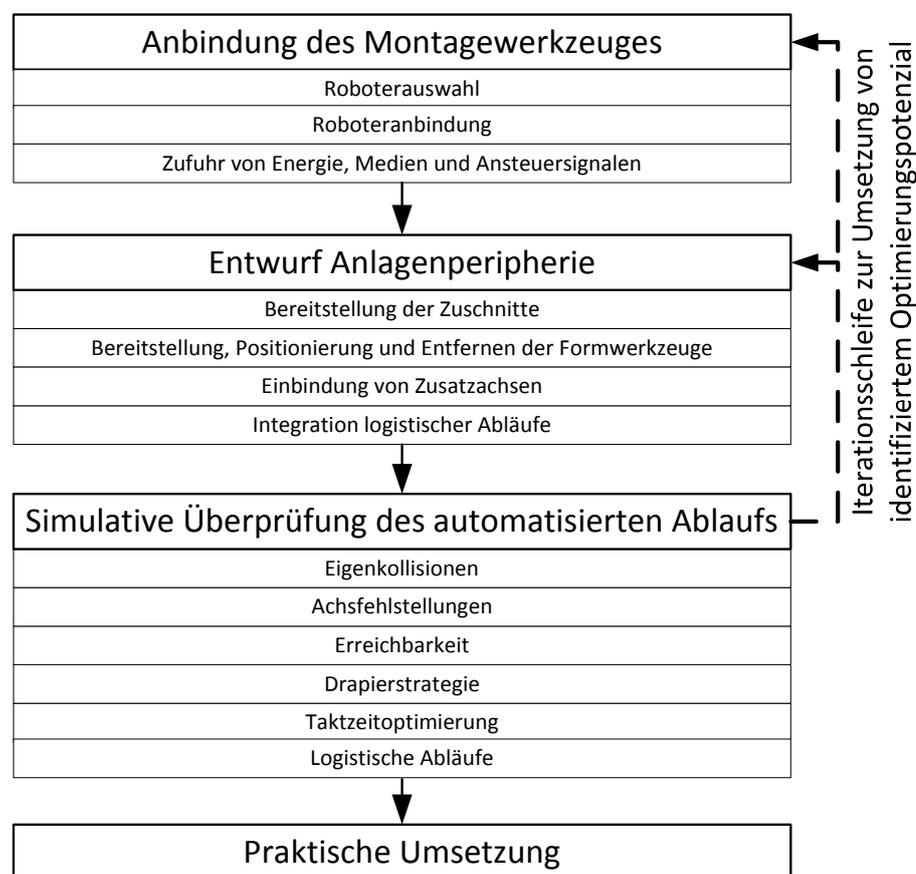


Abbildung 52: Vorgehen zur Festlegung der Anlagenperipherie

Zunächst erfolgt die Detaillierung der Anbindung an das kinematische Trägersystem und der Medienversorgung des Montagewerkzeuges. Da für den Drapierprozess komplexe kinematische Bewegungsabläufe des Montagewerkzeuges erforderlich sind, empfiehlt sich der Einsatz eines Industrieroboters. Dieser kann individuell programmiert und gut in automatisierte Prozessketten

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

eingebunden werden, so dass eine deutliche Effizienzsteigerung gegenüber manuellen Preforming-Prozessen erreicht werden kann.

Für einen ganzheitlichen Systementwurf muss auch die notwendige Anlagenperipherie in die Planung einbezogen werden. Die Ausgestaltung der automatisierten Prozesskette mit den notwendigen vor- und nachgelagerten Tätigkeiten steht dabei im Fokus der Betrachtung. Hierbei gilt es, geeignete Systeme für anfallende Nebentätigkeiten (z. B. Zufuhr, Bereitstellung, Positionierung, Transport der Zuschnitte und Formwerkzeuge) auszuwählen und in ein logistisches Gesamtkonzept zu integrieren. Zur Planung der Drapieraufgabe ist es erforderlich, zunächst die in der Drapierstrategie definierte Legerichtung der Einzellagen auf dem Formwerkzeug (FWZ) zu kennen. Unter Berücksichtigung der Reichweite, der Kollisionsfreiheit und der Achsstellungen des Industrieroboters wird anschließend die Positionierung des Formwerkzeuges in der Versuchsumgebung und des Zuschnitts auf der Oberfläche des Montagewerkzeuges bestimmt. Aus diesen Angaben kann dann die notwendige Orientierung und Position der bereitgestellten Zuschnitte auf dem Aufnahmetisch ermittelt werden. Der Ablauf bei der Prozessplanung sowie auftretende Einflussgrößen sind in Abbildung 53 zusammengefasst.

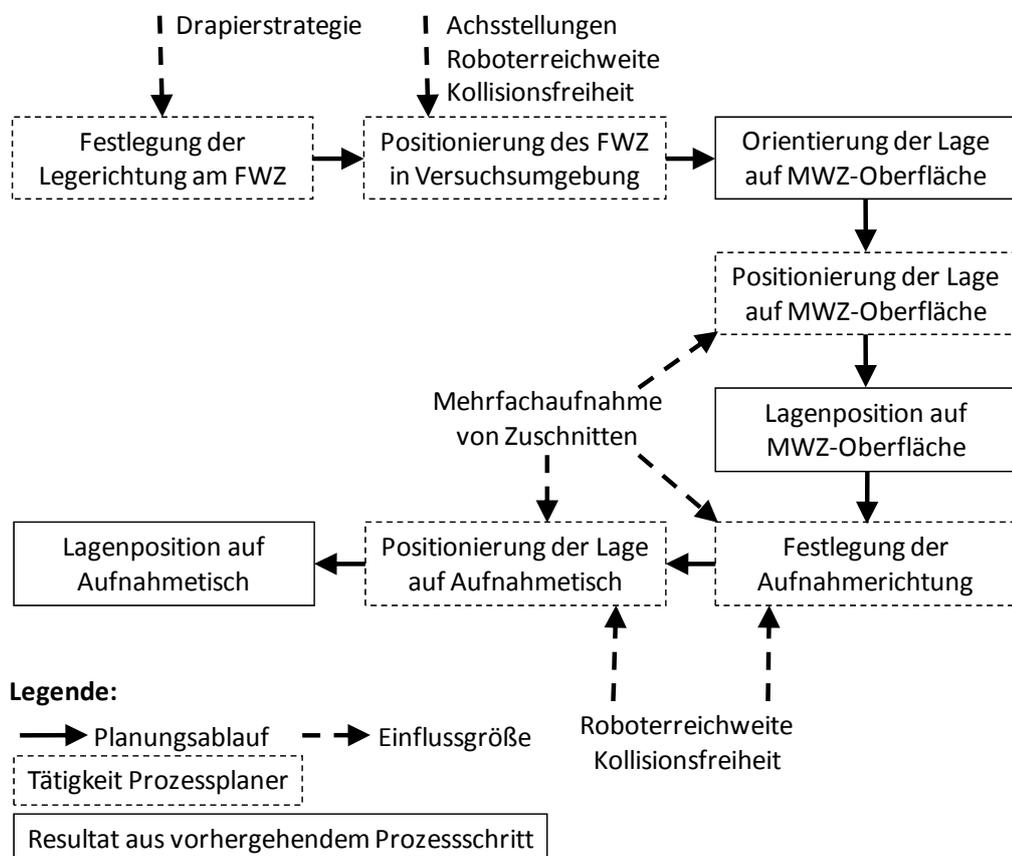


Abbildung 53: Ablauf bei der Planung der Lagenablage und -aufnahme

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Für eine reibungslose Umsetzung des automatisierten Prozessablaufs wird der erarbeitete Systementwurf, welcher neben der Kinematikeinheit und dem Montagewerkzeug auch alle beteiligten Komponenten der Anlagenperipherie beinhaltet, in einer Simulationsumgebung abgebildet. Ziel ist es, durch eine simulative Überprüfung des geplanten Bewegungsablaufes Optimierungspotenziale frühzeitig zu erkennen und in den Planungsprozess einfließen zu lassen. In der Simulation können die vorgesehenen Drapierstrategien (siehe Kapitel 4.4.3) unter Berücksichtigung der Reichweite und Achsbeschränkungen überprüft sowie Lösungsansätze zur Kollisionsvermeidung und Taktzeitoptimierung erarbeitet werden. Die korrekte Positionierung und Abstimmung aller beteiligten Einzelkomponenten steht dabei im Fokus der Analyse. Durch die Simulation können aber auch Verbesserungsmaßnahmen identifiziert werden, welche Rücksprünge in vorhergehende Planungsphasen erfordern, da einzelne Komponenten überarbeitet oder funktional erweitert werden müssen (z. B. Roboter mit verlängerter Reichweite, Einbindung von Zusatzachsen). In einem iterativen Verbesserungsprozess entsteht somit durch die simulative Absicherung ein optimierter Systementwurf, welcher eine schnelle und risikoarme Umsetzung des automatisierten Prozessablaufs und dessen Einbindung in die bestehende Produktionsumgebung ermöglicht.

4.5 Vorgehen zur rechnergestützten Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges

4.5.1 Notwendigkeit der aufgabenorientierten Bahnplanung

Die linienförmige Ausstreichbewegung der Drapierstrategie erfordert die Realisierung einer Abrollbewegung und somit eine komplexe Bahnprogrammierung des Montagewerkzeuges. Kommt dabei ein explizites Programmierverfahren zum Einsatz, müssen alle Bewegungspunkte manuell eingelernt werden. Dieses Vorgehen weist jedoch zahlreiche Defizite auf, welche den Einsatz des Montagewerkzeuges unwirtschaftlich und ineffizient werden lassen. Der Einlernprozess gestaltet sich insbesondere bei einem variantenreichen Bauteilportfolio mit Lagenzuschnitten, welche in einer mehrstufigen Drapierstrategie gelegt werden (siehe Abbildung 46), äußerst langwierig und aufwändig. Nur mit sehr guten Vorkenntnissen und Erfahrung im Bereich der Roboterprogrammierung kann eine Bahn generiert werden, welche den hohen Qualitätsansprüchen des Drapierprozesses gerecht wird. Aufgrund der Komplexität des Bewegungsablaufes

und der Gestalt des Montagewerkzeuges, welche eine optische Kontrolle erschwert, können zudem mehrere Anläufe notwendig sein, bis das Textil in einer passenden Abrollbewegung ohne Beschädigung auf der Sollposition abgelegt und fixiert werden kann.

Durch die Nachteile eines manuellen Einlernprozesses könnte die industrielle Akzeptanz für den praktischen Einsatz eines Montagewerkzeuges zur Automatisierung des Preformaufbaus sinken. Das notwendige Ziel ist es daher, durch den Entwurf einer aufgabenorientierten Bahnplanung die Generierung der Roboterbahn und der notwendigen Ansteuerbefehle in einer höheren Abstraktionsebene durchzuführen (WEBER 2009). Der Bediener definiert dabei in einer Planungsumgebung auf Basis der festgelegten Drapierstrategie die individuelle Legeaufgabe des jeweiligen Zuschnittes. Über eine graphische Benutzeroberfläche kann die Legeaufgabe dabei intuitiv konfiguriert und umgesetzt werden, wobei zur Bahnplanung und Ansteuerung keine genauen Kenntnisse der verwendeten Roboterprogrammiersprache notwendig sind (KUGELMANN 1999). Das automatisch generierte Roboterprogramm kann zunächst in einer realitätsgetreuen Simulationsumgebung getestet werden, während der reale Roboter für produktive Tätigkeiten eingesetzt wird. Die Visualisierung der Roboterbewegung ermöglicht eine frühzeitige Einschätzung der Qualität des Drapierprozesses sowie eine Überprüfung im Hinblick auf Kollisionen und Erreichbarkeiten. Nachträgliche Korrekturen im Bewegungsablauf oder bei prozessrelevanten Parametern (z. B. Stauchung der elastischen Schicht) können dabei im Planungssystem vorgenommen werden, so dass eine komfortable Möglichkeit geschaffen wird, Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen und menschliches Erfahrungswissen an relevanten Stellen des Drapierprozesses abzubilden. Um die generierten Roboterbahnen sofort überprüfen zu können, sollten die aufgabenorientierte Bahnplanung und die Prozesssimulation (siehe auch Kapitel 4.4.5) aus Effizienzgründen in der gleichen Entwicklungsumgebung durchgeführt werden. Das finale Programm kann dann auf die reale Robotersteuerung übertragen und in der Versuchsumgebung getestet werden. Zur Realisierung einer aufgabenorientierten Bahnplanung werden die bestehenden Fertigungsdaten und die lagenspezifisch definierte Drapierstrategie in einer durchgängigen Prozesskette verarbeitet und somit mögliche Schnittstellenprobleme vermieden.

4.5.2 Definition von Legekurven

Für eine Umsetzung der festgelegten Drapierstrategie (siehe Kapitel 4.4.3) müssen Geometriedaten erzeugt werden, welche für die anschließende Berechnung

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

der Aufnahme- und Legebewegung des Montagewerkzeuges in der aufgabenorientierten Bahnplanung weiterverarbeitet werden können. Die Drapierstrategie wird dafür in einer CAD-Umgebung in Legekurven überführt, welche auf der Bauteiloberfläche die Bahn zum Drapieren eines bestimmten Zuschnittes beschreiben (siehe Abbildung 54).

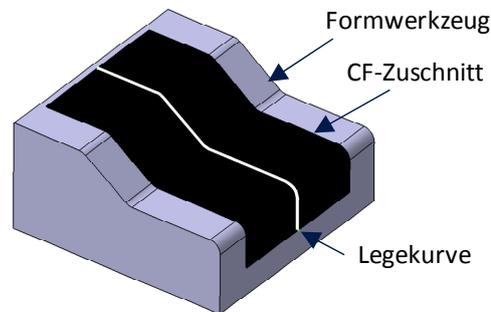


Abbildung 54: Schematische Darstellung einer Legekurve

Für die Erzeugung der Legekurven gemäß der geplanten Drapierstrategie müssen notwendigerweise bestehende Fertigungsdaten (z. B. Formwerkzeuggeometrie, Laserprojektionsdaten, Legehandbuch) in den Planungsprozess einbezogen werden. Die relevanten Eingangsgrößen für die Erstellung der Legekurven sind in Abbildung 55 zusammengefasst.

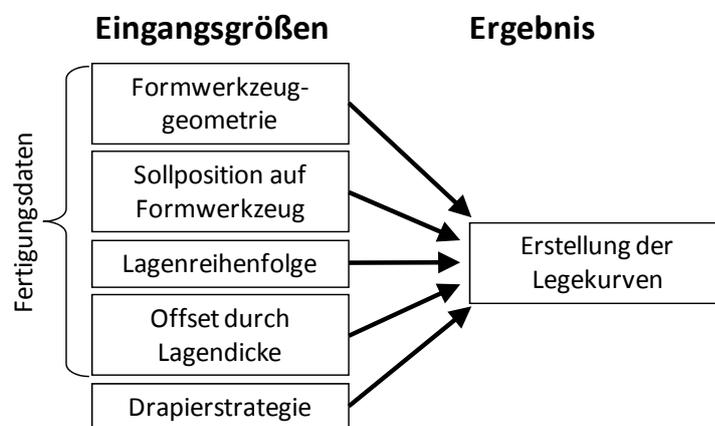


Abbildung 55: Eingangsgrößen bei der Erstellung der Legekurven

Zur datentechnischen Weiterverarbeitung werden die Legekurven in einem hersteller- und anwendungsneutralem Austauschformat exportiert, welches einheitlichen, im Vorfeld definierten Kriterien genügt. Als zweckmäßig erweist sich hierbei die Speicherung der Legekurven als Basis-Splines (B-Splines), da diese Darstellung standardmäßig für die Beschreibung von Kurven und Oberflächen verwendet wird (ROGERS 2001).

4.5.3 Umsetzung der aufgabenorientierten Bahnplanung

Durch die Umsetzung einer aufgabenorientierten Bahnplanung ist es möglich, in einer durchgängigen Prozesskette die Programmierung des Montagewerkzeuges vorzunehmen. Auf der Basis bereits vorhandener Daten kann der Bediener schnell und komfortabel die jeweilige Legeaufgabe definieren, ohne dass tiefgehendes Detailwissen im Bereich der Robotertechnik notwendig ist. Die Abfolge der einzelnen Prozessschritte ist in Abbildung 56 dargestellt. Für die Überprüfung des resultierenden Robotercode wird zunächst in der Simulation ein detailgetreues Abbild der Produktionsumgebung erstellt. Anschließend erfolgt die individuelle Konfiguration des modularen Montagewerkzeuges, welches ebenfalls in die Simulationsumgebung eingebunden wird. Auf Basis dieser vorbereitenden Tätigkeiten erfolgt die eigentliche Definition der Legeaufgabe. Zur Spezifikation der Roboterbahn und relevanter Parameter gibt der Bediener individuell für jeden Zuschnitt notwendige Einstellungen vor. Diese bilden die Grundlage für die automatische Bahngenerierung mit Hilfe von entsprechenden Algorithmen. Der resultierende Robotercode beinhaltet bereits die bahnsynchronen Steuerbefehle zur Ansteuerung des Montagewerkzeuges.

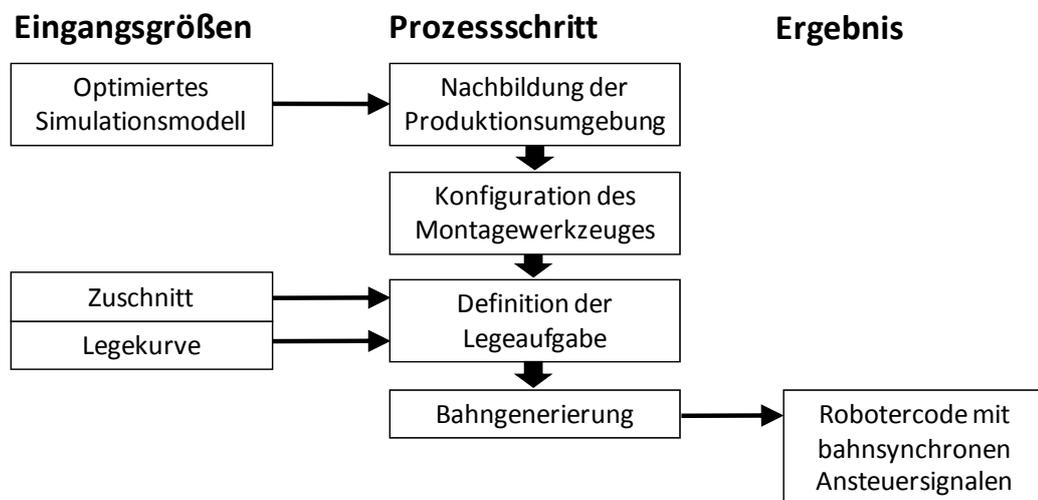


Abbildung 56: Vorgehen zur Umsetzung einer aufgabenorientierten Bahnplanung

Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Prozessschritte näher beschrieben:

Nachbildung der Produktionsumgebung

Für die spätere Validierung der resultierenden Roboterbahn ist im ersten Schritt eine realitätsgetreue Nachbildung der bestehenden Produktionsumgebung in der

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

virtuellen Realität notwendig. Hierfür kann das bereits entwickelte und optimierte Simulationsmodell (siehe Kapitel 4.4.5) wiederverwendet werden. Um Schnittstellenprobleme bei der Integration des Simulationsmodells zu vermeiden, empfiehlt es sich, auf ein standardisiertes Austauschdatenformat zurückzugreifen oder die Prozesssimulation und Bahnplanung in der gleichen Entwicklungsumgebung vorzunehmen.

Konfiguration des Montagewerkzeuges

Im nächsten Schritt erfolgt darauf aufbauend die Spezifikation des modularen Montagewerkzeuges. Hierfür wird das eingesetzte Montagewerkzeug zunächst genauer definiert, indem allgemeingültige Kenndaten (z. B. maximale Stauung, Kammerngröße) festgelegt werden. Anschließend wird je nach vorliegender Produktionsaufgabe das Montagewerkzeug individuell konfiguriert. Der modulare Aufbau ermöglicht es, einzelne Komponenten (z. B. Kammerngestaltung) anzupassen oder die Anzahl der verwendeten Werkzeug-Segmente zu variieren. Zur Komplettierung der Simulationsumgebung wird das vollständig spezifizierte Montagewerkzeug dort ebenfalls eingebunden.

Definition der Legeaufgabe

Für eine Detaillierung der Legeaufgabe, die die Grundlage für die nachfolgende Bahngenerierung bildet, werden zum einen die definierten Legekurven weiterverarbeitet. Zum anderen müssen in diesem Prozessschritt vom Bediener wichtige Konfigurationen vorgenommen werden. Hierfür werden zunächst der zu legende Zuschnitt und die dazugehörige Legekurve ausgewählt. Da die Legekurve auf dem Formwerkzeug definiert ist, muss für die Textilaufnahme die Länge der Legekurve berechnet und damit die 2D-Aufnahmekurve generiert werden. Für die spätere Berechnung der Roboterbahn muss die exakte Position des gegriffenen Textils auf der Greiferoberfläche bekannt sein und somit definiert werden. Durch eine individuelle Platzierung der Zuschnitte auf der Greiferoberfläche durch den Bediener wird eine hohe Flexibilität während des Konfigurationsprozesses sicher gestellt, so dass für ein prozesssicheres Greifen ein hoher Überdeckungsgrad der einzelnen Kammern erreicht werden kann. Nachdem sowohl die Aufnahme- und Legekurve als auch die gewünschte Textilposition festgelegt sind, kann die Definition der Kammernaktionen (z. B. Saugen, Heizen) erfolgen. Aus den vorgenommenen Einstellungen werden bahnsynchrone Ansteuerbefehle generiert, welche zu festgelegten Bahnpunkten entsprechende Schaltaktionen der Kammern auslösen. Um die Roboterbahn eindeutig berechnen zu können, muss der Bediener abschließend Einstellungen vornehmen, welche direkten Einfluss

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

auf die Roboterbahn haben. Hierzu zählt beispielsweise die Stauchungseinstellung der elastischen Schicht. Die notwendigen Teilschritte für eine vollständige Definition der Legeaufgabe sind in Abbildung 57 zusammengefasst. Hierbei ist es notwendig, an relevanten Teilschritten menschliche Vorgaben zuzulassen, um so das vorhandene Erfahrungswissen auch während des späteren Drapierprozesses abbilden zu können. In Abbildung 57 ist daher gekennzeichnet, welche Teilschritte automatisch berechnet bzw. manuell konfiguriert werden.

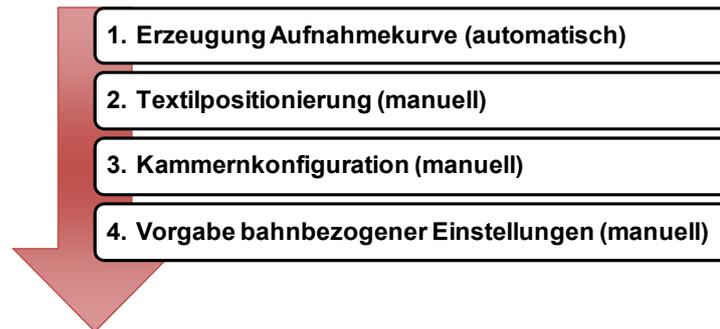


Abbildung 57: Teilschritte zur Definition der Legeaufgabe

Bahngenerierung

Für die automatische Generierung des Rotobercodes erfolgt zunächst auf Basis der getroffenen Einstellungen (z. B. Radius des MWZ, Stauchung) die parametrierbare Hochtransformation der Punkte der Aufnahme- und Legekurve in den TCP des MWZ. Um eine ausstreichende Abrollbewegung des Montagewerkzeuges auf der Formwerkzeugoberfläche zu realisieren, wird den hochtransformierten Bahnpunkten durch die Zuweisung der passenden Orientierung eine Drehbewegung überlagert. Die resultierende Roboterbahn wird anhand einer Ablaufsimulation in der integrierten Visualisierungsumgebung überprüft. Frühzeitig erkannter Verbesserungsbedarf kann somit noch vor der Testphase in der realen Versuchsumgebung durch Rücksprünge zu vorhergehenden Prozessschritten effizient umgesetzt werden, was zu einer Verkürzung der späteren Inbetriebnahmezeit führt.

Die vier aufgezeigten Prozessschritte ermöglichen die Realisierung einer durchgängigen, teilautomatisierten Prozesskette zur aufgabenorientierten Programmierung einer Roboterbahn mit bahnsynchronen Ansteuersignalen und stellen damit wichtige Bausteine für eine Automatisierung der Preformherstellung dar.

4.6 Zusammenfassung und Diskussion

In der vorgestellten Methodik wurde ein Vorgehen zur Planung und Umsetzung von Automatisierungslösungen für das Einzellagen-Preforming erarbeitet. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Vorstellung eines systematischen Entwicklungsvorgehens zur Realisierung eines anforderungsgerechten MWZ sowie der dazugehörigen durchgängigen Prozesskette zur rechnergestützten Offline-Programmierung. Aufbauend auf einer Analyse und Klassifizierung relevanter Geometriemerkmale kann die Auswahl und Auslegung eines geeigneten Montagewerkzeuges erfolgen. Die vorgestellten Montagewerkzeuge integrieren eine selektive Greif- und Heizfunktionalität, wodurch ein gezieltes Greifen und Fixieren der Zuschnitte auf dem Formwerkzeug möglich ist. Der Zuschnitt wird durch eine Abrollbewegung auf dem Formwerkzeug abgelegt und durch eine mehrstufige Drapierstrategie gezielt verformt. Ein dreistufiges Vorgehen ermöglicht eine aufgabenspezifische Gestaltung der Einzelkomponenten des MWZ. Bei der Planung der notwendigen Anlagenperipherie werden bestehende Restriktionen berücksichtigt und Prozessabläufe simulativ überprüft. Zur Umsetzung der rechnergestützten Offline-Programmierung werden gemäß der festgelegten Drapierstrategie in einer CAD-Umgebung Legekurven definiert. Diese bilden die Grundlage für die anschließende Berechnung der Roboterbahn und die Ansteuerung des Montagewerkzeuges. Bei der individuellen Definition der Legeaufgabe kann bestehendes menschliches Prozess- und Erfahrungswissen einfließen.

Mit Hilfe der Methodik findet ein systematischer Abgleich zwischen den auftretenden Geometriemerkmale einer Preform und den Leistungsbereichen möglicher Automatisierungslösungen statt, wodurch eine anforderungsgerechte Auswahl getroffen werden kann. Dieses Vorgehen kann nicht nur für bestehende Marktlösungen sowie für neuartige Montagewerkzeuge angewandt werden, sondern kann auch als zukünftige Grundlage für ein automatisierungsfreundliches Design von FVK-Bauteilen dienen. Durch die hohe Flexibilität der vorgestellten Montagewerkzeuge ist es möglich, ein breites Bauteilspektrum automatisiert herzustellen, so dass ein wesentlicher Vorteil gegenüber den bestehenden, in Kapitel 2.2 vorgestellten Individuallösungen erzielt wird. Durch das Vorgehen zur rechnergestützten Offline-Programmierung kann erstmals eine durchgängige Prozesskette in der Planung und Ansteuerung der vorgestellten Montagewerkzeugkonzepte erreicht werden, welche die notwendige Flexibilität für das Einbringen von menschlichem Erfahrungswissen aufweist und nachträgliche Korrekturen im Prozessablauf zulässt. Die vorgestellte Methodik lässt sich auf zahlreiche Anwendungsbereiche übertragen, bei welchen formlabile Materialien

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

dreidimensional verformt und montiert werden müssen. Beispielhaft können hier alle Einsatzfelder genannt werden, bei denen technische Textilien (z. B. Glasfaser, Aramidfaser) schichtweise zu einer Preform verarbeitet werden und die Gesichtspunkte Flexibilität, Wirtschaftlichkeit sowie die Orientierung an den gegebenen technischen Anforderungen eine hervorgehobene Rolle spielen.

4 Methodik zur Realisierung einer automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

5.1 Allgemeines

Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methodik wird mit Hilfe eines prototypischen Versuchsaufbaus umgesetzt und an einem industriellen Referenzszenario evaluiert. Ziel ist es, für die in Kapitel 4.3 vorgestellten Formwerkzeuge eine Automatisierung des Preformaufbaus zu ermöglichen. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die hohe Variantenvielfalt, die Komplexität des Prozessablaufes sowie die Materialeigenschaften der verwendeten Halbzeuge dar. Durch die Anwendung der Methodik konnte eine Lösungsmöglichkeit realisiert werden, welche sowohl die Umsetzung eines neuartigen Montagewerkzeuges als auch die Durchgängigkeit in der Bahnplanung und Ansteuerung beinhaltet. Der Aufbau einer Versuchsanlage bildet dabei die Grundlage für die Ermittlung von relevanten Kennwerten und Prozessparametern sowie für weiterführende Untersuchungen (siehe Kapitel 6). Mit Hilfe der generierten Datenbasis erfolgt ein Vergleich des automatisierten Prozesses mit der manuellen Preformfertigung (siehe Kapitel 7).

Die folgenden Kapitel fokussieren daher die technische Realisierung einer Automatisierungslösungsmöglichkeit für das Einzellagen-Preforming von CF-Zuschnitten anhand der vorgestellten Methodik. Durch die mögliche Übertragung bzw. Adaption der entwickelten Ansätze hinsichtlich Funktionsintegration, Auslegung, Ansteuerung und Bahnplanung auf ähnliche Aufgabenstellungen kann insbesondere für die Konzeptions- und Umsetzungsphase ein deutlicher Mehrwert generiert werden. Die nachfolgend beschriebene Automatisierungslösung ist dabei als ein mögliches Umsetzungsbeispiel anzusehen, wobei je nach vorliegender Anwendung im Einzelfall einzelne Komponenten bedarfsorientiert angepasst und verändert werden können.

5.2 Realisierung des Montagewerkzeuges für einen automatisierten Fertigungsprozess

5.2.1 Konzeption des Montagewerkzeuges

Das zu entwickelnde Montagewerkzeug stellt für eine Automatisierung des Preformaufbaus das Kernstück dar. Für eine zielführende und zügige Umsetzung des Endeffektors wird daher das in Kapitel 4.4 beschriebene Vorgehen angewandt. Die Konzeption des Montagewerkzeuges berücksichtigt dabei insbesondere folgende Anforderungen:

- *Eignung für Geometriemerkmale des Lagenaufbaus*
Die bestehenden geometrischen Merkmale des Lagenaufbaus der Referenzbauteile müssen mit Hilfe des Endeffektors automatisiert erstellt werden können. Die Grundlage für die Auswahl des Basiskonzeptes bildet die Klassifizierung des Schwierigkeitsgrades des Lagenaufbaus (siehe Kapitel 4.4.1), welcher innerhalb des Leistungsbereiches des Montagewerkzeuges liegen muss (siehe Kapitel 4.4.2.5).
- *Integration der identifizierten Wirkprinzipien und abgeleiteten Submodule*
Das Montagewerkzeug beinhaltet die identifizierten physikalischen Wirkprinzipien zur Erfüllung der benötigten Teilfunktionalitäten (siehe Abbildung 37) sowie die abgeleiteten Submodule (siehe Abbildung 38). Auf der Grundlage der erarbeiteten Basiskonzepte erfolgt eine anforderungsgerechte Konzeptdetaillierung und Spezifikation des Montagewerkzeuges.

Der Abgleich der auftretenden Geometriemerkmale des vorliegenden Referenzszenarios mit dem Leistungsspektrum der Basiskonzepte führt zu der Auswahl eines zylinderförmigen Montagewerkzeuges, welches als geeignet eingestuft wird, den vorliegenden Komplexitätsgrad der Preformaufbauten zu bewältigen. Nach der Festlegung auf ein Basiskonzept erfolgt die anforderungsgerechte Detaillierung wichtiger geometrischer Kenngrößen des Montagewerkzeuges. Da die Länge der längsten Lage 2122 mm beträgt, bestimmt diese gemäß Gl. (4-1), (S. 78) den Umfang und damit auch den Radius des Montagewerkzeuges, welcher für das Grobkonzept auf $r = 340$ mm festgelegt wird. Um den breitesten Zuschnitt ($b_{\max} = 1042$ mm) aufnehmen zu können, wird für die Breite des Montagewerkzeuges 1080 mm gewählt (siehe Gl. (4-2), S. 78). Innerhalb der Grenzen der festgelegten Mantelfläche des Montagewerkzeuges gilt es nun eine sinnvolle Einteilung der Kammerngröße und der Segmentierung zu definieren. Anhand empirischer Untersuchungen zum Greif- bzw. Abklappverhalten von kritischen

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Zuschnittbereichen bei unvollständigem Überdeckungsgrad wird die Oberfläche einer Drapiereinheit zu 120 x 180 mm bestimmt. Für einen modularen Aufbau werden drei identisch aufgebaute Segmente konzipiert, welche für eine Vergrößerung der Werkzeugbreite entsprechend dem zu drapierenden Referenzbauteil aneinander montiert werden können. Jedes Segment besteht dabei aus 3 x 12 Drapiereinheiten, so dass nachfolgend dargestelltes Grobkonzept die Grundlage für die folgenden Detaillierungsstufen bildet (siehe Abbildung 58).

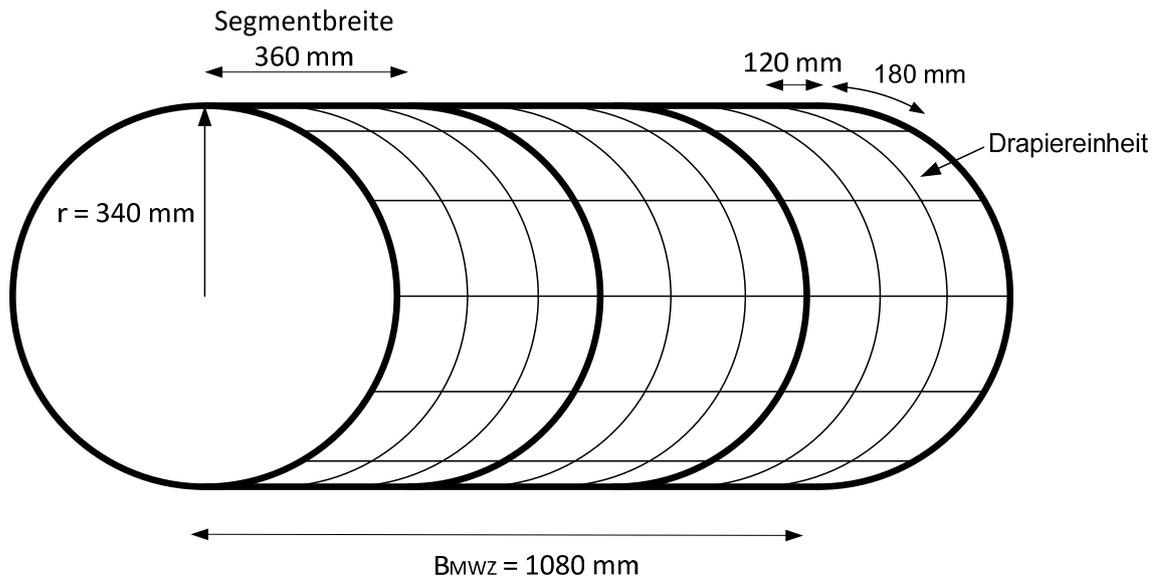


Abbildung 58: Geometrisches Grobkonzept eines zylinderförmigen Montagewerkzeuges

5.2.2 Konzeptabsicherung mit Hilfe von Funktionsmustern

5.2.2.1 Versuchsziele

Die in Kapitel 4.4.2.3 vorgestellten Funktionsmuster beinhalten bereits alle erforderlichen Funktionalitäten und dienen als flexible Entwicklungsplattformen zur frühzeitigen Erprobung der Wirkstruktur anhand von Vorversuchen am industriellen Referenzszenario. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse der einzelnen Prozessphasen (Aufnehmen, Transport und Drapieren) können das entwickelte Funktionsprinzip sowie der geplante Prozessablauf evaluiert werden. Die praktischen Validierungsversuche am Referenzszenario legen sowohl konstruktives als auch prozesstechnisches Optimierungspotenzial offen, welches in die anschließende Entwicklung des Montagewerkzeuges einfließt. Durch die Erfassung der relevanten Prozessgrößen lassen sich bereits in einem frühen Entwicklungsstadium Zusammenhänge zwischen Ziel- und Einflussgrößen identifizieren.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Zielgrößen beschreiben nach KLEPPMANN (2006) das Ergebnis eines Versuchs. Hierzu zählen u. a. auch Messwerte wie z. B. Volumenstrom, Differenzdruck, Temperatur. Einflussgrößen hingegen werden als Größen definiert, welche die Zielgrößen möglicherweise beeinflussen (z. B. verwendetes Material, Zuschnittkontur). Durch die Verwendung von unterschiedlichen Materialien, Zuschnittgeometrien und Formwerkzeugen können zudem Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Funktionsprinzips im Hinblick auf die erforderliche Flexibilität, die erreichbare Zykluszeit und Drapierqualität getroffen werden.

Aufbauend auf den definierten Versuchszielen werden zwei Funktionsmuster realisiert, welche die identifizierten Wirkprinzipien und Grundfunktionalitäten integrieren (siehe Abbildung 40). In Anlehnung an die zylinderförmige Geometrie des angestrebten Montagewerkzeuges liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Prozessphasen des dazugehörigen Funktionsmusters (siehe Abbildung 40, links) (REINHART & EHINGER 2010A, REINHART & EHINGER 2010B). Ergänzend hierzu werden Versuche zum Drapieren von innenliegenden 90° Winkeln mit dem alternativen Funktionsmuster zur Absicherung des MRD-Konzepts durchgeführt (siehe Abbildung 40, rechts).

5.2.2.2 Funktionsmuster zur Überprüfung des zylinderförmigen Basiskonzepts

Versuchsaufbau

Für die Erfassung relevanter Prozessparameter wird der in Abbildung 59 dargestellte Versuchsaufbau realisiert. Mit Hilfe eines Drucksensors im Inneren einer Drapiereinheit und eines Volumenstromsensors können prozessrelevante Kennwerte kontinuierlich erfasst und gespeichert werden. Über einen Druckregler kann dabei manuell der Versorgungsdruck der eingesetzten Venturi-Düse, welche als Vakuumerzeuger fungiert, eingestellt werden.

Sowohl die Abhebe- als auch die Transportversuche werden mit allen Referenzmaterialien durchgeführt, wobei die Größe und Position der Zuschnitte variieren. Exemplarisch werden hierbei fünf verschiedene Zuschnittgrößen mit unterschiedlichen Positionierungen untersucht (siehe Anhang 10.7). Durch die Variation dieser Parameter sollen Erkenntnisse über die Auswirkung von unvollständig bedeckten Kammern sowie den Einfluss der Textilposition und der entstehenden Fehlluft bei einer kegelförmigen Durchströmung der Schaumstoffschicht gewonnen werden.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

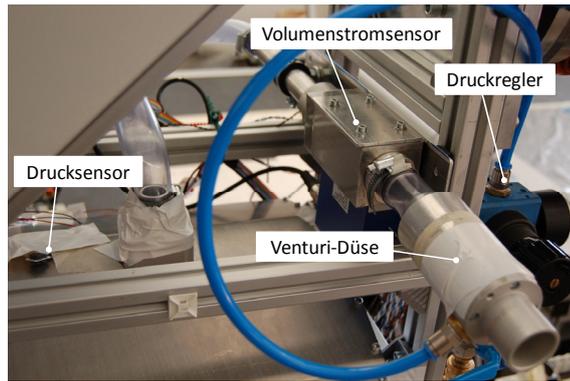


Abbildung 59: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zielgrößen „Differenzdruck“ und „Volumenstrom“

Aufnahmephase

Für die Aufnahme liegen die Textilien auf einer Lochblechunterlage bereit. Über den Druckregler wird der Versorgungsdruck der Venturi-Düse so eingestellt, dass erstmalig ein Greifen des Textils möglich ist und anschließend ein Sicherheitsbeiwert von 10 % addiert. Während der Annäherungsphase (A) werden bereits die entsprechenden Kammern der ersten Reihe geöffnet (siehe Abbildung 60). Beim anschließenden Aufsetzen (B) kommt es zu einer Erhöhung des Differenzdrucks, wodurch das Textil gegriffen wird. Während der fortschreitenden Abrollbewegung werden die jeweiligen Kammern der aufliegenden Kammerneile geöffnet (C), so dass es zu einem Abschälen des Textils von der Unterlage kommt.

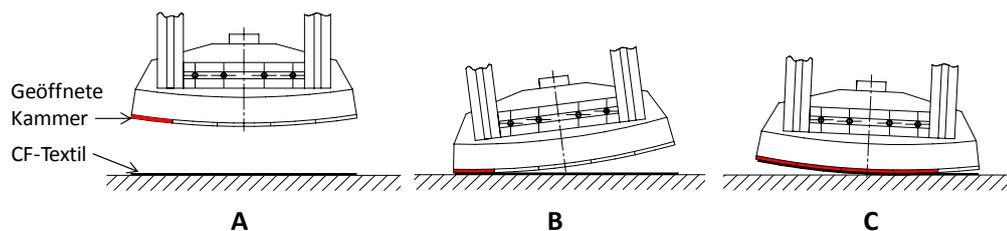


Abbildung 60: Prozessablauf bei der Textilaufnahme

Transportphase

Zur Ermittlung des notwendigen Transportdifferenzdrucks werden die Zuschnitte von Hand auf die Oberfläche des Funktionsmusters gebracht und anschließend über den Druckregler der Versorgungsdruck der Venturi-Düse reduziert, so dass der Zuschnitt gerade noch gegriffen wird. Für einen prozesssicheren Transport wird der Versorgungsdruck anschließend soweit erhöht, bis das Textil ohne Ver-rutschen auch bei festgelegten Roboterbewegungen sicher gegriffen wird.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Drapierphase

Während der Drapierphase erfolgen eine Untersuchung des Aufheizprozesses sowie eine subjektive Einschätzung der Drapierqualität. Hierbei ist der Einfluss der bereits gelegten Lagenanzahl von besonderem Interesse, da sich diese während des Preformaufbaus kontinuierlich ändert. Es wird daher die Temperatur des drapierten Zuschnitts auf der Oberseite (T_{Heiz}) und Unterseite (T_{Schmelz}) erfasst, wobei die darunterliegende Lagenanzahl variiert (siehe Abbildung 61).

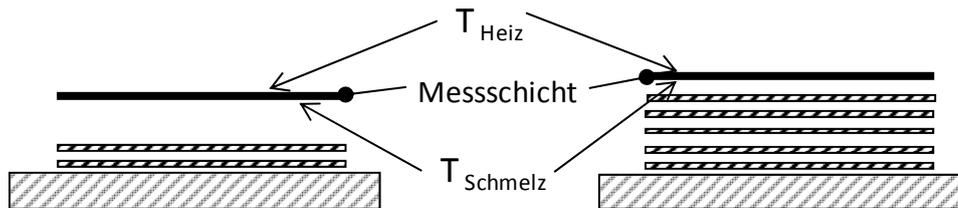


Abbildung 61: Versuchsaufbau zur Einflussbestimmung der Lagenanzahl

Um das breite Einsatzspektrum des Funktionsmusters in einer Versuchsumgebung zu testen, werden drei unterschiedliche Zuschnittgeometrien auf die bestehenden Formwerkzeuge drapiert. Ein T-förmiger Zuschnitt wird mit Hilfe einer mehrstufigen Drapierstrategie auf das Referenzbauteil Diaphragm aufgebracht. Das Drapieren von zwei repräsentativen Freiformflächen mit konkaven und konvexen Krümmungen wird anhand eines rechteckigen und eines quadratischen Zuschnitts am Referenzbauteil Panel untersucht (siehe Abbildung 62).

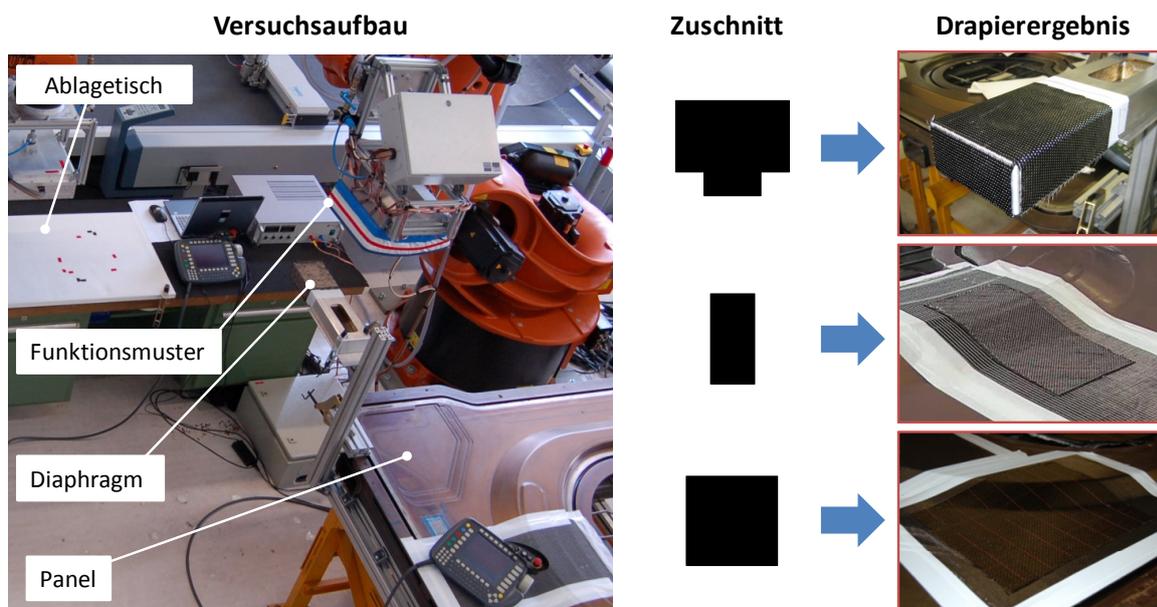


Abbildung 62: Drapierversuche mit dem Funktionsmuster am Referenzszenario

Versuchsergebnisse

Während der Aufnahmephase weisen die eingesetzten Referenzmaterialien aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften (Luftdurchlässigkeit, Strukturstabilität) deutliche Differenzdruckunterschiede von bis zu 18 mbar auf. Insbesondere bei dem strukturstabilen Referenzmaterial MAG-Gelege 0/90 hat aufgrund der vorherrschenden Materialanisotropie die Faserrichtung einen enormen Einfluss auf den zum Greifen benötigten Differenzdruck. Exemplarisch ist in Anhang 10.7 der Druckverlauf der Referenzmaterialien für eine rechteckige Zuschnittgröße von 380 x 300 mm² aufgezeigt.

Wird das Textil nahe dem luftundurchlässig abgedichteten Randbereich des Funktionsmusters positioniert, so hat dies zur Folge, dass ein seitliches Einströmen der angesaugten Luft verhindert wird und somit ein deutlich geringerer Volumenstrom und Differenzdruck zum Abheben und Transport des Textils benötigt werden. Bei Zuschnitten, welche im Verhältnis zur Fläche einen großen Umfang aufweisen, ist der Einfluss der Fehlluft und der unvollständig bedeckten Drapiereinheit jedoch besonders groß, so dass hier ein höherer Volumenstrom und Differenzdruck erforderlich sind.

Für das Drapieren des Diaphragms wird ein mehrstufiger Drapierprozess in Anlehnung an Abbildung 46 angewendet. Hierbei wird der Zuschnitt unabhängig vom eingesetzten Material erfolgreich sukzessive auf das Formwerkzeug drapiert und dort fixiert. Die Drapierversuche am Referenzbauteil Panel zeigen, dass die auftretenden konkaven und konvexen Unebenheiten durch die elastische Schaumstoffschicht, deren Funktionsweise in Abbildung 51 dargestellt ist, ausgeglichen und ohne Lufteinschlüsse drapiert werden können. Mit Hilfe der durchgeführten Validierungsversuche an den Referenzbauteilen konnten relevante Prozessschritte abgesichert und das Funktionsprinzip des Montagewerkzeuges erfolgreich überprüft werden.

5.2.2.3 Ergänzendes Funktionsmuster zum Drapieren von konkaven Winkeln

Konkave Elemente und Winkel im Lagenaufbau stellen für das Basiskonzept „Zylinderform“ (ZF) eine besondere Herausforderung dar. Wie in Kapitel 4.4.2.4 dargestellt können diese innerhalb der ermittelten Grenzen mit Hilfe der elastischen Schaumstoffschicht drapiert werden. Für vorkommende Geometriemerkmale außerhalb des Leistungsbereiches des Basiskonzepts ZF kann das

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Basiskonzept „Modifiziertes Reuleaux-Dreieck“ (MRD) oder ein ergänzendes Nachdrapierwerkzeug zum Einsatz kommen. Zur Validierung dieser beiden Drapierkonzepte wird das in Abbildung 40 dargestellte Funktionsmuster umgesetzt und anhand eines Versuchsaufbaus mit konkavem 90° Winkel und 10 mm Radius untersucht. Das realisierte Funktionsmuster besitzt zur Darstellung der selektiven Greif- und Heizfunktionalität zwei Drapiereinheiten, die sich unabhängig voneinander ansteuern lassen. Da Lufteinschlüsse in der Kante des 90° Winkels unbedingt vermieden werden müssen, ist eine Gummilippe zwischen den Drapiereinheiten eingelassen (siehe Abbildung 63). Ein zusätzliches Heizfeld, welches die beiden Drapiereinheiten verbindet, führt während des Andrückens mit der Gummilippe zu einer Fixierung des Textils in der Kante des 90° Winkels. Um sowohl das Basiskonzept MRD als auch eine mögliche Ausführungsvariante eines Nachdrapierwerkzeuges zu evaluieren, werden eine abrollende sowie eine stempelnde Drapierbewegung untersucht und anschließend die erreichte Qualität bewertet. Die Textilaufnahme sowie die stempelnde und abrollende Drapierbewegung sind in Abbildung 63 dargestellt.

Bei der subjektiven Bewertung der Drapierqualität gemäß der Werteskala nach VDI 2225 wird besonderes Augenmerk auf die Haftung der Textilien im Radius des 90° Winkels sowie auf möglichen Faltenwurf auf den ebenen Flächen gelegt. Die Bewertungsergebnisse aller Referenzmaterialien finden sich in Anhang 10.8, wobei aufgrund der markanten Anisotropie des UD-Geleges und des MAG-Geleges 0/90 zwei Faserorientierungen untersucht wurden.

Die Versuchsergebnisse zeigen klar, dass durch das umgesetzte Funktionsmuster ein Drapieren von konkaven Winkeln sowohl mit der stempelnden als auch mit der abrollenden Drapierstrategie möglich ist. Sind die Fasern des UD-Geleges parallel zum 90° Winkel orientiert, so kann es aufgrund der Strukturinstabilität des Materials bei einem zu hohem Anpressdruck des Schaumstoffes zu einer Faltenbildung beim Drapieren kommen. Dieses Fehlerbild gilt es durch eine geeignete Auswahl des Schaumstoffmaterials und eine genaue Programmierung der Roboterbahn zu beheben. Je nach Referenzmaterial sind demnach eine individuelle Stauchungseinstellung sowie eine exakte und vergleichsweise aufwändige Roboterprogrammierung notwendig.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms

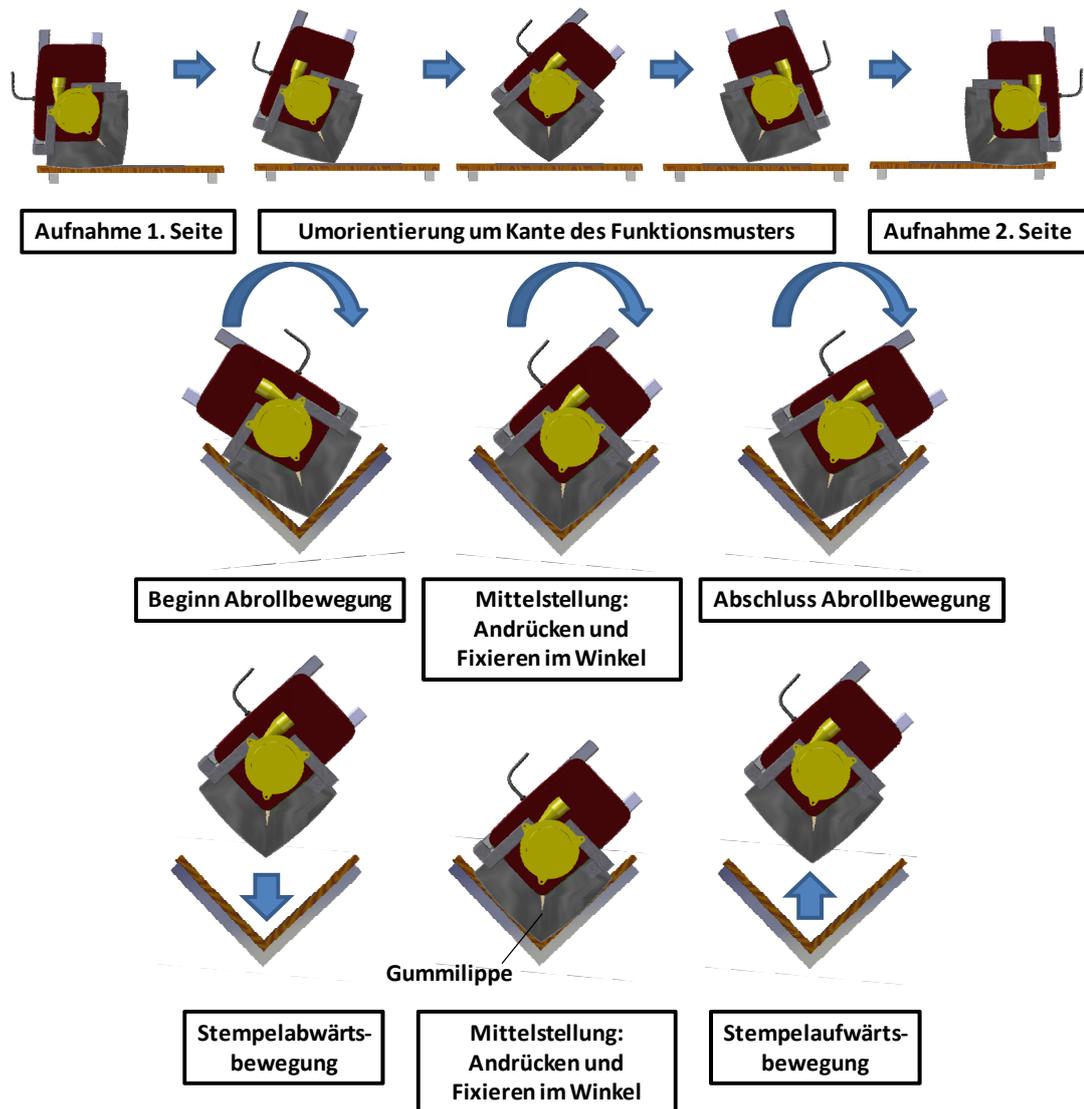


Abbildung 63: Aufnahmebewegung sowie abrollende und stempelnde Drapierbewegung

5.2.2.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit Hilfe der umgesetzten Funktionsmuster das entwickelte Funktionsprinzip für die Basiskonzepte ZF und MRD an relevanten geometrischen Merkmalen der Formwerkzeuge erfolgreich überprüft und eine hohe Drapierqualität erreicht werden konnte. Durch das selektive Aktivieren von einzelnen Drapiereinheiten können konturvariante Zuschnitte prozesssicher aufgenommen und drapiert werden. Dabei ist ein spezifischer Differenzdruck notwendig, welcher insbesondere von der Textilposition, der Zuschnittgeometrie und dem verwendeten Material abhängt. Durch eine ausstreichende Abrollbewegung kann das Textil auf das Formwerkzeug drapiert und

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

durch die selektive Heizfunktion dort gezielt fixiert werden. Aufbauend auf den positiven Versuchsergebnissen ist jedoch eine weitere Verringerung der Prozesszeit notwendig, da bei einer Hochrechnung zur Abschätzung der benötigten Zykluszeit die gestellten Anforderungen noch nicht eingehalten werden können. Aufgrund der Vielfalt an benötigten Differenzdrücken zum Anheben und Transport der Zuschnitte sowie aus Gründen der Ressourceneffizienz ist zudem die Integration einer Druckregelung notwendig, welche es ermöglicht, den erforderlichen spezifischen Differenzdruck individuell einzustellen. Die Versuchsergebnisse bilden die Grundlage für die Detaillierung und Umsetzung des roboterbasierten Montagewerkzeuges und dessen ausführliche experimentelle Validierung am industriellen Referenzszenario.

5.2.3 Auslegung ausgewählter Einzelkomponenten

5.2.3.1 Drapiereinheit

Die benötigten Drapiereinheiten werden als modulare Kammern realisiert, welche über eine einheitliche Schnittstelle an die Trägereinheit montiert werden können und dadurch die zylindrische Oberfläche des Montagewerkzeuges bilden. Zur Erfüllung der notwendigen Hauptfunktionen des Montagewerkzeuges integriert jede Drapiereinheit die identifizierten Wirkprinzipien, welche Submodulen zugeordnet sind (siehe Abbildung 38). Durch den Einsatz von mehreren Kammern in einem Montagewerkzeug wird die Möglichkeit geschaffen, gezielt einzelne Bereiche des Werkzeuges für das Greifen bzw. Erwärmen der Textilien zu aktivieren (siehe Kapitel 4.4.2.2). Zur Reduktion der Teilevielfalt und Komplexität ist jede Kammer identisch aufgebaut, wobei aufgrund des modularen Aufbaus einzelne Submodule bei Bedarf auch modifiziert werden können. Gemäß der in Kapitel 4.4.4 beschriebenen Vorgehensweise erfolgt nach der geometrischen Auslegung die Detaillierung der integrierten Teilfunktionen der Submodule.

Niederdruckflächensaugen

Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Öffnungskonfiguration eines Niederdruckflächensaugers sind das Bohrungsmuster, der Bohrungsabstand und der Bohrungsdurchmesser. Aufgrund gleicher Referenzmaterialien und Zuschnittgeometrien werden basierend auf den bestehenden Voruntersuchungen von STRABER (2012) ein Bohrungsdurchmesser von 8 mm sowie ein annähernd quadratisches Bohrungsmuster gewählt. Der Bohrungsabstand von 25 mm wird von der geringsten Biegesteifigkeit der Referenzmaterialien determiniert. Da diese

beim UD-Gelege orthogonal zur Faserrichtung auftritt, muss der Bohrungsabstand so gewählt werden, dass es auch zwischen zwei angrenzenden Kammern zu keinem Abklappen des gegriffenen Zuschnittes kommt. Für die gewählte Kammerngröße resultieren daraus 35 Saugbohrungen, welche in einer 5x7 Matrix angeordnet sind. Um die erforderliche selektive Greiffunktionalität herzustellen, verfügt jede Kammer über einen Verschlussmechanismus, welcher individuell angesteuert werden kann. Als Verschlussmechanismus fungiert ein bistabiler Hubmagnet, an dessen Anker ein Verschlusspfropfen zum Verschließen bzw. Öffnen der Versorgungsbohrung angebracht ist (siehe Abbildung 65). Bei der Verwendung eines bistabilen Hubmagneten kann durch das Anlegen eines kurzen Spannungspulses die Federkraft überwunden und der Anker mit Hilfe eines Permanentmagneten in einer stabilen Position gehalten werden. Durch Umpolen des Spannungspulses wird die Kammer verschlossen und der Verschlusspfropfen über die Feder in die Versorgungsöffnung der Kammer gedrückt. Dadurch sind eine flexible Höhenausrichtung des Hubmagneten sowie eine energieeffiziente Ansteuerung möglich. Um die Strömungsverluste beim Eintritt in die Kammer gering zu halten, ist darauf zu achten, dass im geöffneten Zustand die Eintrittsfläche an der Versorgungsöffnung möglichst groß ist und große Umlenkungen oder Verwirbelungen des Luftstroms vermieden werden.

Elastisches Element

Die plateauförmige Erhöhung von 35 mm in der Mitte des Panels bestimmt maßgeblich die Gestaltung des elastischen Schaumstoffelements, da diese Unebenheit durch eine Stauchung des Schaumstoffes ausgeglichen werden soll. Basierend auf experimentellen Voruntersuchungen wird eine maximal zulässige Schaumstoffstauchung von 50% festgelegt und unter Zugabe eines Sicherheitsbeiwertes die Schaumstoffhöhe auf 80 mm ausgelegt. Für die Überprüfung dieser Annahme sowie die Identifikation von geeigneten Schaumeigenschaften (notwendige Stauchhärte, Partikelemission, Temperaturbeständigkeit, Strukturverhalten unter Wärme und Kompression) müssen praktische Untersuchungen am Referenzszenario vorgenommen werden (siehe Kapitel 5.2.2). Um das Textil an der Oberfläche des Montagewerkzeuges greifen zu können, ist der Schaumstoff mit konzentrisch zulaufenden Durchgangsbohrungen versehen, welche den zum Greifen der Textilien notwendigen Luftstrom führen. In die Durchgangsbohrungen sind biegbare Saugrohre integriert, in welchem der kegelförmig zulaufende Luftstrom für die Weiterleitung in die Drapiereinheit gebündelt wird. Dadurch ist es möglich, den Schaumstoff an der Drapiereinheit zu fixieren und bei Verwendung eines offenporigen Schaumes auch unter mechanischer Belastung die Saugwirkung

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

aufrecht zu erhalten. Abbildung 64 zeigt schematisch den Aufbau des elastischen Schaumstoffelements. Dabei ist zu erkennen, dass der Volumenstrom aufgrund der Luftdurchlässigkeit des Schaumstoffes nicht nur die Durchgangsbohrungen, sondern auch von seitlichen Richtungen in die Saugröhrchen einströmt und somit ein Druckabfall über dem Textil nicht nur lokal an der Bohrungsöffnung, sondern über der gesamten Oberfläche entsteht. Da ein auftretender Fehlluftstrom (gestrichelte Pfeile in Abbildung 64) nicht zu einem nutzbaren Druckabfall über dem zu greifenden Textil führt, gilt es diesen zu minimieren, indem das Schaumstoffelement seitlich abgedichtet wird.

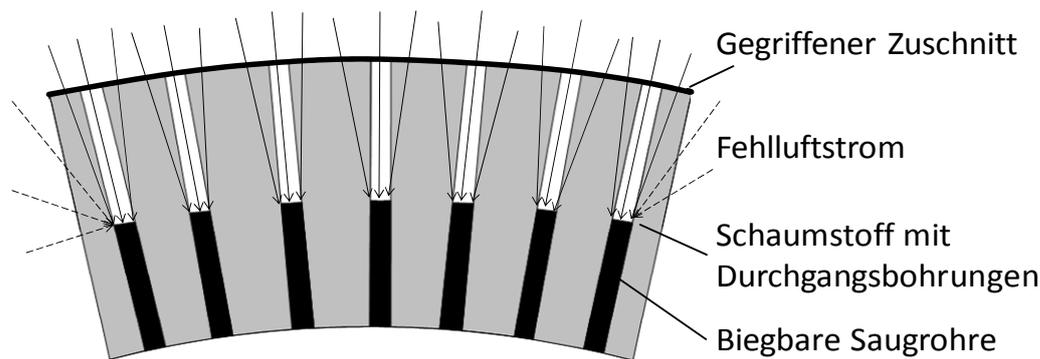


Abbildung 64: Schematischer Aufbau des elastischen Elements

Da die einzelnen Kammern und damit auch die elastischen Schaumstoffelemente nach der Montage auf der Trägereinheit aneinandergrenzen, ist darauf zu achten, dass eine einheitliche Oberfläche entsteht. Insbesondere am Übergang zwischen zwei Drapiereinheiten muss ein Aufspreizen zwischen den Schaumstoffelementen vermieden werden, da dies zu einem undefinierten Drapieren und Faserverzug führen könnte. Um dies zu verhindern und einzelne Schaumstoffelemente trotzdem bedarfsgerecht tauschen zu können, muss eine lösbare Verbindung zwischen den Schaumstoffelementen geschaffen werden. Mögliche Maßnahmen sind das Vernähen der Oberfläche, der Einsatz von verbindenden Streifen oder Klettunkten sowie eine formschlüssige Gestaltung der Seitenflächen.

Widerstandsheizung

Um einzelne Bereiche auf der Oberfläche des Montagewerkzeuges selektiv bis zu einer vorgegebenen Temperatur erwärmen zu können, ist auf der Oberfläche jeder Drapiereinheit ein Heizfeld mit einem mäanderförmig aufgenähten Widerstandsheizdraht angebracht. Die Temperatur wird mit einem hochempfindlichen NTC-Sensor direkt am Heizdraht gemessen, da dies die heißeste Stelle darstellt. Aufgrund der Wärmeentwicklung müssen die verwendeten Materialien eine

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Temperaturbeständigkeit von mindestens 200°C aufweisen. Der Heizdraht ist daher mit einer PTFE-Beschichtung versehen und wird zur Erzeugung einer möglichst homogenen Erwärmung im minimal möglichen Abstand mäanderförmig auf ein luftdurchlässiges Glasfilamentgewebe genäht. Die zum Schmelzen des thermoplastischen Bindervlieses benötigte Heizleistung P wird durch Anlegen einer Spannung U und den sich einstellenden Stromfluss I erzeugt.

Nachdem die verschiedenen Teilfunktionen konkretisiert wurden, kann ein detailliertes Gesamtkonzept einer Drapiereinheit erstellt werden, welches in Abbildung 65 dargestellt ist.

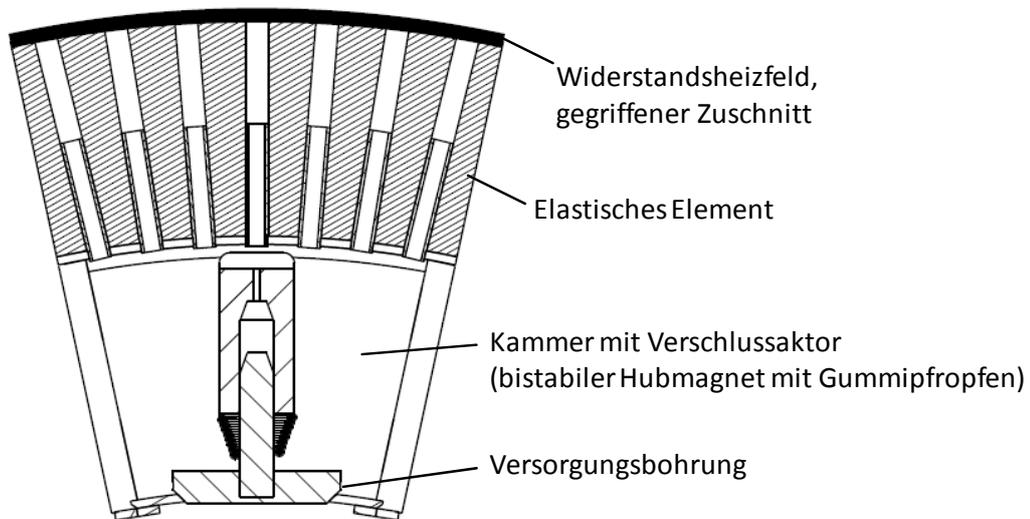


Abbildung 65: Detailliertes Gesamtkonzept einer Drapiereinheit

5.2.3.2 Trägereinheit

Die Trägereinheit stellt die mechanische Verbindung zwischen dem Roboter und den einzelnen Drapiereinheiten dar. Hierfür ist eine zylinderförmige Leichtbaukonstruktion vorgesehen, welche eine ausreichende Steifigkeit und Festigkeit für die auftretenden mechanischen Belastungen während des Drapierprozesses aufweist. Über die Trägereinheit werden die benötigten Medien (Volumenstrom, Energieversorgung, Steuersignale) zentral zugeführt und anschließend zu den angebotenen Drapiereinheiten verteilt. Für die Ansteuerung müssen notwendige Steuerungskomponenten (z. B. Platinen, Klemmleisten, Kabelführung etc.) ebenfalls in die Trägereinheit integriert werden. Hierbei ist es notwendig, sensible Steuerungskomponenten vor dem elektrisch leitfähigen CF-Staub zu schützen (z. B. durch Kapselung, Lackierung, Isolierung etc.), um Kurzschlüsse und damit einen unvorhergesehenen Funktionsausfall zu verhindern. Da in der

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Trägereinheit der Volumenstrom von den Drapiereinheiten über die Versorgungsbohrungen zum Vakuumerzeuger transportiert wird, ist darauf zu achten, dass Strömungsverluste und Verwirbelungen in der Trägereinheit weitestgehend vermieden werden.

5.2.4 Strömungssimulation des Gesamtkonzepts

5.2.4.1 Allgemeines

Durch eine Simulation der zu erwartenden Strömungsverläufe und Druckverteilungen bei relevanten Komponenten des Montagewerkzeuges kann Optimierungspotenzial frühzeitig identifiziert werden und in den anschließenden Konstruktionsprozess einfließen. Ziel ist es, durch die Simulationsergebnisse ein möglichst strömungsgünstiges Design des Endeffektors zu realisieren, da dies positive Effekte für einen ressourceneffizienten und störungsfreien Betrieb des Montagewerkzeuges mit sich zieht. Jedoch bedarf es einer genauen Analyse, welche Verbesserungsmaßnahmen mit vertretbarem Aufwand zu einer merklichen Verbesserung der Strömungseigenschaften führen. Mit Hilfe der Ergebnisse der numerischen Simulation kann Kenntnis über das Strömungsverhalten im Inneren des Montagewerkzeuges gewonnen werden, so dass dadurch der Einfluss der beinhalteten Komponenten offengelegt, unerwünschte Wirbel oder Staupunkte vermieden und ein passender Vakuumerzeuger ausgewählt werden kann. Um dies zu erreichen, werden zunächst Versuche für die Prozessphasen Abheben und Transport an einer prototypisch aufgebauten Drapiereinheit durchgeführt. Die ermittelten Messwerte (Differenzdruck, Volumenstrom) bilden die Datenbasis für die anschließende Strömungssimulation von ausgewählten Submodulen. Auf Basis der Vorversuche sowie der Simulationsergebnisse wird anschließend ein anforderungsgerechter, effizienter Vakuumerzeuger ausgewählt.

5.2.4.2 Vorversuche an einer prototypischen Drapiereinheit

Versuchsaufbau

Um reproduzierbare Versuchsdurchläufe zu erreichen, wird zur Durchführung der Vorversuche eine exemplarische Drapiereinheit aufgebaut und an einem Industrieroboter montiert. Zur Erfassung des vom Förderejektor erzeugten Volumenstroms \dot{V} wird vor dem Volumenstromsensor ein Rohrstück für eine laminare Einströmung angebracht. Um seitlich einströmende Fehlluft zu vermeiden,

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

ist das elastische Element an den Seitenflächen abgedichtet. Zusätzlich werden der Druck p_0 außerhalb der Kammer (dies entspricht dem Druck in der zukünftigen Trägereinheit) sowie der Druck p_1 im Inneren der Drapiereinheit gemessen (siehe Abbildung 66).

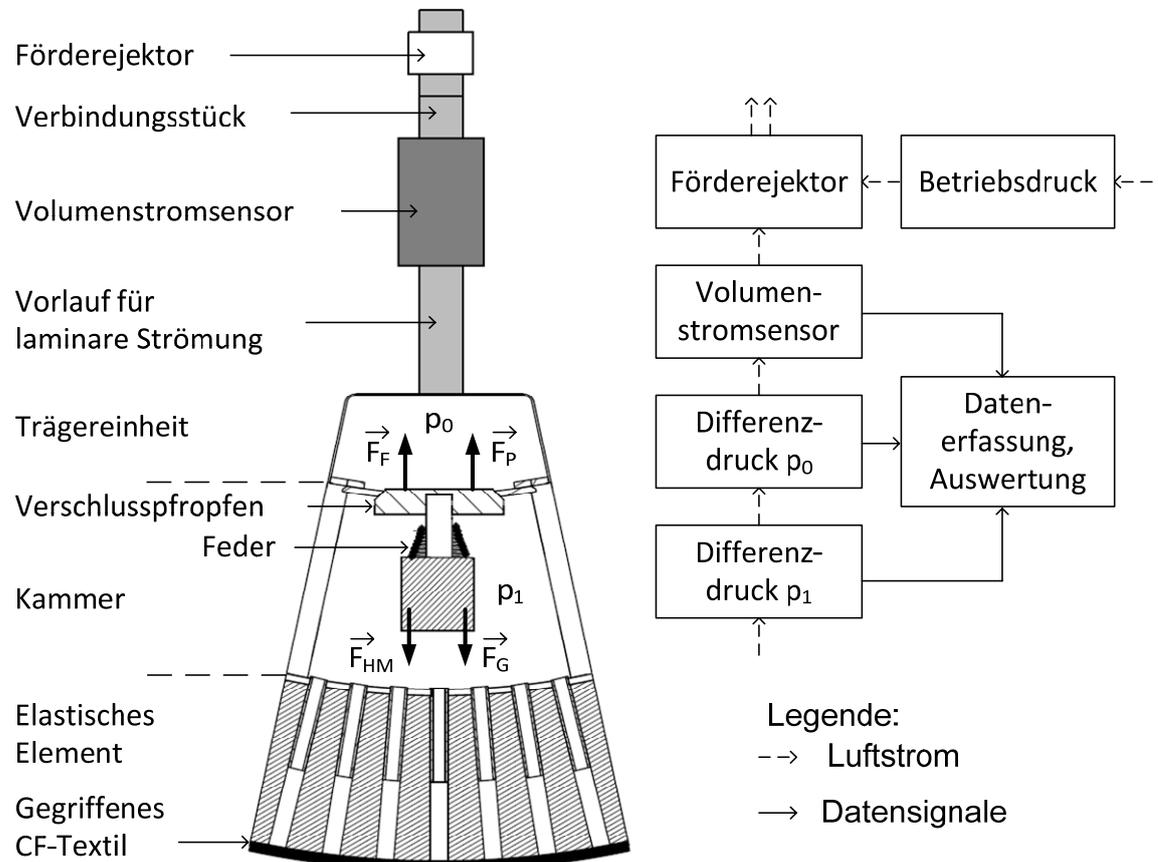


Abbildung 66: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und abstrahierte Prinzipskizze des Messaufbaus

Federauslegung

Zum Verschließen einer Drapiereinheit drückt eine Feder den Verschlusspfropfen am Anker des Hubmagnets in die Versorgungsöffnung der Kammer (siehe Abbildung 66). Eine geeignete Auslegung der eingesetzten Feder ist für die korrekte Funktionsweise einer Drapiereinheit essentiell, da einerseits ein zuverlässiges Verschließen der Kammer sichergestellt werden muss und andererseits zum Öffnen der Drapiereinheit der Hubmagnet die anliegende Federkraft überwinden muss. Die wirkenden physikalischen Kräfte sind in Abbildung 66 dargestellt, so dass sich folgende Zusammenhänge ableiten lassen:

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

1. Verschließen der Drapiereinheit

Die bestehende Druckdifferenz zwischen p_0 in der Trägereinheit und p_1 in der Saugkammer übt auf den Verschlusspfropfen eine Kraft F_P aus, die gleichgerichtet zur Federkraft F_F ist. Es gilt:

$$F_P = (p_0 - p_1) \cdot A_{P\text{fropfen}} \quad (5-1)$$

Die wirkende Gewichtskraft F_G setzt sich aus dem Anker und dem angebrachten Verschlusspfropfen zusammen. Um die Versorgungsbohrung mit der Feder sicher zu verschließen, muss daher folgender Zusammenhang gelten:

$$F_F > F_G - F_P \quad (5-2)$$

Liegt kein Volumenstrom an, so ist $F_P = 0$.

Die Dichtigkeit der Kammer und damit auch der resultierende Fehlluftstrom bei geschlossener Kammer werden maßgeblich von der entstehenden Verschlusskraft F_V beeinflusst, welche sich folgendermaßen berechnet:

$$F_V = F_F + F_P - F_G \quad (5-3)$$

2. Öffnen der Drapiereinheit

Zum Öffnen der Drapiereinheit muss die anliegende Verschlusskraft überwunden werden. Im Normalfall wird die Drapiereinheit in der in Abbildung 66 dargestellten Orientierung geöffnet, so dass für die zum Einfahren benötigte Kraft des Hubmagneten F_{HM} gilt:

$$F_{HM} > F_V = F_F + F_P - F_G \quad (5-4)$$

Bei abweichenden Orientierungen der Drapiereinheit muss die Änderung von F_G entsprechend berücksichtigt werden.

Ebenso kann der maximale Differenzdruck berechnet werden, welcher für ein sicheres Öffnen der Kammer anliegen darf:

$$\Delta p = p_0 - p_1 < \frac{F_{HM} + F_G - F_F}{A_{P\text{fropfen}}} \quad (5-5)$$

Für die Auswahl einer geeigneten Feder werden bei drei unterschiedlichen Exemplaren die Verschluss- und Öffnungseigenschaften untersucht. Alle drei Federn sind in der Lage, die Kammern sicher zu verschließen und auch bei einem

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

anliegenden Differenzdruck von bis zu 60 mbar zuverlässig zu öffnen, so dass eine Minimierung des Fehlluftstromes bei geschlossener Kammer das entscheidende Auswahlkriterium darstellt. Hierfür wird für alle drei Federn der entstehende Fehlluftstrom in Abhängigkeit vom auftretenden Differenzdruck ermittelt. Die Feder mit der größten Federkonstante ($c = 0,18 \text{ N/mm}$) dichtet insbesondere bei niedrigen Differenzdrücken unter 20 mbar die Kammer am besten ab und wird somit in die Drapiereinheit integriert.

Transportversuche

Ziel der Vorversuche ist es, Erkenntnisse über den notwendigen Volumenstrom und den Differenzdruck während des prozesssicheren Transports von CF-Zuschnitten zu gewinnen. Für die Transportversuche werden rechteckige Probezuschnitte aller Referenzmaterialien, welche die Kammer zu 50%, 75% und 100% bedecken, verwendet. Zusätzlich werden die Position sowie die Faserorientierung der Zuschnitte variiert. Zur Durchführung der Versuche wird zunächst ein Ausgangsvolumenstrom \dot{V}_0 von 100 sl/min eingestellt, welcher nach der manuellen Anbringung des Textils an die Drapiereinheit schrittweise um 10 sl/min erhöht wird bis ein sicherer Transport der gegriffenen Textilien ohne ein Ablösen von der Drapiereinheit möglich ist. Anschließend wird der dazugehörige Volumenstrom \dot{V}_1 erfasst.

Versuchsergebnisse

Wohingegen die Position des Textils auf der einzelnen Drapiereinheit nur einen marginalen Einfluss besitzt, ist aufgrund der hohen Formstabilität insbesondere bei dem Referenzmaterial MAG-Gelege 0/90 die Faserorientierung von Bedeutung. Ist die Produktionsrichtung senkrecht zur Werkzeugbreite (Variante 1), so ist die Biegung der Faserrichtung identisch zur Position auf der Halbzeugrolle und das Material passt sich gut der gekrümmten Oberfläche an. Erfolgt hingegen eine Umorientierung des Zuschnittes um 90° , muss sich die steife Faserrichtung der Oberflächenkrümmung anpassen (Variante 2), so dass ein deutlich höherer Volumenstrom für einen prozesssicheren Transport notwendig ist. In Abhängigkeit vom Überdeckungsgrad der Kammer wird der Volumenstrom für alle Referenzmaterialien erfasst. Abbildung 67 stellt die ermittelten Messwerte dar, wobei beide Faserorientierungen des MAG-Geleges 0/90 berücksichtigt wurden.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

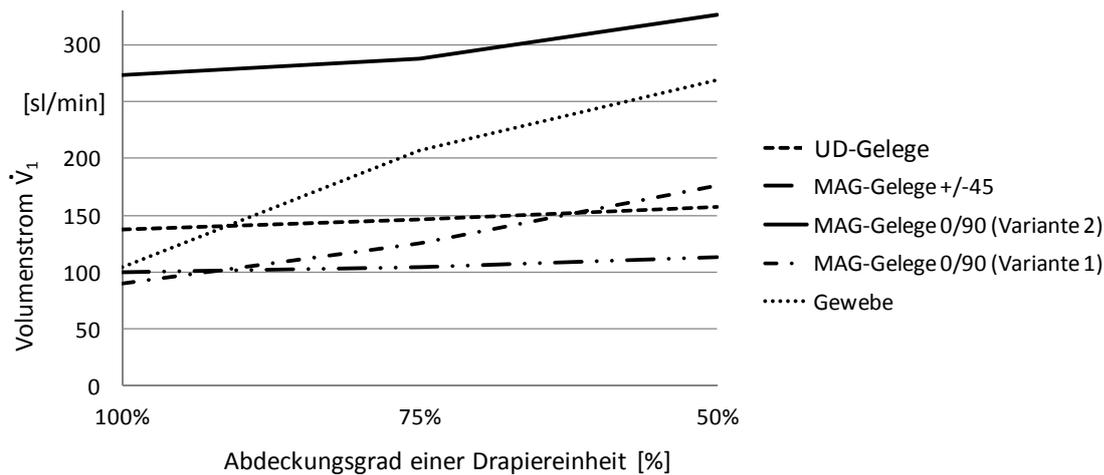


Abbildung 67: Benötigter Volumenstrom zum prozesssicheren Transport

Abhebeversuche

Zur Durchführung der Abhebeversuche werden die Zuschnitte durch eine programmierte Abrollbewegung von einer perforierten Unterlage aufgenommen. Der eingestellte Ausgangsvolumenstrom wird stufenweise erhöht bis ein Abheben des Textils möglich ist (\dot{V}_0). Anschließend wird der dazugehörige Volumenstrom \dot{V}_1 abgelesen.

Versuchsergebnisse

Mit dem eingesetzten Vakuumejektor können die Referenzmaterialien nur bei einer Überdeckung von 100 % aufgenommen werden. Bei einer geringeren Überdeckung ist ein Abheben des Textils nicht mehr möglich. Die oben beschriebenen Gründe verursachen bei dem MAG-Gelege 0/90 (Variante 2) eine partielle Textilablösung an den Ecken einer Drapiereinheit, was jedoch nicht zu einem Abschälen des gegriffenen Textils führt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

	Abdeckung 100%				
	UD-Gelege	MAG-Gelege +/-45	MAG-Gelege 0/90 (Variante 1)	MAG-Gelege 0/90 (Variante 2)	Gewebe
\dot{V}_0 [sl/min]	160	260	540	540	260
\dot{V}_1 [sl/min]	142,24	245,82	504,91	528,98	247,51
p_1 [mbar]	1,1353	1,5308	4,9731	2,5144	1,401



Abschälen des Textils

Tabelle 4: Benötigter Volumenstrom beim Abheben eines Testzuschnittes

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Im Rahmen der Vorversuche sind für eine Auslegung des erforderlichen Vakuumerzeugers die Messungen mit einer vollständigen Kammernüberdeckung ausreichend, da während der Textilaufnahme die Kammern zeilenweise geöffnet werden und somit zu Beginn der Aufnahmebewegung der maximal zur Verfügung stehende Volumenstrom auf die aufliegende Kammernzeile konzentriert werden kann.

5.2.4.3 Strömungssimulation ausgewählter Submodule

Die aus den Vorversuchen ermittelten Messwerte bilden die Datenbasis für die Strömungssimulation von ausgewählten Submodulen des Montagewerkzeuges. Da in der Trägereinheit und dem Förderschlauch zum Vakuumerzeuger der gesamte Volumenstrom aller Drapiereinheiten zusammengeführt wird, werden diese beiden Einheiten im Nachfolgenden einer detaillierten Betrachtung unterzogen.

Abbildung 68 zeigt den Aufbau des ersten Segments der Trägereinheit und der Vakuumzufuhr. Über die Versorgungsbohrungen wird der Volumenstrom von den Drapiereinheiten in das Innere der Trägereinheit geleitet. Das Übergangsrohr mit großen Bohrungen leitet den Volumenstrom in eine feststehende Dreheinführung. Von dort aus wird der Volumenstrom mit Hilfe eines Ansaugtrichters gebündelt und über einen Förderschlauch zu einem Vakuumerzeuger transportiert. Es wird eine zentrale Vakuumversorgung gewählt, da sich eine direkte Versorgung von jeder Drapiereinheit oder eine Versorgung von einzelnen Zeilen des Montagewerkzeuges äußerst aufwändig und verlustbehaftet gestaltet.

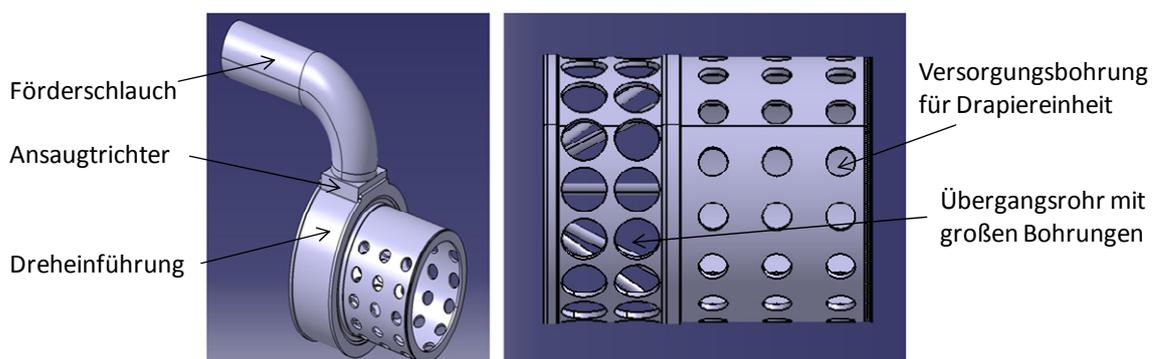


Abbildung 68: Aufbau der Trägereinheit (1. Segment) und der Vakuumzufuhr

Für die FEM-Simulation der Strömungsverhältnisse wurden 280 000 Knoten verarbeitet und ein Volumenstrom von 9600 l/min angenommen. Basierend auf den Messergebnissen (siehe Abbildung 67) entspricht dieser Wert einer

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Abschätzung des benötigten Volumenstroms für den Transport eines MAG-Gelege 0/90 (Variante 2) bei einer vollständigen Abdeckung aller 36 Kammern eines Segmentes. Die Simulationsergebnisse im Hinblick auf die auftretenden Strömungslinien und Druckverhältnisse sind in Abbildung 69 dargestellt.

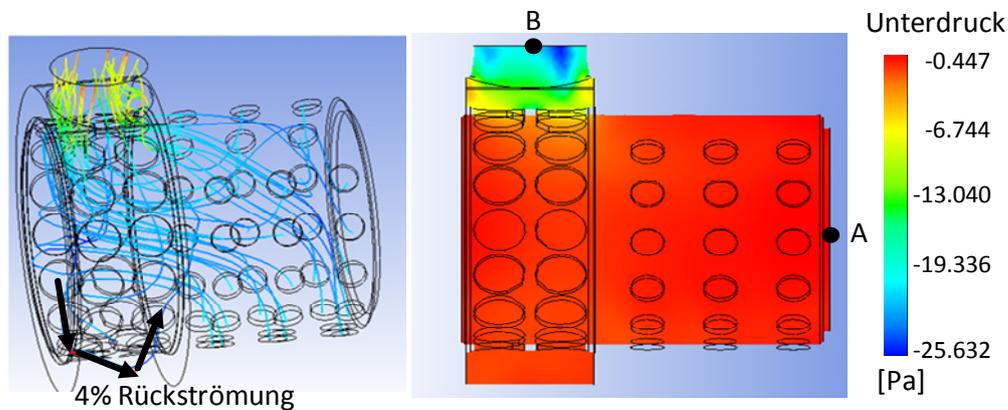


Abbildung 69: Strömungslinien (links) und Druckverhältnisse (rechts) in der Trägereinheit

Deutlich ist zu erkennen, dass innerhalb der Trägereinheit nahezu homogene Druckverhältnisse vorherrschen. Der simulierte Druckabfall von der vorderen Deckplatte (A) bis hin zum Schlauchansatzstutzen (B) beträgt dabei lediglich 0,24 mbar. Der Luftstrom tritt in das Übergangsrohr ein und strömt dort großteils ohne Verwirbelungen durch den Trichter in Richtung Vakuumerzeuger. Lediglich ein geringer Anteil von 4% des Volumenstroms verursacht beim Auftreffen auf die Wand eine Rückströmung (Pfeile in Abbildung 69 links).

Der angesaugte Volumenstrom wird über einen 10 m langen Förderschlauch mit 20 cm Durchmesser zum Vakuumerzeuger transportiert. Zur Auslegung des Vakuumerzeugers ist es notwendig, den voraussichtlichen maximalen Druckabfall im Förderschlauch zu ermitteln. Da die Schlauchführung lose am Roboter befestigt wird, können sich je nach Roboterstellung unterschiedliche Biegeradien und Krümmungen des Schlauches ausbilden, so dass lediglich eine grobe Abschätzung des Druckabfalls möglich ist. Unter Berücksichtigung des kleinstmöglichen Biegeradius wurde der Schlauch in mehreren Stellungen bei einem Volumenstrom von 9600 l/min simuliert, was zu einem maximalen Druckabfall von ca. 0,81 mbar führte.

5.2.4.4 Auswahl eines Vakuumerzeugers

Basierend auf den durchgeführten Messungen und den Simulationsergebnissen kann eine Worst-Case-Analyse zur Auswahl und Dimensionierung eines geeigneten Vakuumerzeugers erfolgen. Hierfür werden der notwendige Volumenstrom sowie der aufzubringende Differenzdruck des Vakuumerzeugers abgeschätzt.

Abschätzung des Volumenstroms

Für die Abschätzung des maximal notwendigen Volumenstroms wird der Transportfall betrachtet. Da für die initiale Textilaufnahme der zur Verfügung stehende Volumenstrom auf die aufliegende Kammernzeile (maximal neun Drapiereinheiten) konzentriert werden kann, ist diese Annahme zulässig. Zur Ermittlung des Volumenstroms wird daher angenommen, dass ein Textil aus MAG-Gelege 0/90 (Variante 2) transportiert werden soll, welches die äußeren Kammern am Rand des Montagewerkzeuges nur halb und die inneren Kammern komplett bedeckt. Gemäß den Messwerten aus Abbildung 67 ergibt sich somit folgende Abschätzung:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{max} &= n_{Rand} \cdot \dot{V}_{\dot{U}=50\%} + n_{Innen} \cdot \dot{V}_{\dot{U}=100\%} \\ &= 38 \cdot 326 \frac{l}{min} + 70 \cdot 273 \frac{l}{min} = 31498 \frac{l}{min}\end{aligned}\quad (5-6)$$

Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsaufschlages, um z. B. etwaige Leckagen im MWZ auszugleichen, wird der maximale Volumenstrom des Vakuumerzeugers zu 35 000 l/min festgelegt.

Abschätzung des Druckabfalls des Gesamtsystems

Der Vakuumerzeuger muss in der Lage sein, den Druckabfall über dem Gesamtsystem aufzubringen. Die maximale Differenzdruck Δp_{max} setzt sich zusammen aus dem Druckabfall in den Einzelkomponenten, so dass Δp_{max} unter Zuhilfenahme der Simulationsergebnisse und des Messergebnisses aus Tabelle 4 (MAG-Gelege 0/90, Variante 1) folgendermaßen berechnet werden kann:

$$\begin{aligned}\Delta p_{max} &= \Delta p_{Schlauch} + \Delta p_{Trägereinheit} + \Delta p_{Drapiereinheit} \\ &= 0,81 \text{ mbar} + 0,24 \text{ mbar} + 4,97 \text{ mbar} = 6,02 \text{ mbar}\end{aligned}\quad (5-7)$$

Da ein ausreichender Differenzdruck für ein prozesssicheres Greifen essentiell ist (siehe Gl.(5-8), S. 117; Gl. (6-3), S. 144), wird unter Berücksichtigung eines Sicherheitsaufschlages der maximal aufzubringende Differenzdruck des Vakuumerzeugers zu 12 mbar festgelegt.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Für die Auswahl eines geeigneten Vakuumerzeugers müssen die Mindestanforderungen (Volumenstrom: 35 000 l/min = 35 m³/min, Differenzdruck: 12 mbar) eingehalten werden. Zudem muss aber auch eine Druckregelung vorgesehen werden, da die einzelnen Prozessphasen (Aufnahme, Transport, Drapiervorgang) sowie die unterschiedlichen Materialeigenschaften und Geometrien der Zuschnitte für ein prozesssicheres Greifen individuell einstellbare Differenzdrücke erfordern.

Mit Hilfe einer Marktrecherche werden zunächst mögliche Lösungsalternativen identifiziert und deren technische Eigenschaften ermittelt. Zur Auswahl stehen folgende recherchierten Systeme, deren Kenndaten im Hinblick auf die erreichbaren Differenzdrücke und Volumenströme stark differieren (siehe Abbildung 70).

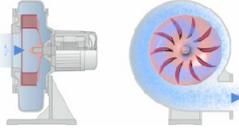
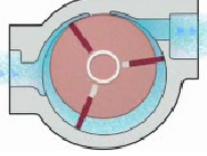
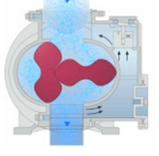
Radialgebläse	Seitenkanalverdichter	Drehschieberpumpe	Wälzkolben-Vakuumpumpe
			
Volumenströme: 3 bis 140 m ³ /min	Volumenströme: 3 bis 17,5 m ³ /min	Volumenströme: 0,5 bis 25 m ³ /min	Volumenströme: 0,5 bis 170 m ³ /min

Abbildung 70: Lösungsalternativen für Vakuumerzeuger (ELMO RIETSCHLE 2012)

Durch eine Analyse typischer Betriebskennlinien und der technischen Kenndaten wird untersucht, ob die festgelegten Maximalwerte im Hinblick auf den erforderlichen Volumenstrom und Differenzdruck sicher erreicht werden können und wie eine Druckregelung realisiert werden kann. Hierbei besteht zum einen die Möglichkeit, eine verstellbare Drosselklappe zur Verengung des Querschnittes in das Leitungssystem einzubringen. Zum anderen kann mit Hilfe eines Frequenzumrichters eine Ausgangsspannung mit veränderlicher Amplitude und Frequenz generiert werden, so dass eine stufenlose Einstellung der Drehzahl eines Vakuumerzeugers möglich ist. Diese Variante wird bevorzugt, da Frequenzumrichter industriell etabliert und in zahlreichen Ausführungsvarianten auf dem Markt verfügbar sind. Zudem können analoge Stellvorgaben oder Sensorsignale häufig direkt verarbeitet werden.

Ein Abgleich der Datenblätter zeigt, dass die erforderlichen Mindestkennwerte lediglich bei Verwendung einer Wälzkolbenpumpe sowie eines Radialventilators

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

eingehalten werden können. Da Wälzkolbenpumpen meist als Pumpenstand in Kombination mit weiteren Pumpen zum Einsatz kommen und für höhere Leistungsbereiche ausgelegt sind, ist diese Art der Vakuumerzeugung sehr teuer und deutlich überdimensioniert. Die Wahl fällt daher auf einen Radialventilator, welcher mit Hilfe eines Frequenzumrichters geregelt werden kann. Die Betriebskennlinie des ausgewählten Radialventilators ist in Abbildung 71 dargestellt.

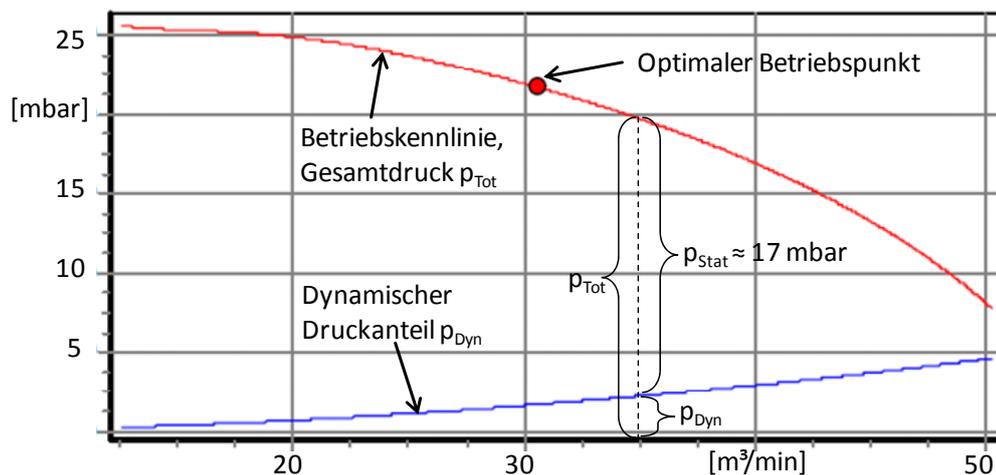


Abbildung 71: Betriebskennlinie des ausgewählten Vakuumerzeugers (ELEKTOR AIRSYSTEMS GMBH 2010)

Die parabelförmige Anlagenkennlinie des modularen Montagewerkzeuges, welche den Druckabfall in Abhängigkeit vom Volumenstrom angibt, variiert je nach Konfiguration und Betriebszustand. Da sich der Betriebspunkt aus dem Schnittpunkt der Anlagenkennlinie mit der Betriebskennlinie des Vakuumerzeugers ergibt, sind viele verschiedene Betriebspunkte möglich. Der Gesamtdruck p_{Tot} des Vakuumerzeugers (Abbildung 71, obere Kennlinie) setzt sich dabei aus einem statischen und einem dynamischen Druckanteil zusammen. Da der druckseitig angeschlossene Kanal denselben Querschnitt wie die Ausblasöffnung besitzt, ist der dynamische Druckanteil p_{Dyn} als Verlust anzusetzen, so dass nur der statische Druckanteil p_{Stat} als nutzbarer Differenzdruck zur Verfügung steht. Mit einem statischen Differenzdruck von 17 mbar bei 35 m³/min kann der Vakuumerzeuger zum Greifen der Referenztextilien verwendet werden. Da es sich bei dem Volumenstrom von 35 m³/min um einen Maximalwert handelt, wurde der Vakuumerzeuger so ausgewählt, dass der optimale Betriebspunkt mit dem höchsten Wirkungsgrad, welcher durch den Punkt in der Betriebskennlinie (siehe Abbildung 71) markiert ist, bei einem geringeren Volumenstromverbrauch von ca. 30,6 m³/min erreicht wird.

5.2.5 Umsetzung eines roboterbasierten Endeffektors

5.2.5.1 Mechanischer Aufbau

Aufbauend auf der bestehenden Konzeption, den Versuchsergebnissen der Funktionsmuster sowie der Auslegung der Einzelkomponenten und der Strömungssimulation fließen die gewonnenen Erkenntnisse in die Konstruktion und prototypische Umsetzung des großflächigen Montagewerkzeuges ein (siehe Abbildung 72). Die Mantelfläche des zylinderförmigen MWZ besteht aus insgesamt 108 Drapiereinheiten, wobei am Umfang des MWZ zwölf und in der Breite des MWZ neun Drapiereinheiten angebracht sind. Da jede einzelne Drapiereinheit über einen bistabilen Aktor verfügt, können einzelne Saugbereiche von 0,12 m x 0,185 m auf der 1,08 m x 2,22 m großen Saugfläche selektiv aktiviert werden. Über eine Dreheinführung wird der angesaugte Volumenstrom über einen Saugschlauch zum Vakuumerzeuger geleitet. Die Dreheinführung ist feststehend gestaltet, so dass bei einer Abrollbewegung des MWZ ein Aufwickeln des Saugschlauches vermieden wird. Jede Drapiereinheit integriert eine elastische, hitzebeständige Schaumstoffschicht mit Durchgangsbohrungen, auf deren Oberfläche ein Textil mit mäanderförmig aufgenähtem Heizdraht und integriertem NTC-Sensor zur Temperaturüberwachung und -regelung angebracht ist. Mit Hilfe der 108 Heizfelder lässt sich somit eine selektive Erwärmung des gegriffenen Textils realisieren. Das Montagewerkzeug ist aus drei baugleichen Segmenten aufgebaut, welche aus jeweils 36 Drapiereinheiten bestehen (SCHUTZRECHT DE 20 2009 014 155.1). Die Gleichartigkeit der Segmente, der Drapiereinheiten sowie deren Anschlüsse zur Trägereinheit ermöglicht eine schnelle und einfache Montage und Demontage des MWZ. Je nach zu drapierendem Referenzbauteil kann das modular aufgebaute MWZ individuell in der Breite und in der Gestaltung der Drapiereinheiten konfiguriert werden, so dass ein hochflexibles Design umgesetzt ist, welches den hohen Anforderungen im Hinblick auf die vorherrschende Variantenvielfalt gerecht wird.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

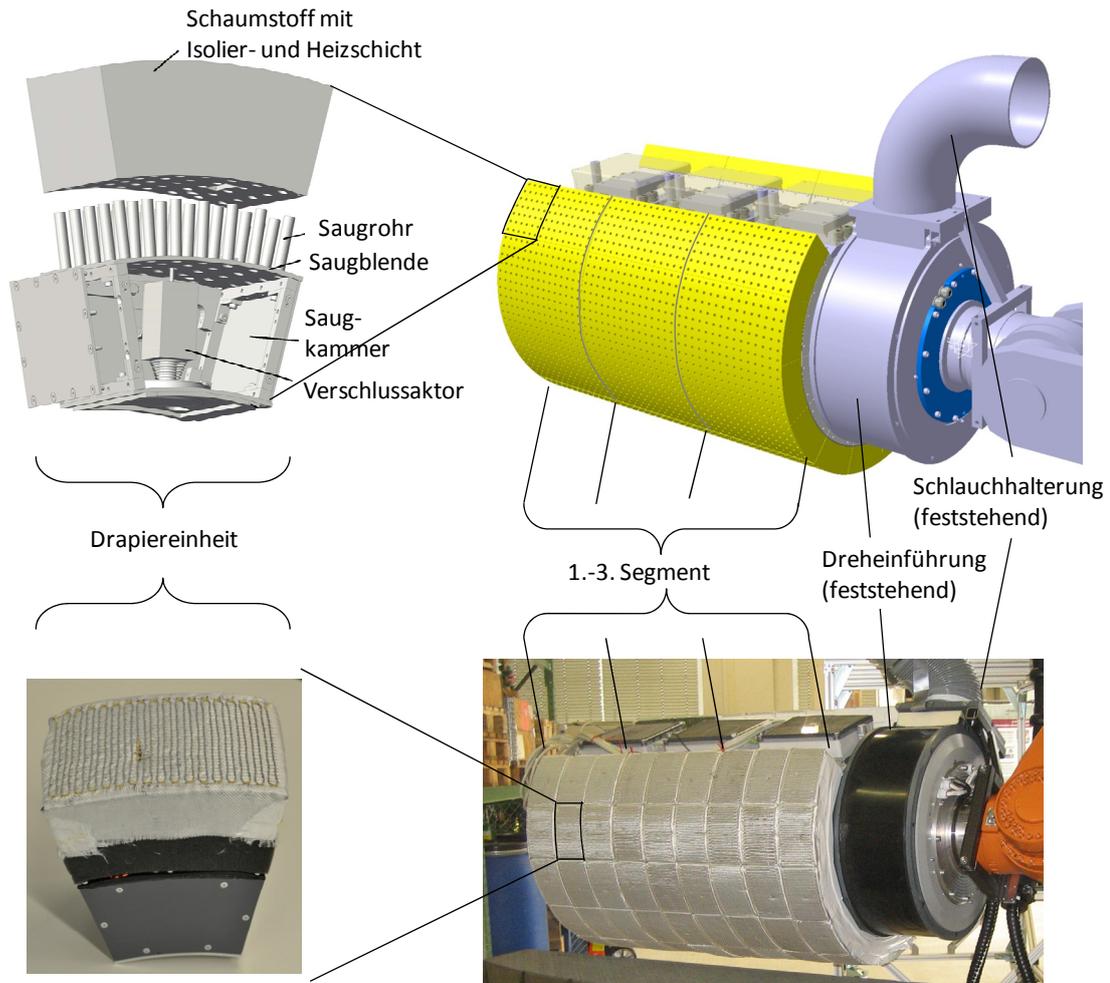


Abbildung 72: CAD-Modell (oben) und umgesetztes Montagewerkzeug in voller Ausbaustufe (unten)

5.2.5.2 Sensorintegration

Für einen optimalen Betrieb des MWZ ist es wichtig, die relevanten Prozessgrößen zu erfassen. Die aufgenommenen Messgrößen können anschließend zur Prozessüberwachung bzw. zur Prozessregelung hergenommen werden.

Differenzdruckmessung

Die Haltekraft eines Textils wird maßgeblich von dem über dem Textil abfallenden Differenzdruck Δp_{Textil} beeinflusst (siehe Gl. (6-2), Gl. (6-3), S. 144). Messtechnisch erfasst werden kann jedoch nur der sich einstellende Differenzdruck Δp_{ges} , welcher sich aus dem Druckabfall am Textil und am MWZ zusammensetzt.

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_{\text{MWZ}} + \Delta p_{\text{Textil}} \quad (5-8)$$

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Die Simulationsergebnisse aus Kapitel 5.2.4.3 zeigen, dass im Inneren der Trägereinheit nahezu homogene Druckverhältnisse vorherrschen, wohingegen es am Schlauchanschluss zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten kommt und Verwirbelungen auftreten können. Über eine Messstelle am stirnseitigen Deckel des MWZ wird daher der sich einstellende Differenzdruck Δp_{ges} mit Hilfe eines Differenzdrucksensors erfasst. Der Differenzdrucksensor ist in einem am Deckel befestigten Schaltschrank untergebracht, welcher ein Messchassis zur Verarbeitung der Sensordaten integriert (siehe Abbildung 73). Dadurch wird der Messaufbau vor CF-Staub geschützt und die notwendigen Verdrahtungswege minimiert.

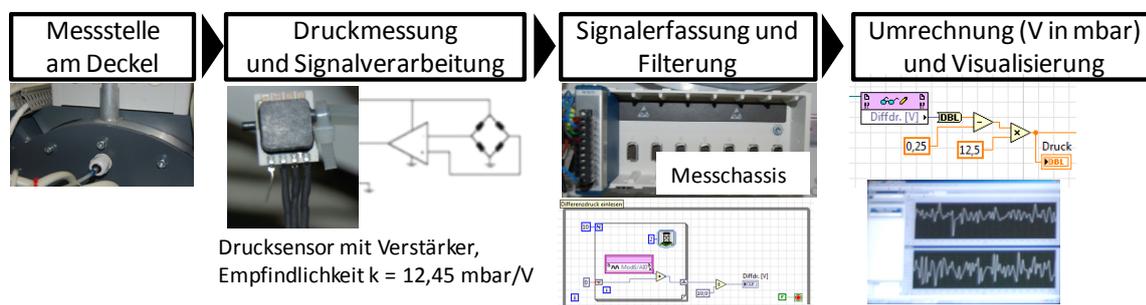


Abbildung 73: Sensorapplikation zur Erfassung des Differenzdrucks

Volumenstrommessung

Als weitere Prozessgröße wird der erzeugte Volumenstrom mit Hilfe eines Prantl-Staurohrs erfasst, welches in den Saugschlauch des MWZ integriert wird (siehe Abbildung 74). Die Funktionsweise des Prantl-Staurohrs basiert auf dem Energieerhaltungssatz von Bernoulli, demzufolge gilt:

$$p_{Dyn} + p_{Stat} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + p_{Stat} = p_{Tot} = const. \quad (5-9)$$

Mit Hilfe des Prantl-Staurohrs kann sowohl der Gesamtdruck über die vordere Öffnung, als auch der statische Druck über die seitliche Bohrung erfasst werden. Ein Differenzdrucksensor errechnet den dynamischen Druck, indem der statische Druck vom Gesamtdruck subtrahiert wird. Durch Umstellen der Gl. (5-9) kann die Strömungsgeschwindigkeit v und daraus der Volumenstrom \dot{V} berechnet werden.

$$v = \sqrt{\frac{(p_{Tot} - p_{Stat}) \cdot 2}{\rho}} = \sqrt{\frac{p_{Dyn} \cdot 2}{\rho}} \quad (5-10)$$

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

$$\dot{V} = A_{\text{Schlauch}} \cdot v \quad (5-11)$$

Mit Hilfe des Prantl-Staurohrs wird der Volumenstrom nur in der Mitte des Schlauches erfasst. Es muss dabei beachtet werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Wandreibung in den Randbereichen geringer ist und dies gemäß Gl. (5-11) direkten Einfluss auf den dort vorherrschenden Volumenstrom besitzt. Für die Messung ist es notwendig, Turbulenzen zu vermeiden und für eine drallfreie Strömung zu sorgen. Eine gerade Ein- und Auslaufstrecke ist daher für eine Beruhigung der Strömung vorgesehen.

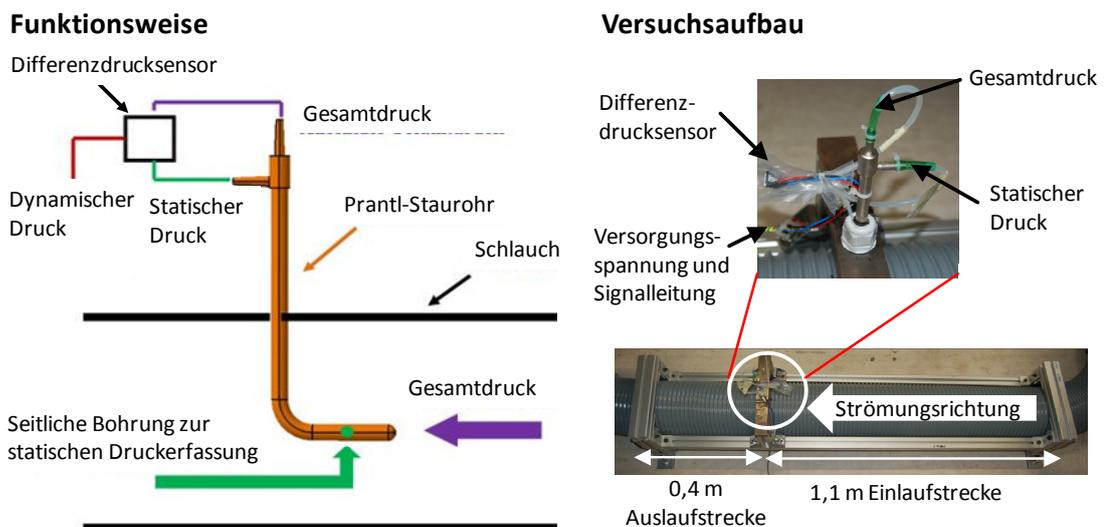


Abbildung 74: Sensorapplikation zur Erfassung des Volumenstroms

Erfassung der Heizfeldtemperatur

Für die thermische Aktivierung des thermoplastischen Binders auf der Rückseite der Zuschnitte müssen die Heizfelder des MWZ bis zur vorgegebenen Temperatur T_{Heiz} erwärmt werden. Zur Temperaturerfassung werden NTC-Thermistoren verwendet, da sie zahlreiche Vorteile bieten:

- Geringe Baugröße → geringe Wärmekapazität → schnelle Reaktionszeit
- Flexible Anschlussdrähte → einfache Befestigung am Heiztextil
- Geringe Streuung der Materialkonstanten → reproduzierbare Messungen
- Preiswert

Zur Erfassung der heißesten Stelle wird der Sensor direkt an den Heizdraht angenäht (siehe Abbildung 75) und über die in Anhang 10.9 gezeigte Messschaltung ausgewertet. Der NTC-Sensor wird über einen Vorwiderstand betrieben, so dass die Spannungs-Temperatur-Kennlinie im gewünschten Messbereich bei 100°C linearisiert wird.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

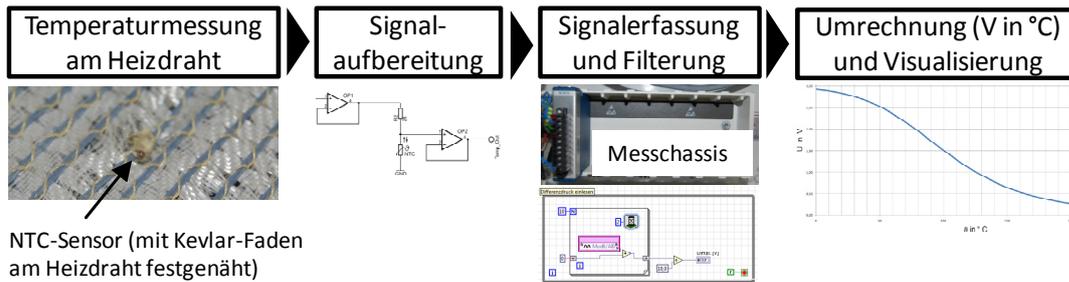


Abbildung 75: Sensorapplikation zur Temperaturerfassung auf einem Heizfeld

5.2.5.3 Ansteuerungstechnik

Zur Durchführung der Drapieraufgabe spielt die Ausgestaltung des Ansteuerungssystems, mit Hilfe dessen die erforderlichen Funktionalitäten des Montagewerkzeuges anforderungsgerecht erfüllt werden müssen, eine maßgebliche Rolle. Die wesentlichen Aufgaben der integrierten Ansteuerungstechnik lassen sich dabei folgendermaßen zusammenfassen:

- Empfangen, Auswerten und Weiterverarbeiten von Stellvorgaben und funktionsrelevanten Einstellparametern
- Öffnen und Schließen von Hubmagneten
- Aktivieren und Deaktivieren der Heizfelder
- Regelung der Heiztemperatur
- Regelung des Differenzdrucks
- Erkennung und Reaktion auf Störungen (z. B. Heizfeld-Überhitzung etc.)

Der modulare Aufbau und die Funktionsweise des Montagewerkzeuges erfordern ebenfalls eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der integrierten Ansteuerungstechnik, da aufgrund der variierenden Zuschnitte und Bewegungsabfolgen unterschiedlichste Konfigurationen für Saugen, Heizen und Differenzdruck während des Lagenaufbaus abgearbeitet werden müssen. Da das modulare MWZ in verschiedenen Ausbaustufen betrieben werden kann, ist ebenfalls eine modulare Gestaltung der Ansteuerungstechnik notwendig. Zudem bestimmen weitere Anforderungen die konkrete Detaillierung des integrierten Steuerungssystems:

- Geringer Energieverbrauch
- Verwendung von Standardkomponenten
- Reduzierung des Verkabelungsaufwandes
- Einfache Wartung und Fehleranalyse
- Reduzierung von Gewicht und Platzbedarf

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Die erarbeiteten Aufgaben und Anforderungen bilden die Grundlage für die Konzeption des Steuersystems unter Berücksichtigung der Hierarchieebenen der Automatisierungstechnik (LUNZE 2008). Abbildung 76 zeigt eine schematische Darstellung der im MWZ integrierten Ansteuerungstechnik, welche zur flexiblen Auswertung und Weiterverarbeitung von prozessbasierten Datensätzen dient.

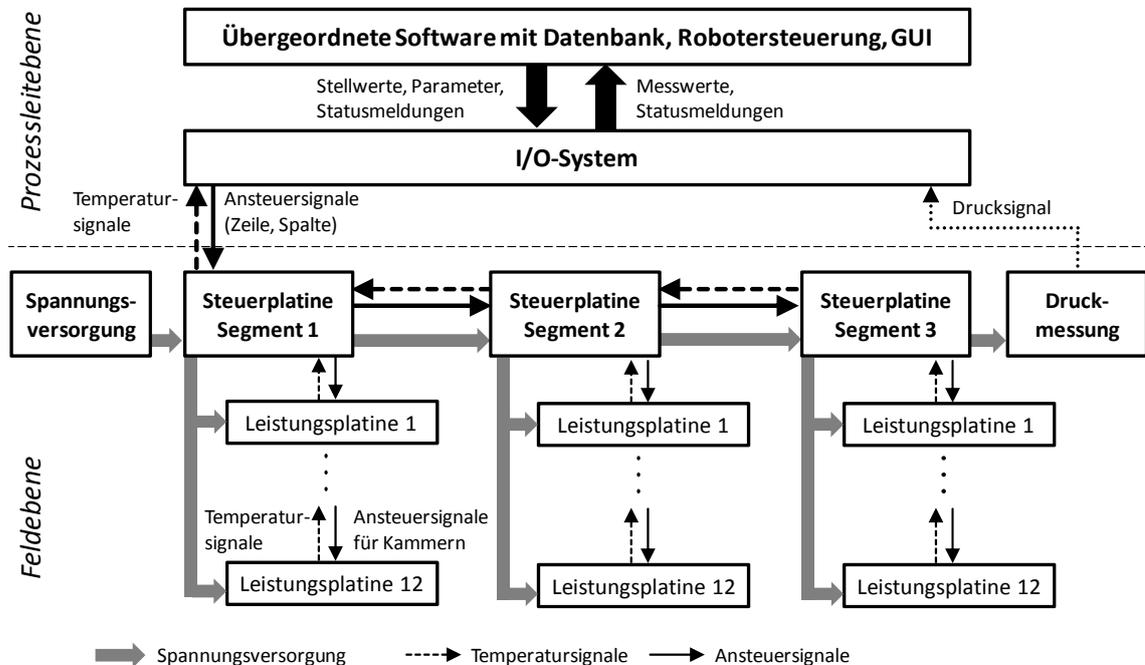


Abbildung 76: Schematische Darstellung des Ansteuerungskonzeptes des MWZ

I/O-System

Das I/O-System empfängt in einem abstrahierten Datenformat Informationen über Sollwertvorgaben für entsprechende Stellwerte, Parametereinstellungen oder Statussignale und sendet Statusmeldungen und Messwerte des MWZ zurück. Die weiterzuverarbeitenden Daten werden dabei durch ein Graphical User Interface (GUI), eine übergeordnete Anwendungssoftware oder die Robotersteuerung mit Hilfe von bahnsynchronen Triggernachrichten an das I/O-System übermittelt. Gleichzeitig bildet das I/O-System die Schnittstelle zu den Platinen der Feldebene, so dass prozessrelevante Messwerte (Temperatur und Differenzdruck) eingelesen werden können. Auf Basis dieser Informationen kann zum einen die Temperatur- und Druckregelung im I/O-System aufgebaut werden und zum anderen eine Aufbereitung der abstrahierten Daten zur anforderungsgerechten Ausgabe der Stellsignale an den entsprechenden Anschlüssen der Einschubkarten des I/O-Moduls erfolgen. Zur Darstellung der erforderlichen Funktionen wird ein compact Realtime (cRIO)-System der Firma National Instruments

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen Programmable Automation Controller (PAC), welcher eine hohe Zuverlässigkeit, Rechenleistung und Flexibilität aufweist, so dass notwendige Änderungen durch eine entsprechende Programmierung des PAC-Systems leicht umgesetzt werden können (BELL 2005).

Steuerplatine

Jedes Segment des MWZ enthält eine Steuerplatine. Um den Ansteuerungsaufwand zu reduzieren, erfolgt die Ansteuerung der Hubmagneten und Heizfelder mit Hilfe einer Matrixsteuerung. Hierbei wird durch Übermittlung der jeweiligen Zeilen- und Spaltensignale eine eindeutige Aktion in der jeweiligen Drapiereinheit hervorgerufen. Auf der Steuerplatine werden die Zeilen- und Spaltensignale des I/O-Moduls ausgewertet und nach einer Signalaufbereitung als entsprechendes Schaltsignal an die Leistungsplatine weitergeleitet. Externe Netzteile stellen die zum Betrieb der Platinen, der Hubmagnete und der Heizfelder notwendige Spannung bereit, wobei eine Spannungswandlung und Absicherung auf der Steuerplatine stattfindet, bevor eine Weiterleitung an die Leistungsplatinen erfolgt. Da prozessbedingt jeweils nur die aufliegende und die im Bewegungsablauf folgende Kammerzeile des MWZ auf eine vorgegebene Temperatur geregelt werden müssen, kann die Anzahl der notwendigen analogen Eingänge und der Verkabelungsaufwand weiter reduziert werden, indem Analog-Multiplexer nur die relevanten Temperatursignale an das I/O-System weiterleiten.

Leistungsplatine

Die drei Kammern in der Zeile eines Segments werden von einer Leistungsplatine angesteuert. In Abhängigkeit von den einzelnen Schaltsignalen der Steuerplatine werden auf der Leistungsplatine über Leistungshalbleiterschalter (MOSFETs) die jeweiligen Spannungen zum Schalten der Hubmagneten bzw. der Heizfelder angelegt. Gleichzeitig wird die gemessene Heiztemperatur an die Steuerplatine weitergeleitet.

5.3 Aufbau einer Versuchsanlage

5.3.1 Komponenten der Versuchsanlage

Zur Überprüfung der in Kapitel 4.2 entwickelten Vorgehensmethodik und zur Durchführung von experimentellen Versuchen am definierten Referenzszenario wurde die in Abbildung 77 dargestellte Versuchsumgebung installiert. Der zu

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

drapierende Zuschnitt liegt zu Beginn des automatisierten Prozesses bereits verteilt auf dem Ablagesystem bereit. Nach der Aufnahme des Textils erfolgt der Transfer zum Formwerkzeug. Anschließend beginnt die definierte Verformung und Fixierung des Textils auf dem bereitgestellten Formwerkzeug.

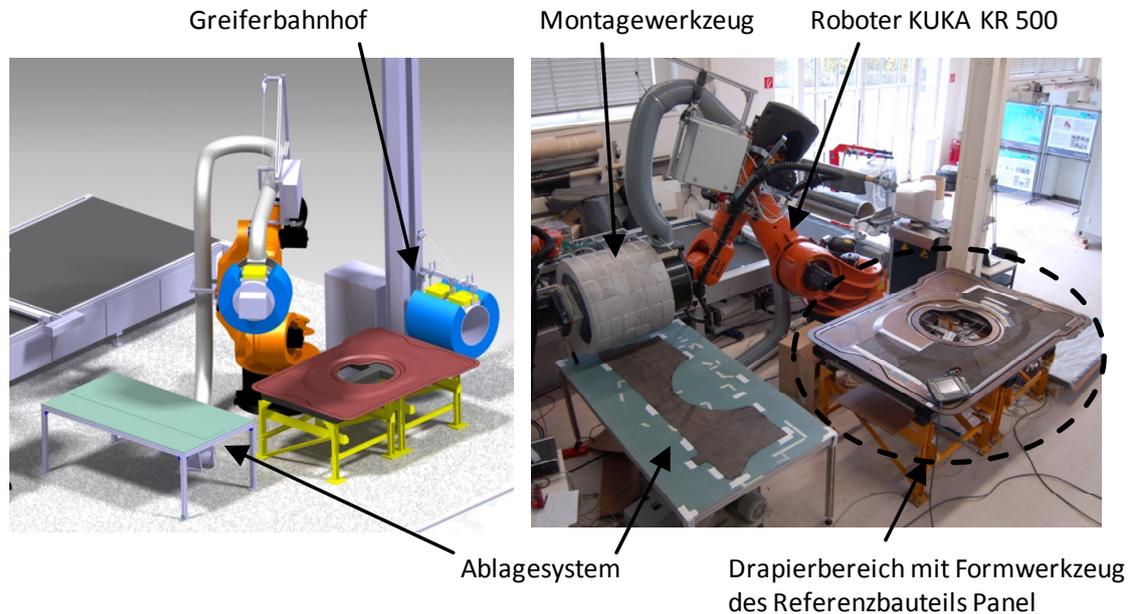


Abbildung 77: Realisierte Versuchsanlage zur Validierung des MWZ

Die realisierte Versuchsanlage besteht dabei aus folgenden Einzelkomponenten:

Montagewerkzeug mit Greiferbahnhof

Das Montagewerkzeug bildet die zentrale Einheit der Versuchsanlage. Aufgrund der Modularität des MWZ muss eine Möglichkeit geschaffen werden, nicht benötigte Segmente platzsparend zu lagern. Da das erste Segment dauerhaft am Montagewerkzeug verbleibt, wird für die beiden übrigen Segmente an einem Stahlträger in der Versuchshalle ein Greiferbahnhof installiert, welcher zwei Segmente aufnehmen kann. Über einen mobilen Werkstattkran können die einzelnen Segmente zum Greiferbahnhof transportiert werden.

Roboter

Zur Anbindung des Montagewerkzeuges wird ein 6-Achsen-Knickarmroboter des Typs KUKA KR 500 mit einer KR C2-Steuerung eingesetzt. Der Roboter besitzt eine Nenntaglast von 500 kg und eine maximale Reichweite von 2826 mm. Die PC-basierte Steuerung kann mit Hilfe der Programmiersprache KUKA Robot Language (KRL) programmiert werden und über Schnittstellen (z. B. RS 232) mit anderen Einheiten kommunizieren.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Ablagesystem

Die Ablagefläche des Lagertisches ist mit 2236 mm x 1189 mm größer als die Drapieroberfläche des MWZ. Der damit gewonnene Spielraum wird für eine optimale Positionierung der bereitliegenden Zuschnitte genutzt. Um ein Ansaugen der bereitliegenden Textilien zu ermöglichen, ist die Oberfläche des Ablagesystems luftdurchlässig gestaltet. Gleichzeitig verhindert das aufgeraute Oberflächenmaterial des Ablagesystems ein Verrutschen des bereitliegenden Zuschnittes von der festgelegten Aufnahmeposition. Der Lagertisch steht dabei stellvertretend für eine Lagerungs- oder Verkettungseinheit, welche in einem automatisierten Szenario für die Bereitstellung der Zuschnitte zum Einsatz kommen könnte.

Drapierbereich mit Formwerkzeugen

Im Drapierbereich werden die Formwerkzeuge der Referenzbauteile Panel, Spant und Diaphragm positioniert. Neben einer geeigneten Platzierung, welche im Vorfeld simulativ abgesichert werden muss (siehe Kapitel 5.3.2), ist für eine ausreichende Fixierung der Formwerkzeuge zu sorgen. Bei der Auswahl einer geeigneten Aufspannvorrichtung ist dabei auf geringen Platzbedarf und kurze Wechselzeiten zu achten. Insbesondere gilt es zu berücksichtigen, dass sowohl Spant als auch Diaphragm nur von innen gespannt werden können, da auf der Oberseite der Preformaufbau erstellt wird. Die eingesetzte Positionierungsvorrichtung für Spant und Diaphragm beinhaltet manuelle Schubstangen-Spanner zum Fixieren der Formwerkzeuge. Das Panel wird durch massive Stahlträger in der Versuchsumgebung positioniert. Zur Vermeidung von Umbauzeiten ist die Aufspannung des Diaphragm so gestaltet, dass sie sowohl auf dem Panel als auch auf dem Spant aufgesetzt werden kann.

5.3.2 Simulative Absicherung der Versuchsanlage

Um den automatisierten Ablauf im Vorfeld absichern zu können, wird dieser in der Simulationsumgebung KUKA.Sim Pro nachgebildet. Durch die Simulation können wertvolle Erkenntnisse über die optimale Positionierung der Formwerkzeuge und die Notwendigkeit von Zusatzachsen gewonnen werden. Damit beeinflusst die Simulation maßgeblich die Ausgestaltung einzelner Komponenten des Versuchsstandes (z. B. Aufspannungen, Lagersystem). Desweiteren bietet die Simulation die Möglichkeit, verschiedene Ablaufvarianten des Drapiervorgangs zu überprüfen und diese hinsichtlich wirtschaftlichen Kriterien zu bewerten. Im Fokus steht hierbei eine Verkürzung der notwendigen Prozesszeit, welche z. B.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms

durch eine geschickte Bahnplanung oder die Mehrfachaufnahme von Zuschnitten deutlich reduziert werden kann.

Für den automatisierten Ablauf existieren einschränkende Randbedingungen, welche aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit bereits beim Simulationsentwurf berücksichtigt werden müssen:

- Vermeidung von Kollisionen zwischen
 - Roboter bzw. MWZ und baulichen Gegebenheiten der Versuchsumgebung (z. B. Wände, Säulen)
 - Roboter bzw. MWZ und Komponenten der Versuchsumgebung (z. B. Lagersystem, Schneidtisch, Absortierwerkzeug etc.)
 - Roboter und MWZ (Eigenkollisionen)
- Maximale Reichweite des Roboters
- Achslimitationen des Roboters
- Notwendige Achsstellungen (z. B. für Zugänglichkeit)

Die realisierte Ablaufsimulation liefert wichtige Angaben zur räumlichen Anordnung des Roboters, des Ablagesystems und der Formwerkzeuge in der Versuchsumgebung. Desweiteren können Erkenntnisse über die Positionierung der Zuschnitte auf dem Ablagesystem und der Oberfläche des MWZ sowie über die Programmierung der Verfahrenswege gewonnen werden. In Anlehnung an Kapitel 4.4.3 kommt beim Diaphragm und beim Spant eine mehrstufige Drapierstrategie zum Einsatz (siehe Anhang 10.10) (REINHART & EHINGER 2012).

Aufgrund ihrer Ähnlichkeit können die 38 Lagen des Spantes neun Lagentypen zugeordnet werden (siehe Abbildung 91), für welche jeweils eine mehrstufige Drapierstrategie mit maximal zehn Teilschritten angewandt werden kann (siehe Anhang 10.10). Durch eine geschickte Kombination der einzelnen Teilschritte, welche in Unterprogrammen abgebildet werden, ist es möglich, alle Legebewegungen einer Lage darzustellen und somit den notwendigen Programmieraufwand zu reduzieren. Aufgrund des U-förmigen Profils und der Abmaße des Spantes können in einer Position nicht alle Seiten des Referenzbauteiles erreicht werden. Es muss daher eine Zusatzachse in die Versuchsumgebung integriert werden, so dass durch eine lineare Verschiebung des Spantes um 800 mm beide Seitenflächen für das MWZ zugänglich sind (siehe Abbildung 78).

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

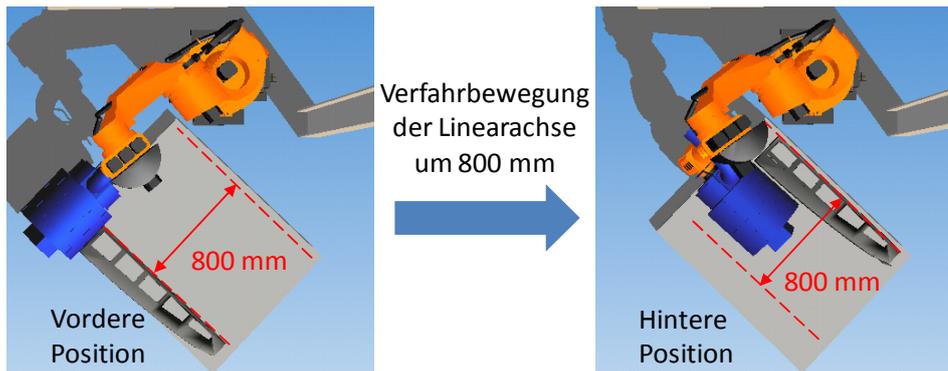


Abbildung 78: Linearverschiebung des Spantes

Die 54 Einzellagen des Panels lassen sich 14 Lagentypen zuordnen (siehe Abbildung 91). Auffällig ist hierbei die große Variantenvielfalt der Zuschnitte, für die jeweils eine individuelle Drapierstrategie gewählt werden muss. Da die Erhöhungen der Bauteiloberfläche von der elastischen Schaumstoffschicht ausgeglichen werden (siehe Abbildung 51), kann dieses Referenzbauteil wie eine zweidimensionale Preform behandelt werden. Aufgrund der zahlreichen kleinen Zuschnitte des Preformaufbaus ist eine hohe Positionsfreiheit der Einzelzuschnitte auf der Oberfläche des Montagewerkzeuges gegeben.

Durch die Mehrfachaufnahme von Zuschnitten wird die komplette Oberfläche des MWZ ausgenutzt und somit die notwendige Prozesszeit durch das Vermeiden von überflüssigen Verfahrwegen deutlich reduziert. Bei der Handhabung von mehreren aufeinanderfolgenden, kleinen Zuschnitten treten die Vorteile einer Mehrfachaufnahme besonders stark zu Tage. Bei der Mehrfachaufnahme ist jedoch zu beachten, dass ein ausreichender Abstand zwischen den Zuschnitten besteht, da eine Drapiereinheit nur von einem Zuschnitt bedeckt sein sollte und auch eine Berührung zwischen Formwerkzeug und nicht drapiertem Zuschnitt zu vermeiden ist. Bei der Verwendung einer erweiterten Anzahl an Segmenten zur Vergrößerung der Werkzeugbreite entstehen Vorteile hinsichtlich der notwendigen Prozesszeit. Diese müssen jedoch genau mit den resultierenden Nachteilen abgewogen werden, so dass je nach Anwendungsfall eine Einzelfallentscheidung über die eingesetzte Ausbaustufe des MWZ zu treffen ist (siehe Tabelle 5).

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Tabelle 5: Vor- und Nachteile einer erweiterten Anzahl an Segmenten

Vorteile	Nachteile
+ Höhere Positionierfreiheit der Zuschnitte auf Oberfläche des MWZ + Häufigere Mehrfachaufnahme möglich + Reduktion der sekundären Drapierbewegungen + Geringere Umrüstzeiten	- Gewichtserhöhung - Einschränkungen bei Erreichbarkeit und Kollisionsfreiheit

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte kann mit Hilfe der Mehrfachaufnahme die in Tabelle 6 dargestellte Reduktion der notwendigen Aufnahmebewegungen erzielt werden.

Tabelle 6: Reduktion der Einzellagenaufnahmen durch Mehrfachaufnahme

Referenzbauteil	Anzahl der verwendeten Segmente	Reduktion der notwendigen Aufnahmebewegungen
Diaphragm	1	8 → 4
	2	8 → 2
Spant	2	38 → 29
	3	38 → 19
Panel	3	54 → 19

5.4 Umsetzung der aufgabenorientierten Bahnplanung zur rechnergestützten Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges

5.4.1 Allgemeines

Zur Unterstützung des automatisierten Drapierprozesses wird eine aufgabenorientierte Bahnplanung umgesetzt. Der komplexe und langwierige Prozess des manuellen Einlernens von Bewegungspunkten kann dadurch für den Bediener entfallen. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, über eine graphische Bedienoberfläche die Legeaufgabe zu definieren und auf Basis dieser Daten Robotercode mit bahnsynchronen Schaltsignalen abzuleiten.

Die zur Verfügung stehenden Fertigungsdaten basieren auf dem konventionellen Fertigungsprozess. Bei den Referenzbauteilen Spant und Diaphragm wird hierbei

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

ein Schichtaufbau generiert, welcher anschließend mit Hilfe des Formwerkzeuges im Aushärtewerkzeug zu einer Preform umgeformt wird (siehe Abbildung 79 links).

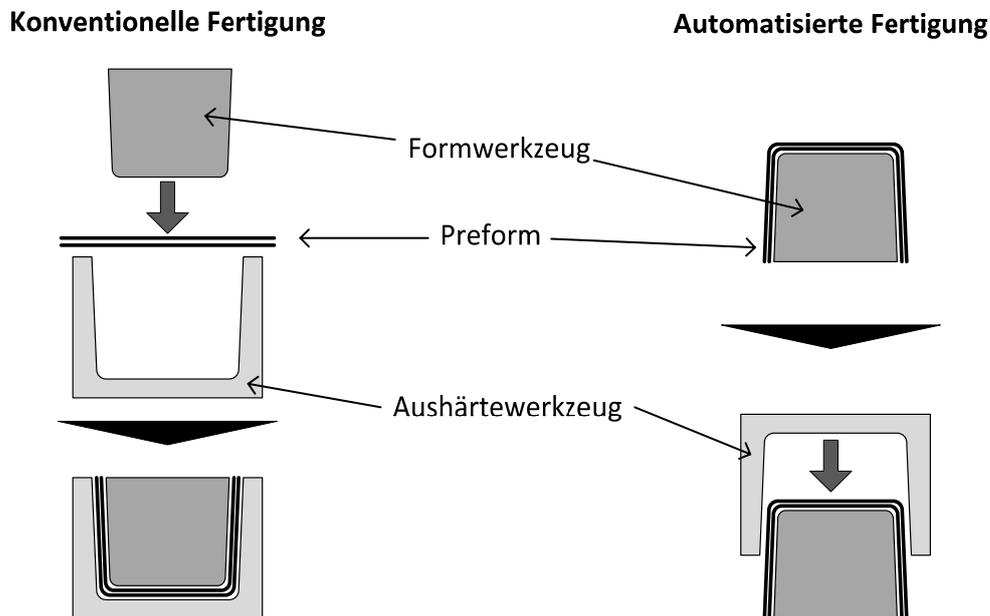


Abbildung 79: Ablauf einer konventionellen und automatisierten Preformfertigung

Für den automatisierten Preforming-Prozess hingegen, wie er in der vorliegenden Arbeit beschrieben wird, werden die Lagen direkt auf dem Formwerkzeug abgelegt. Um trotz dieser Änderung im Prozessablauf identische Bauteile zu erzielen, sind Anpassungen der bestehenden Fertigungsdaten notwendig. Diese erfordern u. a. eine Umkehrung der Legereihenfolge im Legehandbuch sowie Modifikationen bei den dazugehörigen Schneidgeometrien (z. B. zur Anpassung der Faserorientierung beim MAG-Gelege 0/90). Im Gegensatz dazu können die Fertigungsdaten des Panels unverändert übernommen werden. Dieses Bauteil wurde bisher aus Prepreg-Zuschnitten aufgebaut, welche direkt auf dem Formwerkzeug abgelegt werden.

5.4.2 Erstellung der Lege- und Aufnahmekurven

Für die aufgabenorientierte Bahnplanung muss die zunächst noch abstrakte Drapierstrategie in konkrete Legekurven überführt werden, welche die Abrollbahn des MWZ auf der Oberfläche des Formwerkzeuges angeben. Da bereits alle notwendigen Daten aus der Bauteilkonstruktion als CATIA-Dateien vorliegen und dieses Programm auch im Faserverbund-Bereich industriell etabliert ist,

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

bietet es sich an, die Konstruktion der Lege- und Aufnahmekurven auf der gleichen Softwareplattform durchzuführen. Hierfür werden zunächst die CAD-Daten des betreffenden Formwerkzeuges importiert. Anschließend müssen für alle Lagen des Preformaufbaus die dazugehörigen Legekurven konstruiert werden. Dafür werden Stützpunkte auf der Bauteiloberfläche erzeugt und diese zu einer durchgehenden Legekurve verbunden. Zur besseren Orientierung können auch die Laserprojektionsdaten, welche die Position der Zuschnitte auf dem Formwerkzeug anzeigen, eingeblendet werden. Für jede Legekurve wird anschließend ein Bezugskoordinatensystem festgelegt, wobei die x-Achse die bevorzugte Legerichtung angibt und die z-Achse senkrecht zur Bauteiloberfläche steht. Die Abarbeitungsreihenfolge der Legekurven wird durch den zur Lagenummer hinzugefügten Kennbuchstaben vorgegeben. Dementsprechend kennzeichnet der Buchstabe A die primäre Legekurve. Die sekundären Legekurven werden gemäß ihrer alphabetischen Reihenfolge abgearbeitet. Bei der Konstruktion der Legekurven der nachfolgenden Lage müssen vorangegangene Lagendicken als Offset berücksichtigt werden. Ein Beispiel für die Konstruktion der Legekurven ist in Abbildung 80 dargestellt.

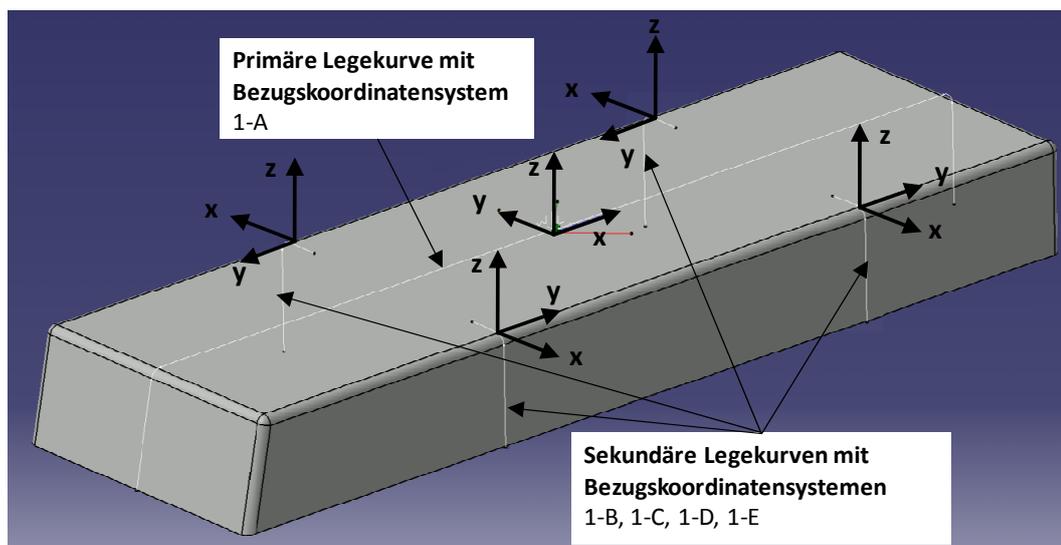


Abbildung 80: Legekurven auf dem Referenzbauteil Diaphragm

Zur anschließenden Weiterverarbeitung werden die Legekurven im herstellerunabhängigen, standardisierten iges-Austauschdatenformat exportiert. Die Legekurven werden dabei als Basis-Splines (B-Splines) abgespeichert, welche standardmäßig für die Modellierung von Flächen und Kurven in CAD-Systemen verwendet werden. Die Aufnahmekurve berechnet sich aus der Länge der primären Legekurve. In der dazugehörigen dxf-Datei der Schneidgeometrie werden hierfür Anfangs- und Endpunkt der primären Legekurve markiert. Die

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

modifizierte dxf-Datei kann anschließend abgespeichert und zur Weiterverarbeitung exportiert werden.

5.4.3 Assistentenunterstützte Offline-Programmierung des Montagewerkzeuges

5.4.3.1 Aufgaben der Programmierumgebung

Da die Formwerkzeuge, die Zuschnitte, deren Position auf dem Formwerkzeug und folglich auch der Verlauf und die Komplexität der Legekurven je nach Anwendungsszenario stark variieren, muss das Verfahren zur aufgabenorientierten Bahnplanung eine hohe Allgemeingültigkeit aufweisen und auf verschiedenste Bauteile übertragbar sein. Hierfür erweist sich ein halbautomatisiertes Verfahren als sinnvoll, da der optimale Drapiervorgang nicht bis ins Detail voraus bestimmt werden kann und es somit möglich sein muss, Änderungen und neue Erfahrungen in den Bahnplanungsprozess einfließen zu lassen. Die Definition der Legeaufgabe mithilfe von Legekurven ist die Grundlage für die angestrebte Berechnung der Roboterbahn und die Erzeugung der bahnsynchronen Schaltsignale. Zudem müssen eine konsistente Datenhaltung und ein durchgängiger Prozessablauf, welcher die Reaktion auf Benutzereingaben ermöglicht, gewährleistet sein. Als Plattform für die Umsetzung der aufgabenorientierten Bahnplanung wird die Software KUKA.WorkVisual gewählt. Diese Softwareumgebung dient standardmäßig als 3D Offline-Programmierumgebung, jedoch kann der Funktionsumfang über eine Plug-In Schnittstelle individuell erweitert werden (KUKA ROBOTER GMBH 2010). Als Plug-In wurde ein Drapierassistent entwickelt, in welchem alle zur Bahnplanung notwendigen Einstellungen und Berechnungen vorgenommen werden. Die Aufgaben der Programmierumgebung, bestehend aus Drapierassistent und WorkVisual, fasst Tabelle 7 zusammen.

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms

Tabelle 7: Aufgaben der Programmierumgebung

Aufgabe	Zugehörigkeit
<ul style="list-style-type: none">- Import von dxf-Zuschnitt und iges-Legekurve- Konfiguration und Parametrierung des MWZ- Positionierung des Textilzuschnittes auf dem MWZ- Benutzerdefinierte Konfiguration der Ansteuerbefehle- Erzeugung einer abrollenden Roboterbahn durch Transformation der Lege- und Aufnahmekurve	Drapierassistent
<ul style="list-style-type: none">- 3D-Darstellung der Versuchsumgebung und Simulation des Prozessablaufs- Überwachung auf Kollision und Erreichbarkeiten- Automatische Erzeugung von KRL-Code mit bahnsynchronen Triggern zur Ausführung der Ansteuerbefehle (Heizen, Saugen)	WorkVisual

Die realisierte Programmierumgebung dient zur Unterstützung des Einlernprozesses und zur Generierung der Roboterbahn. Im Produktionsbetrieb können die auf der Robotersteuerung hinterlegten Programme bedarfsgerecht aufgerufen werden, so dass der Prozessablauf nur noch überwacht werden muss. Diese Aufgabe übernimmt eine übergeordnete Steuerungssoftware, welche ebenfalls für die Koordination der beteiligten Subsysteme (z. B. bedarfsgerechtes Anfordern der Zuschnitte aus dem Lagersystem) und die Übermittlung der passenden Prozessparameter (z. B. Heizparameter) an das Montagewerkzeug zuständig ist (ANGERER ET AL. 2011).

5.4.3.2 Programmablauf zur aufgabenorientierten Bahnplanung

Der Ablauf bei der Umsetzung einer aufgabenorientierten Bahnplanung untergliedert sich in neun Schritte, welche zunächst konsekutiv durchlaufen werden. Abhängig von den Benutzereingaben bzw. von den realen Versuchsergebnissen sind jedoch Rücksprünge und ein wiederholtes Durchlaufen einzelner Prozessschritte nötig (siehe Abbildung 81). Ein bedienerfreundliches Menü leitet den Benutzer durch die einzelnen Schritte des Drapierassistenten (siehe Anhang 10.11).

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

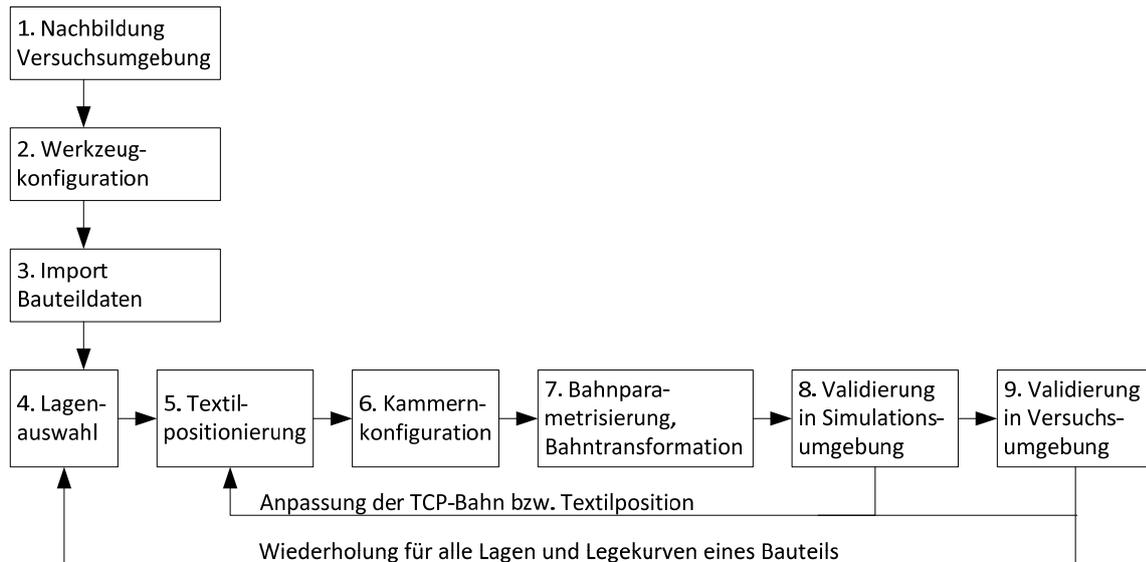


Abbildung 81: Prozessschritte bei der aufgabenorientierten Bahnplanung

1. Nachbildung der Versuchsumgebung (WorkVisual)

Das optimierte Simulationsmodell aus Kapitel 5.3.2 bildet die Grundlage für die Modellierung der Versuchsumgebung in WorkVisual. Mit Hilfe des sogenannten CatalogEditors können die 3D-Modelle der beteiligten Komponenten importiert und die Versuchsumgebung für die Simulation wirklichkeitsgetreu nachgebildet werden (siehe Abbildung 82). Zudem ist es möglich, den importierten Objekten Koordinatensysteme und Geräteschnittstellen zuzuweisen. Über die Geräteschnittstellen können die Kommunikation mit dem Montagewerkzeug sowie die Integration von Unterprogrammen mit externem KRL-Code vorgenommen werden. Diese Unterprogramme werden zu festgelegten Bahnpunkten parametrisiert aufgerufen und erzeugen somit eine bahnsynchrone Ansteuerung des Montagewerkzeuges. Da sich die erstellten Legekurven auf das Ursprungskoordinatensystem des Formwerkzeuges beziehen, müssen für eine korrekte Positionierung der Legekurven in WorkVisual die Koordinatensysteme des importierten und des in CATIA verwendeten Formwerkzeuges übereinstimmen.

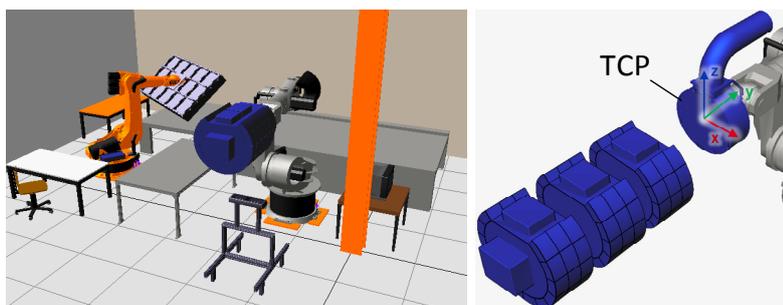


Abbildung 82: Virtuelle Versuchsumgebung in WorkVisual und TCP des MWZ

2. Konfiguration des Montagewerkzeuges (Drapierassistent)

Im nächsten Schritt erfolgt die anwendungsspezifische Konfiguration des Montagewerkzeuges. Da kein Zugriff auf die 3D-Daten des im CatalogEditors gespeicherten Montagewerkzeuges besteht, müssen die relevanten Geometriedaten für die späteren Berechnungs- und Transformationsschritte durch den Benutzer spezifiziert werden. Hierbei muss u. a. die Anzahl der verwendeten Segmente, der Außendurchmesser, die Kammerngröße sowie die Maximal- und Standardstauchung der Schaumstoffschicht angegeben werden. Falls mehrere Roboter in der Zelle eingebunden sind, muss zudem der passende Roboter ausgewählt werden. Anschließend wird das vollständig spezifizierte Montagewerkzeug automatisch in die Versuchsumgebung geladen und virtuell mit dem Roboterflansch verbunden.

3. Import der Bauteildaten (Drapierassistent)

Zur Vorbereitung der Bahnplanung werden anschließend der zu legende Zuschnitt und die entsprechende Legekurve importiert. Nach dem Einlesevorgang liegt eine Liste an 3D-Punkten vor. Um die Orientierung der Punkte zu bestimmen, muss das definierte Koordinatensystem der Legekurve (siehe Kapitel 5.4.2) ebenfalls eingelesen werden.

4. Auswahl der zu drapierenden Lage und Legekurve (Drapierassistent)

Über ein Auswahlmenü werden anschließend die zu drapierende Lage und die dazugehörige Legekurve festgelegt. Zudem kann der Benutzer die Basiskoordinatensysteme des Formwerkzeuges und des Lagertisches sowie das TCP-Koordinatensystem des Montagewerkzeuges spezifizieren.

5. Textilpositionierung (Drapierassistent)

Zur Definition der bahnsynchronen Schaltsignale muss die genaue Position des Zuschnitts auf der Oberfläche des Montagewerkzeuges bestimmt sein. Über eine graphische Oberfläche hat der Benutzer die Möglichkeit, den importierten Zuschnitt frei auf der abgerollten Oberfläche des Montagewerkzeuges bis zur gewünschten Position zu verschieben. Die 2D-Aufnahmekurve wird hierbei aus der Länge der primären Ablegekurve berechnet und zwischen dem markierten Start- und Endpunkt des Zuschnittes (siehe Kapitel 5.4.2) eingefügt. Die Aufnahme- kurve wird dabei automatisch um notwendige Aktionspunkte in der Kammernmitte ergänzt. An diesen Aktionspunkten werden während des Aufnahme- und Drapierprozesses die bahnsynchronen Schaltaktionen zur

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Ansteuerung der Heiz- und Saugfelder ausgeführt. Zusätzlich kann der Bediener durch Anklicken an beliebigen Stellen auf der Aufnahmekurve weitere Aktionspunkte generieren. Für die aufgabenorientierte Bahnplanung werden die neuen Punkte der Aufnahmekurve ebenfalls in die 3D-Legekurve eingetragen.

6. Kammernkonfiguration (Drapierassistent)

Analog zur Textilpositionierung ist bei der Konfiguration der Schaltaktionen der Kammern der Prozess so flexibel gestaltet, dass der Benutzer sein Knowhow einbringen kann. Durch Anklicken der Kammern spezifiziert der Benutzer die Schaltsignale, welche bei Erreichen eines Aktionspunktes an die Kammern der aufliegenden Zeile gesendet werden und somit eine bahnsynchrone Aktion auslösen. Für die bahnsynchrone Konfiguration der Kammern während des Drapierprozesses stehen die Aktionen „Vakuum ausschalten“, „heizen“ und „Vakuum ausschalten und heizen“ zur Auswahl. Der Vorheizprozess muss nicht explizit konfiguriert werden, da die betreffenden Zeilen automatisch errechnet werden. Nach Abschluss der Konfiguration aller Zeilen des Montagewerkzeuges können die resultierenden Aktionen der Aufnahmebewegung hergeleitet werden. Wurde für Kammern der primären Legekurve die Aktion „Vakuum ausschalten“ konfiguriert, so muss folglich während der Aufnahmebewegung die inverse Aktion („Vakuum anschalten“) durchgeführt werden. In Abhängigkeit von der festgelegten Kammernkonfiguration werden Unterprogrammaufrufe parametrisiert und in den KRL-Code eingebettet. Bei Erreichen eines Aktionspunktes wird der entsprechende Unterprogrammaufruf ausgeführt und die dazugehörigen Schaltbefehle an das MWZ verschickt.

7. Bahnparametrisierung und Bahntransformation (Drapierassistent)

Im letzten Schritt des Drapierassistenten werden die notwendigen Parametereinstellungen für die anschließende Bahntransformation vorgenommen. Neben der Einstellung der Roboterhandstellung kann der Stauchungstyp (gestauchtes oder stempelndes Abfahren der Kurve, siehe Abbildung 89) gewählt werden sowie ein Anfahrts- und Rückzugspunkt zur Roboterbahn hinzugefügt werden. Desweiteren hat der Bediener bei Bedarf die Möglichkeit, die Roboterbahn individuell anzupassen, indem er zur Verbesserung der Abrollbewegung weitere Bahnstützpunkte hinzufügt oder durch eine Korrektur des Drehwinkels Einfluss auf die Werkzeugrotation nimmt (siehe Kapitel 5.4.3.3). Auf Basis dieser Einstellungen kann die finale Roboterbahn erzeugt werden. Hierzu wird die Legekurve in den TCP des Montagewerkzeuges transformiert und zur Erzeugung der

Abrollbewegung den einzelnen Bahnstützpunkten die entsprechende Orientierung zugewiesen.

8. Simulative Validierung (WorkVisual)

Um die generierten Roboterbahnen zu überprüfen, werden diese in die bereits existierende Simulationsumgebung in WorkVisual geladen (siehe Abbildung 83). Hier kann mit Hilfe der Animationskontrolle die Drapierbewegung bereits im Vorfeld untersucht und kritische Positionen frühzeitig erkannt werden. Bei identifiziertem Verbesserungspotenzial muss der Drapierassistent erneut durchlaufen und eine entsprechend angepasste Roboterbahn erzeugt werden. Die Erzeugung des Robotercodes mit bahnsynchronen Unterprogrammaufrufen zur Ausführung der Schaltaktionen des MWZ erfolgt automatisch auf Basis der vorangegangenen Schritte durch WorkVisual.

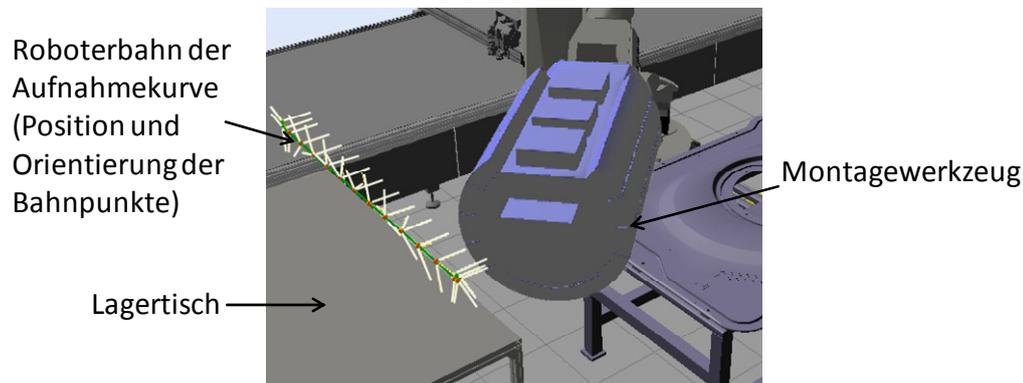


Abbildung 83: Simulation der generierten Roboterbahn in WorkVisual

9. Validierung in Versuchsumgebung

Im Anschluss an die simulative Überprüfung ist die praktische Validierung in der Versuchsumgebung unerlässlich. Dabei wird evaluiert, ob durch die generierte Roboterbahn mit den bahnsynchronen Schaltbefehlen zur Ansteuerung des Montagewerkzeuges die geforderte Drapierqualität erreicht wird. Ggf. müssen die oben genannten Schritte so lange durchlaufen werden bis das gewünschte Drapierergebnis vorliegt.

5.4.3.3 Besonderheiten bei der Bahngenerierung

Anpassung der Legekurve

Um die importierte iges-Datei für die Bahnplanung entsprechend weiterverarbeiten zu können, werden alle Informationen über die aus B-Splines bestehende

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Legekurve extrahiert. Die Legekurve ist dabei aus mehreren B-Spline Abschnitten zusammengesetzt, welche von CATIA nicht in der richtigen Reihenfolge exportiert werden und somit sortiert werden müssen. Durch einen Sortiervorgang entsteht eine durchgängige, abschnittsweise durch B-Splines definierte Legekurve, welche auch das in Kapitel 5.4.2 festgelegte Bezugskoordinatensystem enthält. Durch die flexible Textilpositionierung auf der Oberfläche des MWZ muss die Legekurve um weitere Aktionspunkte ergänzt werden. Die genaue Position dieser Zusatzpunkte auf der Legekurve kann bestimmt und dort eingetragen werden, sobald deren Abstand zum Bezugskoordinatensystem bzw. zum direkten Nachbarpunkt bekannt ist. Für die anschließende Transformation in den TCP der Legekurve muss die Pose (Position und Orientierung) eines jeden Punktes eindeutig bestimmt sein. Bisher erfüllt nur der Punkt des Bezugskoordinatensystems diese Voraussetzung. Allen anderen Punkten der Kurve muss deshalb noch eine passende Orientierung zugewiesen werden. Die x-Achse zeigt dabei in die bevorzugte Legerichtung und die z-Achse senkrecht zur Bauteiloberfläche, so dass die y-Achse folglich bei allen Punkten identisch ist. Die x-Achse entspricht dem normierten Tangentenvektor $\vec{t}_{P_n P_{n+1}}$, welcher durch den Verbindungsvektor zum nachfolgenden Kurvenstützpunkt angenähert wird, so dass für die Koordinatensysteme der Kurvenpunkte die in Abbildung 84 dargestellten Zusammenhänge gelten.

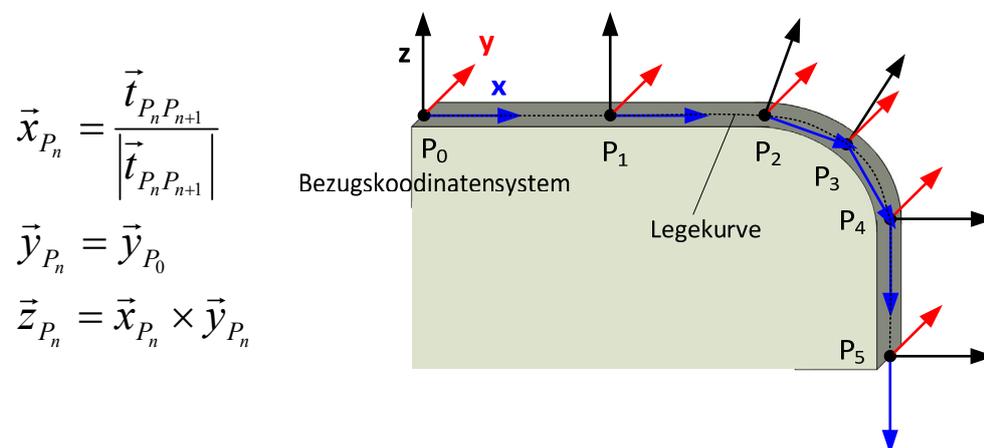


Abbildung 84: Orientierungsberechnung der Stützpunkte einer Legekurve

Transformation der Legekurve in den TCP

Um den Drapierprozess darstellen zu können, muss die erstellte Legekurve in den TCP des Montagewerkzeuges verschoben und eine Abrollbewegung überlagert werden. Um dies zu erreichen, werden für alle Punkte der Legekurve drei Transformationen durchgeführt:

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms

1. Translation entlang der y-Achse

Zunächst erfolgt eine Verschiebung der Punkte entlang der y-Achse um den Abstand d der Punkte zum TCP des MWZ. Dieser ist abhängig von der festgelegten Textilposition und für alle Punkte der Legekurve gleich.

2. Translation entlang der z-Achse

Durch eine Verschiebung entlang der z-Achse um den Außenradius r des MWZ werden die Punkte in den Rotationsmittelpunkt transformiert. Hierbei muss die vorgenommene Stauchungseinstellung berücksichtigt werden.

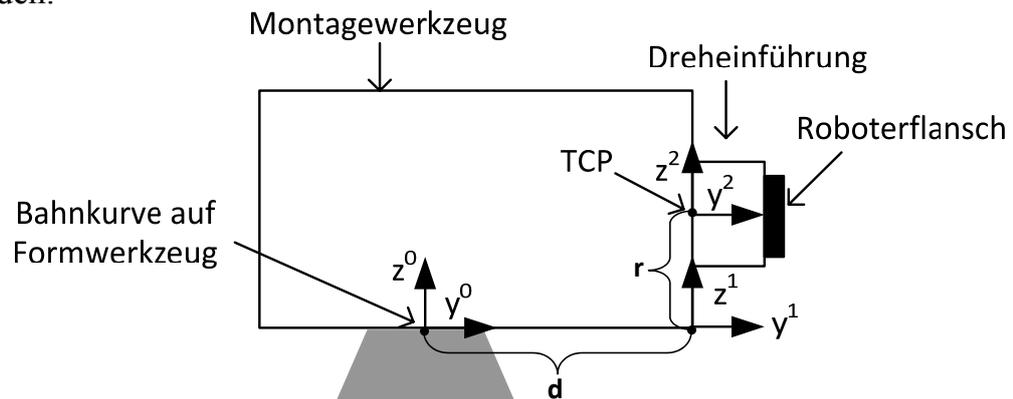


Abbildung 85: Translation entlang y-Achse und z-Achse

3. Rotation um y-Achse

Den hochtransformierten Punkten muss nun eine Rotation φ um die y-Achse überlagert werden. Der Winkel φ wird bestimmt aus der abzurollenden Wegstrecke s , dem Werkzeugradius r sowie einem Rotationsoffset φ_0 , welcher durch die Textilpositionierung bestimmt wird (siehe Abbildung 86). Es gilt:

$$\varphi(P_x) = \varphi_0 + \frac{s}{r} \quad (5-12)$$

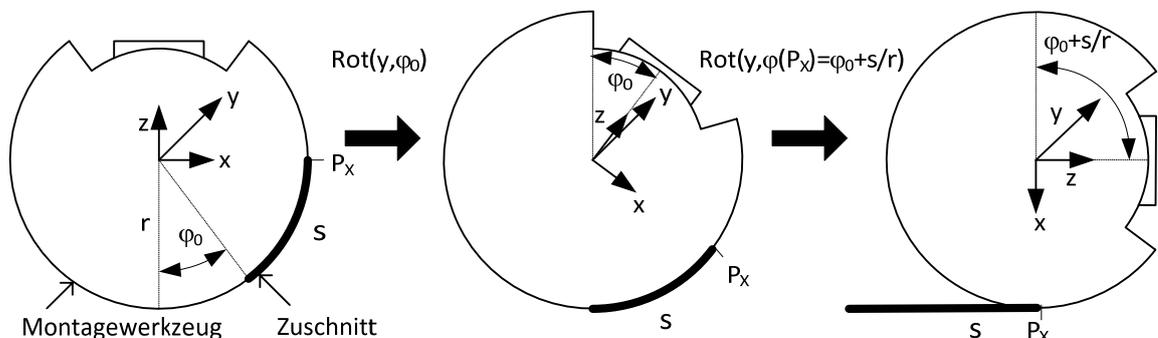


Abbildung 86: Rotation der Bahnpunkte

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

Zusätzlich hat der Bediener die Möglichkeit, den errechneten Drehwinkel φ über den Faktor k_{DW} zu manipulieren. Da es im praktischen Betrieb trotz der mathematisch idealen Abrollbewegung vor allem bei großen Lagen zu Faltenbildung kommen kann, kann nach der ersten praktischen Validierung über den Faktor k_{DW} der Drehwinkel entsprechend korrigiert werden. Falls konkave Konturen ungenügend ausgebildet werden, ist es notwendig den Drehwinkel entsprechend zu erhöhen. Das Verhältnis zwischen notwendiger Textillänge und Länge der Legekurve kann als erste Näherung für eine sinnvolle Abschätzung des Faktors k_{DW} empfohlen werden. Treten hingegen Falten auf der Bauteiloberfläche auf, so muss der Drehwinkel entsprechend verringert werden. Als erste Näherung wird hier der Faktor k_{DW} um das Verhältnis der Länge der Textilfalten zur Länge der Legekurve verringert (siehe Abbildung 87).

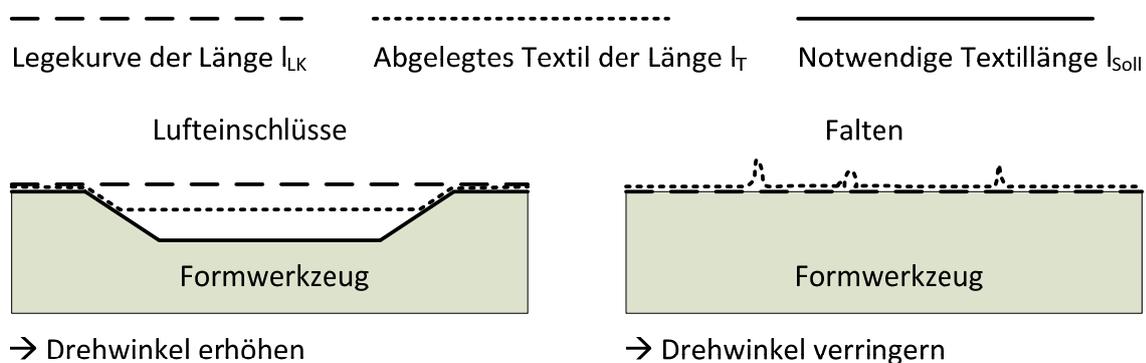


Abbildung 87: Bestimmung des Drehwinkels

Zusammenfassend gilt:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{s}{r} \cdot k_{DW} \quad (5-13)$$

$$\text{mit } k_{DW} = \begin{cases} \frac{l_{soll}}{l_T} \cdot 100\% & \text{bei Luftpfeinschlüssen} \\ 100\% - \frac{l_T}{l_{LK}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{l_T}{l_{soll}} \cdot 100\% & \text{bei Falten} \end{cases}$$

Die notwendige Gesamttransformation lässt sich damit wie folgt darstellen:

$$T_{ges} = Rot(y, \varphi) \cdot Trans(0,0,r) \cdot Trans(0,d,0) \quad (5-14)$$

Bei einem konkaven Verlauf der Formwerkzeugoberfläche tritt jedoch ein Sonderfall auf, welcher extra behandelt werden muss. Bei der Hochtransformation der Legekurve kommt es zu einer unerwünschten Schleifenbildung in der Roboterbahn und zu Kollisionen mit dem Formwerkzeug (siehe Abbildung 88 links).

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund- Preforms

Um dies zu vermeiden, werden der Schleifenschnittpunkt identifiziert und die übrigen Punkte der Schleife gelöscht (siehe Abbildung 88, rechts). Erreicht das MWZ den Punkt P_1 , so erfolgt zunächst die unter Gl. (5-14) angegebene Transformation von P_1 in den Schleifenschnittpunkt. Um die Legebewegung am Berührungspunkt P_2 fortzusetzen, wird dieser ebenfalls in den Schleifenschnittpunkt transformiert. Die Orientierung am Punkt P_2 und damit die Rotation $\text{Rot}(y, \varphi(P_2))$ berechnet sich dabei aus der zurückgelegten Strecke $2a$ und nicht aus der Bogenlänge s , so dass gilt:

$$\varphi(P_2) = \varphi_0 + \varphi(P_1) + \frac{2 \cdot a}{r} \quad (5-15)$$

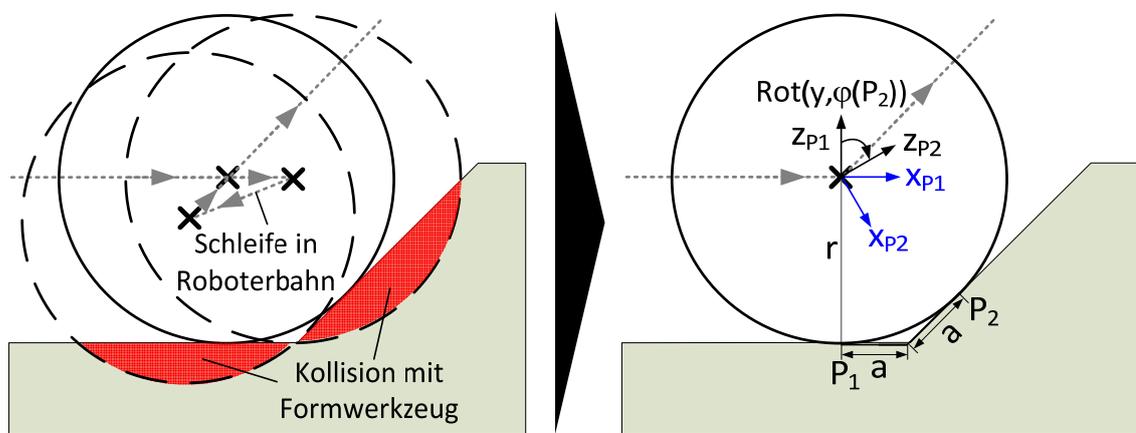


Abbildung 88: Bahnplanung bei konkaven Legekurven

Da der beschriebene Sonderfall an keinem der betrachteten Referenzbauteile auftritt, wurde für die Validierung des oben beschriebenen Vorgehens das Referenzbauteil „Rampe“ aufgebaut (siehe Kapitel 6.3).

Stauchungseinstellung

Die elastische Schicht auf der Oberfläche des Montagewerkzeuges kann während des Drapierprozesses komprimiert werden, um so Unebenheiten auf der Oberfläche ohne eine Anpassung der Roboterbahn auszugleichen und die notwendige Anpresskraft zu erzeugen (z. B. zur Vermeidung von Lufteinschlüssen bei konkaven Kanten, siehe Abbildung 88 rechts). Für die Textilaufnahme ist eine Stauchung der elastischen Schicht nicht sinnvoll und somit auch nicht implementiert. Für die Einstellung der notwendigen Stauchung während des Drapierprozesses wurden zwei Alternativen umgesetzt (siehe Abbildung 89):

5 Versuchsanlage zur automatisierten Montage von Faserverbund-Preforms

- Gestauchtes Abrollen
Um ein gestauchtes Abrollen des MWZ zu realisieren, wird der Werkzeugradius r um die Kompressionstiefe k reduziert. Es erfolgt somit eine Hochtransformation um $(r-k)$ sowie eine Neuberechnung des resultierenden Drehwinkels. Da sich durch ein gestauchtes Abrollen der Umfang des MWZ ändert, die Länge des zu drapierenden Textils jedoch nicht, kann es vor allem bei größeren Zuschnitten zu Falten im Preformaufbau kommen. In diesem Fall muss entweder der Drehwinkelfaktor k_{DW} manuell korrigiert oder die Variante „Stempeln“ verwendet werden.
- Stempeln
Die Roboterbahn wird ohne Stauchung abgefahren. Nur an den Aktionspunkten wird das Montagewerkzeug senkrecht um die Kompressionstiefe k in Richtung der Oberfläche des Formwerkzeuges bewegt. Nach der Schaltfunktion wird die ursprüngliche Roboterbahn fortgesetzt.

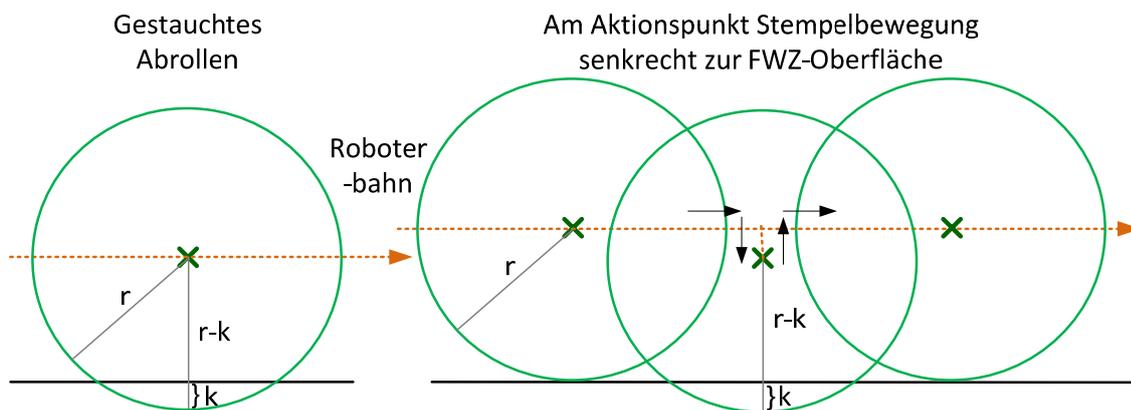


Abbildung 89: Vergleich gestauchtes und stempelndes Abrollen

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

6.1 Allgemeines

Die Evaluation des realisierten Montagewerkzeuges erfolgt mit Hilfe des in Kapitel 4.3 definierten Referenzszenarios, anhand dessen die Anwendbarkeit im industriellen Umfeld demonstriert werden soll. Abbildung 90 zeigt die Formwerkzeuge der ausgewählten Referenzbauteile sowie deren Einsatz in industriellen Anwendungen.

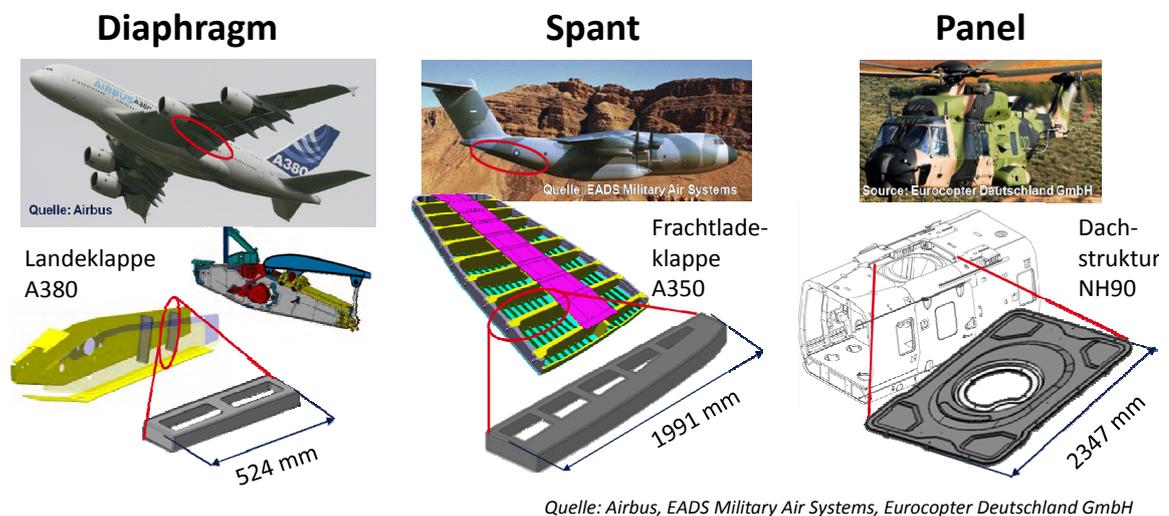


Abbildung 90: Industrielle Referenzbauteile mit Formwerkzeugen (MUSER 2007)

Neben der Validierung der notwendigen Grundfunktionen des Gesamtsystems lassen sich aus den Versuchen allgemeingültige Erkenntnisse und wichtige Hinweise für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage generieren. Hierfür werden relevante Lagen aus dem Preformaufbau der Referenzbauteile ausgewählt (siehe Abbildung 91) und nach dem vorgestellten Verfahren automatisiert auf das Formwerkzeug drapiert und fixiert. Für alle untersuchten Lagen werden die angewandte Drapierstrategie, wichtige Prozessparameter sowie Notizen zum Prozessablauf in einem Datenblatt festgehalten (siehe Anhang 10.12), um die Qualität der Ergebnisse zu dokumentieren und reproduzierbar zu gestalten.

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

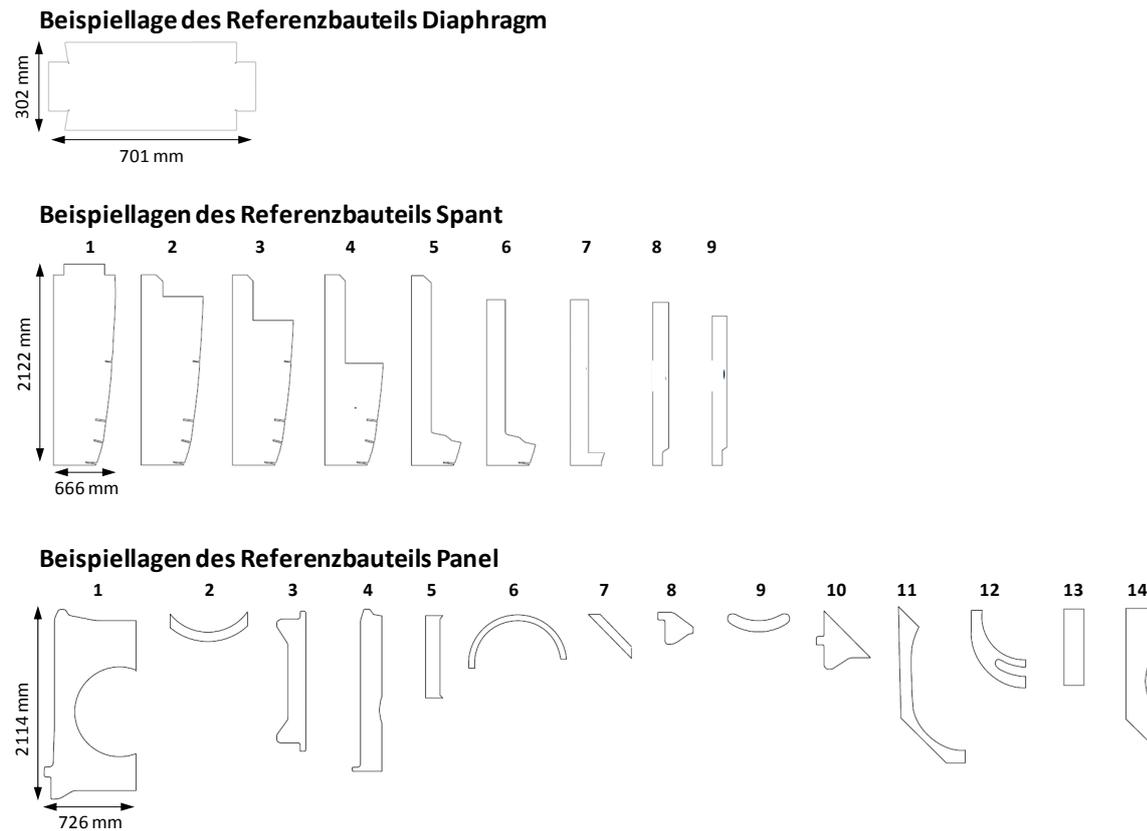


Abbildung 91: Typische Zuschnittgeometrien der Referenzbauteile

Für eine Bewertung der funktionalen Leistungsfähigkeit der Versuchsanlage werden die einzelnen Prozessphasen, der Schallpegel, der Energieverbrauch, die erreichbare Positioniergenauigkeit und Prozesszeit als wichtige industrielle Kenngrößen untersucht. Anhand von weiterführenden Untersuchungen wird das Potenzial des entwickelten Systems für neue Einsatzfelder und Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Mit Hilfe der experimentellen Validierung können realistische und fundierte Daten, insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Prozesszeit, für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (siehe Kapitel 7) gewonnen werden.

6.2 Untersuchung der Prozessphasen

6.2.1 Aufnahme und Transport

Für die Aufnahme des bereitliegenden Zuschnittes muss trotz der bestehenden Verhakungen mit der Unterlage ein Ablösen vom Lagersystem möglich sein. Gleichzeitig muss ein sicheres Halten am MWZ gewährleistet werden, um

unerwünschte Positionsveränderungen insbesondere bei schnellen Transportbewegungen zu verhindern. Zur Vermeidung von Faltenbildung findet während der Textilaufnahme eine schlupffreie Abrollbewegung ohne Kompression der elastischen Schicht auf der Oberfläche des Lagersystems statt. Bei der Zuschnittaufnahme ist darauf zu achten, dass bei der ersten aufliegenden Kammernzeile ein hoher Überdeckungsgrad vorherrscht und alle ganz oder teilweise bedeckten Kammern geöffnet werden, um ein Abschälen des gegriffenen Zuschnitts zu vermeiden. Die dazu notwendigen Differenzdrücke hängen u. a. entscheidend von der Beschaffenheit der Unterlage ab, so dass aus Gründen der Ressourceneffizienz Verhakungen zu meiden und eine ausreichende Luftdurchlässigkeit sicherzustellen sind. Für die Prozessphasen „Aufnahme“ und „Transport“ wird eine Steuerung realisiert, indem dem Frequenzumrichter des Vakuumerzeugers jeweils eine konstante Spannung vorgegeben wird. Für die Textilaufnahme muss diese so gewählt werden, dass ein erstmaliges Anheben von der Unterlage gewährleistet werden kann und auch beim Öffnen weiterer Kammern und dem damit einhergehenden Abfall des Differenzdruckes ein Ablösen des gegriffenen Textils vermieden wird. Für den anschließenden Textiltransport kann die vorgegebene Spannung weiter reduziert werden. Für beide Prozessphasen werden materialabhängige Standardparameter als Sollwertvorgabe für den Frequenzumrichter des Vakuumerzeugers identifiziert, welche unabhängig von der vorhandenen Zuschnittgröße und -form sowie dem vorhandenen Abdeckungsgrad zu einer sicheren Aufnahme und Transport des Zuschnitts führen (siehe Anhang 10.13). Dieser Standardwert wird anschließend für jeden Zuschnitt individuell angepasst und im dazugehörigen Datenblatt hinterlegt (siehe Anhang 10.12).

Aus den Ergebnissen der Validierungsversuche lassen sich allgemeingültige Zusammenhänge ableiten, welche den Einfluss der Zuschnittgröße und -positionierung sowie des verwendeten Halbzeuges betreffen. Die Haltekraft des Textils wird durch den Druckabfall erzeugt, welcher beim Durchströmen des Textils entsteht. Dieser lässt sich nach WATTER (2008) wie folgt berechnen:

$$\Delta p_{\text{Textil}} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot c^2 \quad (6-1)$$

Ein geringerer Strömungswiderstand ζ eines luftdurchlässigen Textils führt zu einem geringeren Druckabfall. Um dennoch eine ausreichende Haltekraft zu erreichen, muss die Strömungsgeschwindigkeit c entsprechend erhöht werden. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung des Druckabfalls im Inneren des MWZ und des gemessenen Gesamtdifferenzdrucks (siehe Gl. (5-8), S. 117). Für die

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

Aufnahme und den Transport von luftdurchlässigen Textilien sind somit höhere Differenzdrücke nötig.

Der Einfluss des Flächengewichts m_{FG} auf den zum Greifen notwendigen Druckabfall Δp_{Textil} kann durch Aufstellen des Kräftegleichgewichts zwischen Haltekraft \vec{F}_H und Gewichtskraft \vec{F}_G ermittelt werden. Es gilt:

$$\vec{F}_H = \vec{F}_G \quad (6-2)$$

$$\Delta p_{Textil} \cdot A_{CF} = m_{FG} \cdot A_{CF} \cdot g \implies \Delta p_{Textil} = m_{FG} \cdot g \quad (6-3)$$

Der Einfluss der Faserorientierung und somit der richtungsabhängigen Biegesteifigkeit der Materialien lässt sich bisher nur qualitativ beschreiben. Liegt eine hohe Biegesteifigkeit der Materialien in Aufnahmerichtung vor, so ist ein höherer Differenzdruck Δp_{ges} notwendig, um ein Ablösen von der Unterlage und ein Anschmiegen an der Werkzeugoberfläche zu erreichen.

Seitlich am Textilrand vorbeiströmende Fehlluft trägt nicht zur Haltekraft des Textils bei und verursacht einen Druckabfall im Inneren des MWZ, welcher sich in einer Erhöhung des gemessenen Gesamtdifferenzdrucks Δp_{ges} niederschlägt. Jeder Zuschnitt lässt sich demnach durch das Umfangsflächenverhältnis charakterisieren. Je größer dieses Verhältnis ist (z. B. bei kleinflächigen oder feingliedrigen Zuschnitten), um mehr trägt die seitlich einströmende Fehlluft zu einer Erhöhung des notwendigen Differenzdruckes Δp_{ges} bei. Über eine geschickte Textilpositionierung, welche einen hohen durchschnittlichen Überdeckungsgrad (siehe Gl. (4-4), S. 79) der Kammern aufweist, kann jedoch der Einfluss der Fehlluft und somit der Differenzdruck Δp_{ges} reduziert werden.

6.2.2 Drapieren

Während des Drapierprozesses rollt das MWZ auf der Oberfläche des Formwerkzeuges ab. Die Kammern der aufliegenden Zeile werden verschlossen, um das Textil loszulassen. Gleichzeitig wird das Textil an den festgelegten Bereichen auf dem Formwerkzeug durch Wärmeeinbringung fixiert. Folglich verringert sich die zu greifende Fläche des Reststückes kontinuierlich, was zu einem steigenden Umfangsflächenverhältnis führt. Ein sicheres Haften des Textils bis zum Ende des Drapiervorgangs muss demnach durch eine Erhöhung des Differenzdrucks Δp_{ges} in Abhängigkeit von der verringerten Anzahl an geöffneten Kammern sichergestellt werden. Der Anstieg des notwendigen Differenzdrucks Δp_{ges} wird durch einen linearen Verlauf angenähert und als Sollwertvorgabe

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

Δp_{Soll} einer Differenzdruckregelung zugeführt. Auch für den Drapiervorgang werden materialabhängige Standard-Verläufe für die Sollwertvorgabe der Differenzdruckregelung identifiziert, welche ein sicheres Drapieren aller Zuschnittgeometrien gewährleisten (siehe Anhang 10.13). Dieser Standardverlauf kann für jeden Zuschnitt individuell angepasst werden, indem der notwendige Differenzdruck am Ende des Drapiervorgangs experimentell ermittelt wird (siehe Datenblatt Anhang 10.12). Ausgehend vom Transportdifferenzdruck kann daraus die lineare Druckerhöhung errechnet werden, welche anschließend als Sollwertvorgabe der Regelung des Differenzdrucks zugeführt wird. Die Herausforderung bei der Regelung des Differenzdrucks liegt im vorliegenden Verhalten der Regelstrecke, welche je nach Schlauchstellung, Kammernkonfiguration, verwendetem Material etc. variiert und somit nicht als konstant angenommen werden kann. Der Regler muss auch bei variierendem Streckenverhalten eine geringe Anregelzeit und Überschwingweite aufweisen, um auftretende Regeldifferenzen schnell auszugleichen. Für die Regelung wird ein PI-Regler eingesetzt, dessen Parameter gemäß den Einstellparametern nach „Chien, Hrones und Reswick“ vorausgewählt (UNBEHAUEN 2007A) und in praktischen Versuchen für verschiedene Streckenverhalten anschließend heuristisch optimiert wurden. Der gesamte Verlauf von Δp_{ges} über alle Prozessphasen hinweg ist in Abbildung 92 dargestellt.

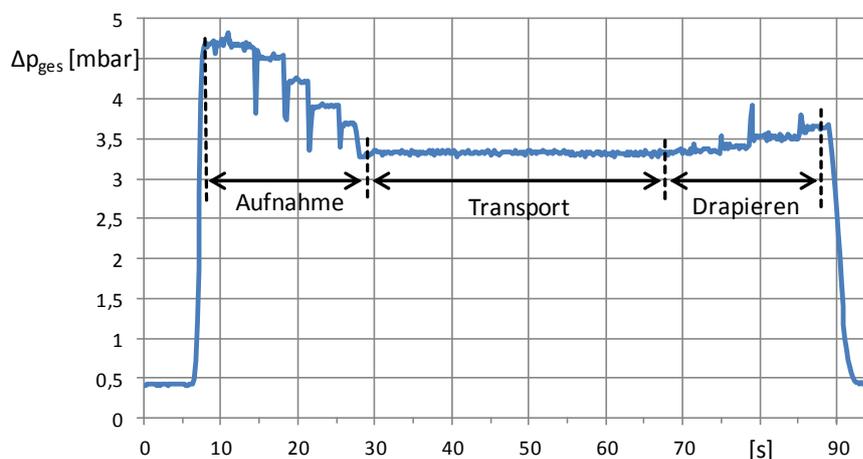


Abbildung 92: Differenzdruckverlauf für Aufnahme, Transport und Drapieren einer Beispiellage des Referenzbauteils Panel

Um die benötigte Zeit bis zum Aufschmelzen des Bindervlieses zu reduzieren, werden die Kammern der folgenden Zeile bereits vorgeheizt. Die vorgegebene Vorheiztemperatur liegt dabei 10°C unter der Schmelztemperatur des Bindervlieses. Liegen die vorgeheizten Kammern bei fortschreitender Abrollbewegung auf

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

dem Formwerkzeug auf, so ist nur eine kleine Temperaturdifferenz für ein Fixieren des Textils zu überwinden. Der realisierte Ablauf beim Aufheizen des Textils ist in Abbildung 93 dargestellt. Nach Erreichen der zum Aufschmelzen notwendigen Heiztemperatur beginnt die Messung der Heizzeit. Ist diese abgelaufen, setzt der Roboter die Abrollbewegung fort und die bisher vorgeheizte Kammernzeile wird auf die benötigte Heiztemperatur aufgeheizt.

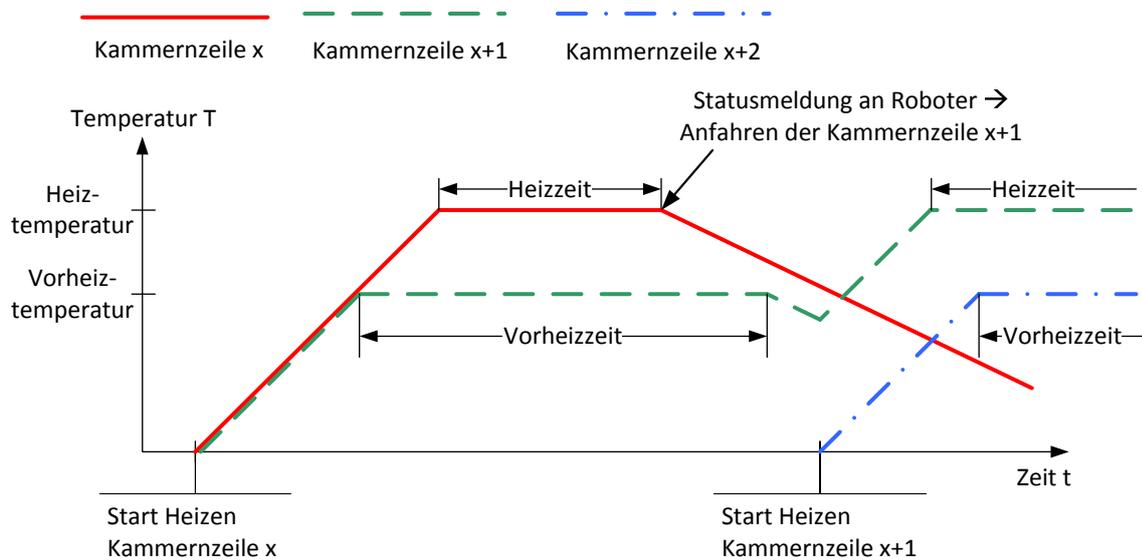


Abbildung 93: Ablauf beim Aufheizen der Kammernzeilen

Für die Regelung der Heiztemperatur auf einen vorgegebenen Sollwert wird ein Zweipunktregler mit Hysterese eingesetzt, welcher zusätzlich mit einer inneren Rückführung mit einstellbarem Zeitverhalten versehen ist. Dadurch lässt sich trotz schaltender Stellsignale annähernd das Verhalten eines linearen PID-Reglers erzielen (UNBEHAUEN 2007B). Um eine Gefährdung des Bedienpersonals sowie unnötigen Materialverschleiß zu vermeiden, führen folgende Situationen zu einer Sicherheitsabschaltung der Heizfelder:

- Überschreiten der voreingestellten Maximaltemperatur
- Drahtbruch bzw. sonstiger Defekt am NTC-Sensor
- Drahtbruch des Heizdrahtes

Aufgrund des hohen Wärmeabflusses über das Formwerkzeug ist eine Fixierung der ersten CF-Lagen nur schwer möglich, da die Schmelztemperatur nicht bzw. sehr langsam erreicht wird. Als Abhilfe wird eine Formheizung an der Unterseite der Referenzbauteile implementiert, welche die Form von unten auf 50°C aufheizt. Hierfür kommen Silikonheizmatten zum Einsatz, welche über einen handelsüblichen Thermostat auf eine vorgegebene Solltemperatur geregelt werden.

Durch diese Maßnahme kann nicht nur das Haftergebnis der unteren Lagen deutlich verbessert, sondern auch die notwendige Aufheizzeit verringert werden. Nach wie vor kritisch bleibt ein Fixieren der ersten CF-Lage, da diese direkt auf einem Abreißgewebe fixiert werden muss. Das Abreißgewebe wird als Zwischenschicht zwischen Formwerkzeug und Lagenaufbau eingebracht, um nach dem Aushärten des fertigen CFK-Bauteils ein einfaches Ablösen vom Formwerkzeug zu ermöglichen. Zwar verbessert eine Erhöhung der Stauchungseinstellung das Haftergebnis auf dem Abreißgewebe, jedoch kann materialbedingt nur ein leichtes Anhaften der ersten Lage erreicht werden. Zielführend ist es daher, in Zukunft auf das Abreißgewebe weitestgehend zu verzichten und Formwerkzeuge aus alternativen Materialien (z. B. CFK, mit Teflonband überzogenes Blockmaterial aus Ureol) zu verwenden. Die hierzu durchgeführten Haftversuche der ersten Lage zeigen sehr gute Ergebnisse.

6.3 Positioniergenauigkeit

Anhand von Voruntersuchungen soll die erreichbare Positioniergenauigkeit bestimmt werden. Hierzu wird zunächst die Positioniergenauigkeit beim Drapieren einer ebenen Lage des Referenzbauteils „Panel“ untersucht. Die Zuschnitte werden an einer vorgezeichneten Sollkontur auf dem Lagersystem ausgerichtet und anschließend auf das Formwerkzeug drapiert. Die Sollposition auf dem Formwerkzeug markiert eine eingezeichnete Referenzkante, anhand derer Positionsveränderungen oder Verschiebungen erkannt und mit dem Messschieber erfasst werden. Als Ergebnis zeigte sich bei zehn drapierten Lagen keine messbare Positionsveränderung (siehe Anhang 10.14).

Desweiteren wird die Positioniergenauigkeit auf einem annähernd rechteckigen Formwerkzeug untersucht. Der Zuschnitt dieses Formwerkzeuges besitzt Laschen, welche um die Ecke geklappt werden müssen, um diese zu verstärken. An sechs definierten Messpunkten (MP) wird der kürzeste Abstand bis zum Textilrand festgehalten. Die dabei ermittelten Messergebnisse liegen innerhalb der geforderten Positioniergenauigkeit von ± 1 mm (siehe Abbildung 94).

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

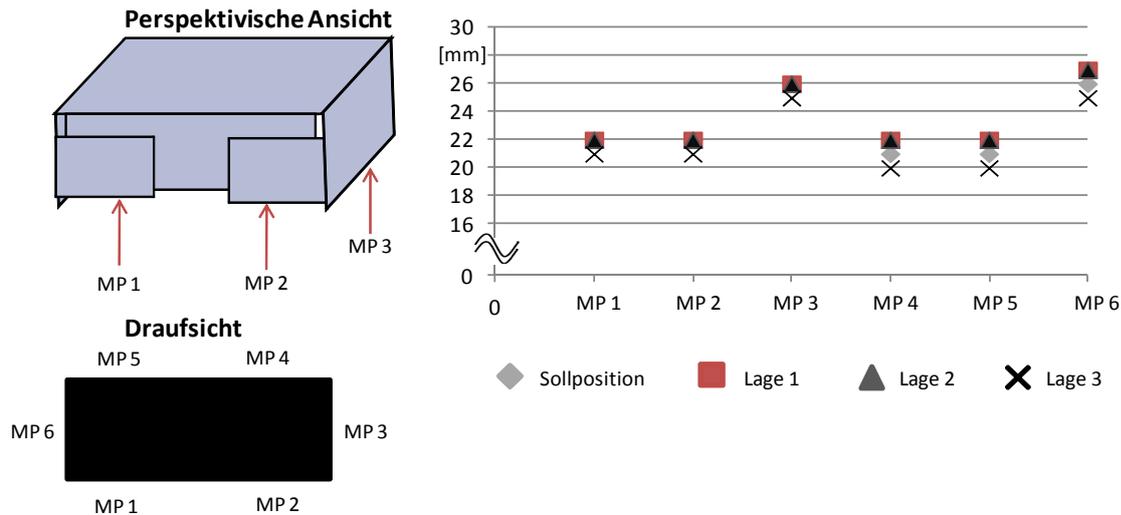


Abbildung 94: Versuchsaufbau und Messergebnisse zur Erfassung der Positioniergenauigkeit

Um bestehende Schwachstellen des MWZ aufzudecken, werden rechteckige Lagen auf ein rampenförmiges Formwerkzeug drapiert. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften werden als Referenzmaterialien das UD-Gelege sowie das MAG-Gelege 0/90 ausgewählt (siehe Abbildung 31). Bei dem UD-Gelege handelt es sich um ein besonders anspruchsvolles Material, da aufgrund des niedrigen Flächengewichts und der ausgeprägten Anisotropie unerwünschte Verformungen und Faltenbildung einfach entstehen können. Der konkave Winkel $\delta = 150^\circ$ der Rampe entspricht dem des Panels. Die Rampenhöhe h beträgt 100 mm, so dass diese nicht mehr durch die elastische Schaumstoffschicht ausgeglichen werden kann und der in Kapitel 5.4.3.3 beschriebene Sonderfall (siehe Abbildung 88) eintritt. Zur Ermittlung der Textilposition auf dem Formwerkzeug wird mit einem Messschieber der lineare Abstand zwischen den Markierungen M1 und M2 auf dem Textil und den festen Referenzpunkten R1, R2, R3, R4 erfasst, woraus sich die x- und y-Position der Markierungen errechnen lässt (siehe Abbildung 95).

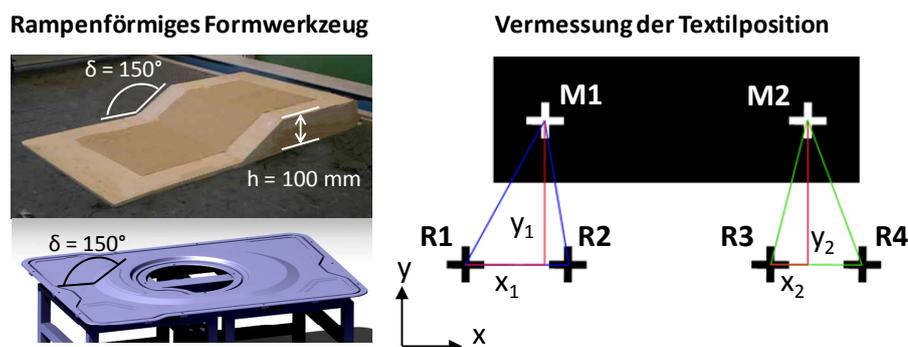


Abbildung 95: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Textilposition

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass eine rechtwinklige Ausrichtung des Messmittels bei der Abstandsmessung keine Rolle mehr spielt und das Verfahren einfach automatisiert werden könnte.

Als Ergebnis der experimentellen Voruntersuchungen kann festgehalten werden, dass bei einer geringen Lagenanzahl (bis ca. zehn Lagen) eine Positioniergenauigkeit +/- 1,5 mm erreicht wird. Bei einer größeren Anzahl an gleichartigen Lagen kann es zu einer Falten- und Beulenbildung im Preformaufbau kommen. Diese rühren daher, dass Unebenheiten in der Oberfläche des MWZ während des Drapiervorgangs geringe Fehler verursachen, welche zunächst noch nicht zu erkennen sind. Bei gleichbleibender Positionierung der Zuschnitte auf der Oberfläche des MWZ summieren sich diese Fehler mit steigender Lagenanzahl signifikant auf. Für einen industriellen Einsatz gilt es daher, diesen Effekt weitestgehend zu vermeiden. Dies kann zum einen durch eine kontinuierliche Variation der Zuschnittposition auf der Oberfläche des MWZ erreicht werden. Zum anderen ist es aber auch unerlässlich, bestehende Unebenheiten in der Oberfläche des MWZ zu beseitigen und die Verschleißfestigkeit der elastischen Schaumstoffschicht und der Heizfelder zu erhöhen.

6.4 Prozesszeitbestimmung

Im Zuge der experimentellen Drapierversuche des Referenzszenarios wird für jede drapierte Einzellage die Prozesszeit erfasst und im lagenspezifischen Datenblatt festgehalten (siehe Anhang 10.12). Hierbei werden nur die Aufnahmezeit sowie die benötigte Zeit zum Drapieren der Hauptbahn und der Nebenbahnen aufgezeichnet, da die Zeit für den Transfer zum Formwerkzeug und für Umsetzungsbewegungen von der Roboterbahn und der einprogrammierten Geschwindigkeit abhängt und somit variieren kann. Da die Prozesszeit maßgeblich von dem Heizprozess bestimmt wird, gilt es die benötigte Zeit bis zum Aufschmelzen des Binders weitestgehend zu verkürzen. Als Maßnahmen dienen hierfür das Vorheizen der nachfolgenden Kammern sowie des Formwerkzeuges. Insbesondere für die unteren Schichten des Preformaufbaus kann durch ein Vorheizen des Formwerkzeuges die Wärmeabfuhr deutlich verringert und die Schmelztemperatur schneller erreicht werden. Desweiteren empfiehlt es sich, die Heiztemperatur auf den oberen Grenzwert des Bindermaterials festzulegen. Durch die zusätzlich eingebrachte Wärmeenergie lässt sich das Haftergebnis positiv beeinflussen und die benötigte Heizzeit verkürzen. Eine enorme Reduktion der Prozesszeit lässt sich zudem durch die Mehrfachaufnahme von Zuschnitten erreichen, da Aufnahme-

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

und Transferbewegungen eingespart werden. Insbesondere bei der Verwendung einer möglichst großen Ausbaustufe des MWZ steigen aufgrund der größeren Oberfläche die Möglichkeiten einer Mehrfachaufnahme und somit auch das Einsparungspotenzial, was nachfolgender Vergleich der erreichbaren Taktzeiten pro Bauteil zeigt (siehe Tabelle 8). Die Abschätzung der Taktzeit kann mit Hilfe der Gl. (10-1) in Anhang 10.15 erfolgen. Die aufgeführten Prozesszeiten der Teilschritte basieren auf den Ergebnissen der Validierungsversuche und sind als realitätsnahe Mittelwerte zu anzusehen.

Tabelle 8: Abschätzung der Prozesszeiten mit und ohne Mehrfachaufnahme

	Diaphragm	Spant	Panel
Ohne Mehrfachaufnahme			
Anzahl der Segmente	1	2	3
Notwendige Einzelaufnahmen	8	38	54
Prozesszeit pro Bauteil	1184 sec ≈ 19 min	8474 sec ≈ 141 min	3780 sec ≈ 63 min
Mit Mehrfachaufnahme			
Anzahl der Segmente	3	3	3
Notwendige Einzelaufnahmen	2	19	19
Prozesszeit pro Bauteil	796 sec ≈ 13 min	7720 sec ≈ 129 min	3046 sec ≈ 51 min
Zeitersparnis in %	33%	9%	19%

6.5 Lautstärkemessung

Für die Untersuchung der Geräuschemission des MWZ wird der vom Radialventilator erzeugte Schallpegel mit Hilfe eines Lautstärkemessgerätes erfasst. Für die Messung des Schallpegels in Abhängigkeit von der Eingangsspannung des Frequenzumrichters muss das Messgerät ca. 1 m von der Geräuschquelle entfernt positioniert werden (siehe Abbildung 96).



Eingangsspannung Frequenzumrichter [V]	0	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Lautstärkemessung [dB]	56	67	70	72	75	72	75	77	76

Abbildung 96: Lautstärkemessung am Versuchsaufbau

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

Die aufgezeichnete Geräuschemission liegt dabei innerhalb der in BERUFGESSENENSCHAFT (1990) festgelegten Lärmgrenzen, so dass das Arbeitsumfeld des MWZ nicht als Lärmbereich eingestuft wird und keine persönliche Schutzausrüstung notwendig ist.

6.6 Energieverbrauch

Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise ist es wichtig den Energieverbrauch der Anlage im Betrieb und im Stillstand („Stand-By-Modus“) zu kennen. Durch eine Aufschlüsselung des Energieverbrauchs können Erkenntnisse über den Status Quo gewonnen, Optimierungsmaßnahmen für einzelne Komponenten und Abläufe abgeleitet und eine Abschätzung der Energiekosten vorgenommen werden. In Anlehnung an FRESNER ET AL. (2009) werden zunächst die Energieverbräuche der relevanten Prozesse in Energieflussdiagrammen visualisiert (siehe Abbildung 97). Für die exemplarische Bestimmung des Energieverbauchs wird ein rechteckiger Zuschnitt betrachtet, welcher 4x5 Kammern bedeckt.

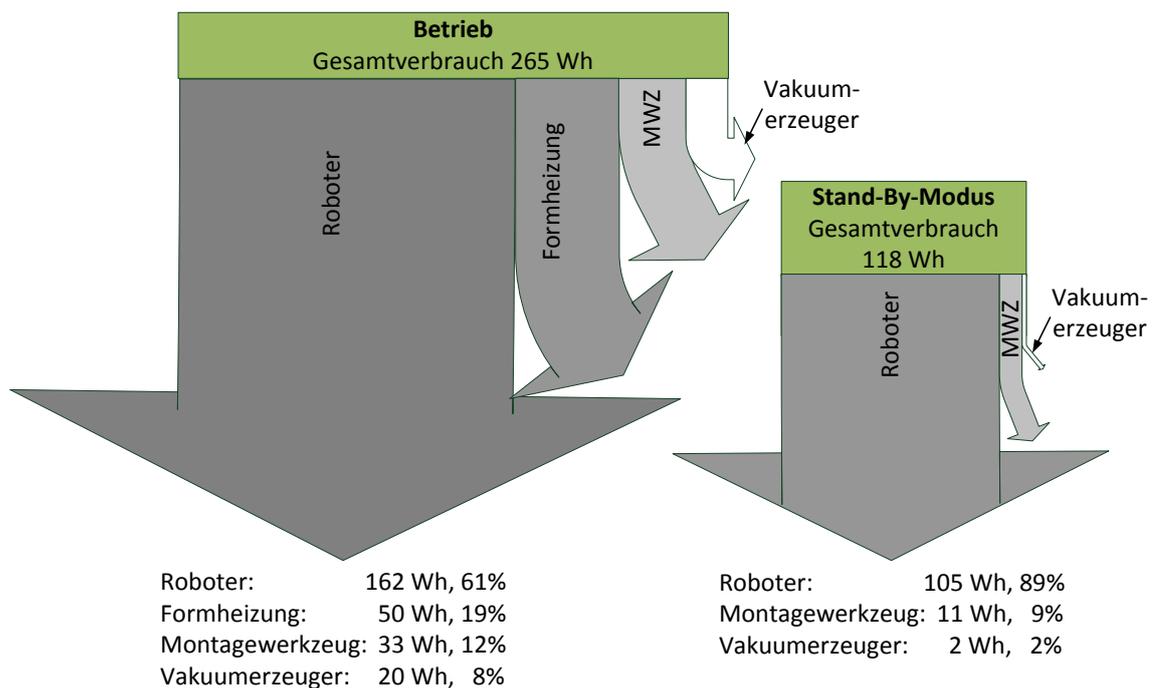


Abbildung 97: Durchschnittlicher Energieverbrauch der Anlage im Betrieb (links) und Stand-By-Modus (rechts) über eine Zeitdauer von 400 s

Ein Großteil der benötigten Energie entfällt hierbei auf den eingesetzten Roboter, wobei der Anteil des MWZ und des Vakuumerzeugers im Betrieb nur 20%

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

beträgt. Für einen effizienten industriellen Betrieb der Anlage lassen sich aus der Energieanalyse daher folgende Maßnahmen ableiten:

- Einsatz eines energieeffizienten Roboters mit neuester Steuerungstechnik
- Optimierung der Roboterbahn
 - Wahl der kürzesten Wegstrecke
 - Mehrfachaufnahme von Zuschnitten zur Wegeinsparung
 - Reduzierung von notwendigen Drapierbewegungen
- Verwendung von optimierten Parametern für Heizen und Differenzdruck anstelle von Standardparametern
- Einsatz der Formheizung nur für die unteren Lagen (bis ca. zehn)

Zudem ist es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Energieeffizienz äußerst sinnvoll, die Stillstandszeiten der Anlage so gering wie möglich zu halten, da auch hier ein beträchtlicher Anteil an nicht produktiv genutzter Energie verbraucht wird. Weiteres Einsparpotenzial würde sich außerdem durch den Einsatz einer neuartigen Bindertechnologie ergeben, welche deutlich niedrigere Schmelztemperaturen aufweist (z. B. OXEON AG 2011). Durch diese Maßnahme könnte nicht nur die notwendige Prozesszeit, sondern auch die erforderliche Heizleistung und damit der beobachtete Materialverschleiß erheblich reduziert werden.

6.7 Weiterführende Untersuchungen

Über die notwendigen Kernfunktionalitäten hinaus soll anhand von weiterführenden Untersuchungen das Potenzial des MWZ und der integrierten Funktionsprinzipien für andere Einsatzgebiete aufgezeigt werden.

Mehrfachaufnahme

Eine Mehrfachaufnahme bringt deutliche Vorteile hinsichtlich der benötigten Prozesszeit und des Energieverbrauchs. Eine Mehrfachaufnahme ist immer dann möglich, wenn die in Kapitel 5.3.2 aufgeführten Bedingungen vorliegen und die chronologische Reihenfolge des Legehandbuchs eingehalten werden kann. Für die betroffenen Lagen könnte die Mehrfachaufnahme und das fehlerfreie Drapieren der Zuschnitte erfolgreich durchgeführt werden (siehe Abbildung 98).

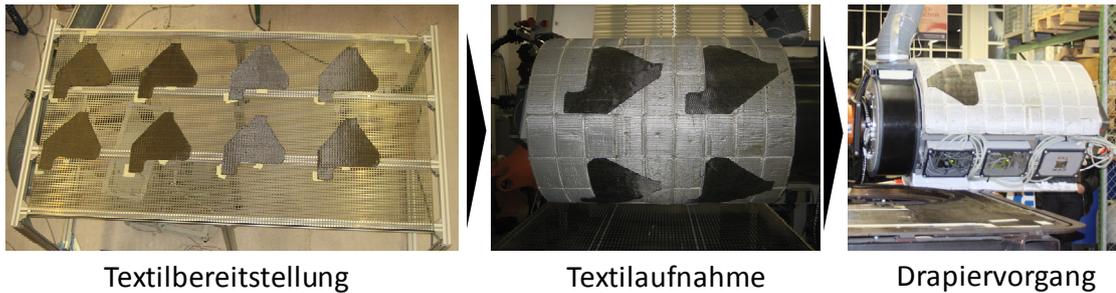


Abbildung 98: Mehrfachaufnahme an Beispiellagen des Panel

Aufnahme vom Cutter

Da das Montagewerkzeug eine selektive Greiffunktionalität integriert, soll getestet werden, ob ein direktes Absortieren von Zuschnitten vom Cutter möglich ist. Dadurch könnte das arbeitsaufwändige Absortieren vom Cutter automatisiert und die nachfolgende Lagerung eingespart werden. Während der Abrollbewegung über der Absortierfläche erfolgt zeilenweise die Aktivierung der entsprechenden Saugkammern.

Als Ergebnis der Versuche mit verschiedenen Zuschnittgrößen kann festgehalten werden, dass ein Vereinzeln der Zuschnitte aus dem Verschnitt grundsätzlich möglich ist, jedoch etliche Einschränkungen vorliegen. Eine reibungslose Aufnahme ist nur möglich, wenn ein hoher Überdeckungsgrad der Kammern vorliegt (mindestens ca. 75 %), da ansonsten der Verschnitt ebenfalls mit angehoben wird und es zum Verzug des restlichen Materials kommen kann (siehe Abbildung 99). Um ein höheres Spektrum an Zuschnittkonturen automatisiert bewältigen zu können, müsste daher die Fläche einer Kammer deutlich verkleinert und damit die Auflösung der selektiven Greiffläche vergrößert werden.



Ungenügende Kammernüberdeckung
→ Aufnahme von Verschnitt



Ausreichende Kammernüberdeckung
→ Absortieren möglich

Abbildung 99: Zuschnittaufnahme vom Cutter

Da bestehende Verhakungen im Trennbereich der Schnittkante gelöst werden müssen und die Schneidunterlage nur eine geringe Luftdurchlässigkeit aufweist,

6 Praxisbeispiel und technische Bewertung anhand von industriellen Referenzbauteilen

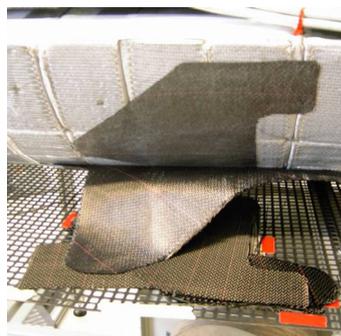
sind zudem höhere Differenzdrücke notwendig. Prozessbedingt bringt das direkte Absortieren ebenfalls Nachteile mit sich, da die Zuschnitte nicht mehr verschnittoptimiert, sondern gemäß ihrer chronologischen Legereihenfolge verschachtelt und zugeschnitten werden müssen, so dass dies zu einem höheren Materialverbrauch der kostenintensiven Halbzeuge führt.

Abstapeln von mehreren Zuschnitten

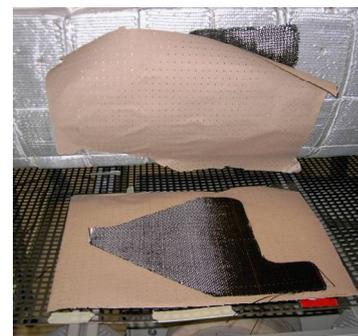
Im Falle des vorliegenden Referenzszenarios ist das Lagersystem so gestaltet, dass die Zuschnitte bereits vereinzelt vorliegen. Gerade im industriellen Umfeld sind jedoch auch andere Bereitstellungsarten denkbar (GÖTZ 1991). Daher soll untersucht werden, ob mit dem bestehenden MWZ ein Vereinzeln vom geordneten und ungeordneten Stapel möglich ist bzw. welche Randbedingungen angepasst werden müssen. Für das Absortieren vom geordneten Stapel werden daher zehn gleichartige Beispiellagen des Panels aufeinandergeschichtet. Durch eine exakte Einstellung des notwendigen Differenzdrucks ist ein reproduzierbares Vereinzeln der obersten Lage möglich, ohne dass die darunterliegenden Lagen verschoben werden. Im zweiten Versuch werden verschiedenartige Zuschnitte ungeordnet aufeinandergestapelt. Hierbei führen jedoch nicht vollständig bedeckte Kammern zu einem Anheben der darunterliegenden Lage. Eine deutliche Verbesserung des Vereinzlungsprozesses kann durch den Einsatz von luftundurchlässigen Zwischenlagen erreicht werden (siehe Abbildung 100). Diese stellen eine definierte Trennebene für die Aufnahme von einzelnen Zuschnitten dar und steigern damit die Prozesssicherheit. Für das Entfernen dieser Zwischenlage vor dem Drapierprozess ist jedoch ein weiterer Zwischenschritt (z. B. mechanisches Abstreifen, Einsatz eines Zusatzgreifers) notwendig.



Abstapeln vom geordneten Stapel



Abstapeln vom ungeordneten Stapel



Abstapeln mit Zwischenlage

Abbildung 100: Vereinzeln von Zuschnitten vom Stapel

7 Wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems

7.1 Allgemeines

Für den Einsatz und die erreichbare Relevanz im industriellen Umfeld sind neben der technischen Leistungsfähigkeit auch wirtschaftliche Randbedingungen entscheidend. Vor diesem Hintergrund gilt es, in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedene Anwendungsszenarien monetär zu bewerten, um daraus Erkenntnisse für eine Entscheidungsfindung abzuleiten und die wirtschaftlichen Randbedingungen verschiedener Realisierungsmöglichkeiten zu beleuchten. Die in Kapitel 7.2 vorgestellten Anwendungsszenarien stellen dabei realitätsnahe Umsetzungsbeispiele dar, welche mit repräsentativen Annahmen hinterlegt sind. Anwendungsszenarien, bei welchen Bauteile in großen Stückzahlen ($>100\,000$ Bauteile/Jahr) mit geringer Variantenvielfalt hergestellt werden, werden bei der Bewertung nicht betrachtet, da hier im industriellen Umfeld üblicherweise großserientaugliche Verfahren (z. B. Thermoformen von Organoblechen, RTM-Verfahren) eingesetzt werden und das betrachtete Einzellagen-Preforming keine Anwendung findet.

Um die konkurrierenden Anwendungsszenarien monetär gegeneinander abzuwägen, ist eine Investitionsentscheidung erforderlich. Unter einer Investition ist dabei die zu verschiedenen Zeitpunkten durch Ein- und Auszahlungen bewirkte Veränderung im Güterstand zu verstehen (EVERSHEIM ET AL. 1999). Das Hauptziel bei der Entscheidung für eine Investition besteht darin, das notwendige Kapital möglichst finanziell rentabel einzusetzen. Alternative Investitionsmöglichkeiten können mit Hilfe von Investitionsrechnungen wirtschaftlich bewertet werden. Bei den dabei eingesetzten Verfahren handelt es sich um eindimensionale Zielsysteme, welche ausschließlich eine monetäre Bewertung anhand von unterschiedlichen Kriterien durchführen. In Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung von Erträgen und Aufwendungen kann in der Literatur zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden werden (EVERSHEIM ET AL. 1999, DÄUMLER & GRABE 2007, LUGER ET AL. 1999). Bei der statischen Investitionsrechnung werden die zeitliche Entwicklung einzelner Kostenanteile nicht berücksichtigt und die Daten einer als repräsentativ angesehenen Durchschnittsperiode für den gesamten Betrachtungszeitraum verwendet. Im Gegensatz dazu wird in der dynamischen Investitionsrechnung die zeitliche Verteilung der Ein- und Ausgaben über die gesamte Nutzungsdauer des Investitionsobjekts betrachtet,

wodurch Gewinnen in frühen Perioden eine höhere Bedeutung zukommt. Zusätzlich zur reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen bei jeder Investitionsentscheidung auch nicht monetäre Kriterien (z. B. Flexibilität, erreichbare Qualität) berücksichtigt werden. Hierbei empfiehlt sich eine Bewertungsmethode, deren Zielsystem eine Gewichtung einzelner Kriterien zulässt (z. B. Nutzwertanalyse, anforderungsorientierte gewichtete Bewertung) (BREIING & KNOSALA 1997). Um die kostenmäßigen Relationen zwischen den einzelnen Alternativen aufzuzeigen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf das statische Verfahren der Amortisationsrechnung zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um eine bewährte Methode, den Zeitraum bis zum Rückfluss des Kapitaleinsatzes zu errechnen. Zusätzlich ist über die Berechnung der Montagestückkosten und der kritischen Produktionsmenge eine Entscheidung über den wirtschaftlichen Einsatz der vorgestellten Szenarien möglich.

7.2 Betrachtete Szenarien und Annahmen

Unter Verwendung der vorgestellten (Kapitel 4.3 und Kapitel 6.1) werden in Anlehnung an DANGELMAIER (2001) für die wirtschaftliche Bewertung fünf realitätsnahe Anwendungsszenarien näher beleuchtet:

Variante 1: Manuelle Mehrprodukt-Fertigung (V1)

Variante 1 entspricht dem derzeitigen manuellen, industriellen Fertigungsprozess, wie er in Abbildung 3 schematisch dargestellt und erläutert ist.

Variante 2: Flexible Mehrprodukt-Fertigung mit variabler Bereitstellung (V2)

Es sind zwei Drapierbereiche vorgesehen, in denen die Formwerkzeuge aufgespannt werden können. Während das eine Formwerkzeug drapiert wird, kann im anderen Drapierbereich ein Wechsel bzw. die Vorbereitung des nachfolgenden Formwerkzeuges vorgenommen werden. Über ein Paletten-Fördersystem wird bedarfsgerecht der benötigte Zuschnitt bereitgestellt (siehe Abbildung 101).

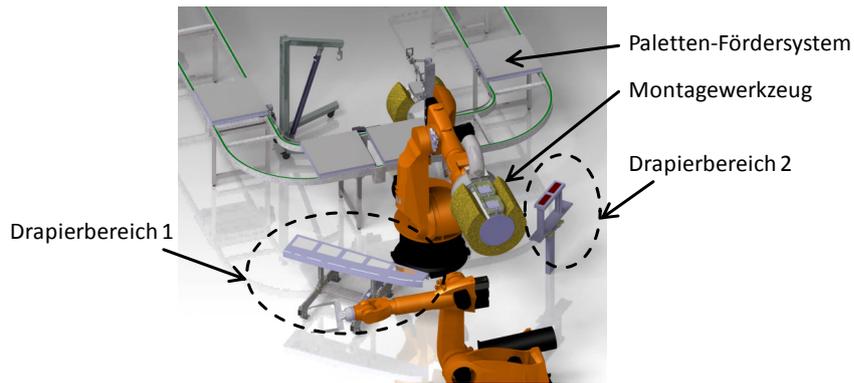


Abbildung 101: Flexible Einzelfertigung mit variabler Bereitstellung

Variante 3: Mehrprodukt-Fließfertigung (V3)

Über Führungsschienen erfolgt bedarfsgerecht die automatische Bereitstellung des jeweiligen Formwerkzeuges. Der Fertigungsablauf ist dahingehend optimiert, dass die Anzahl der notwendigen Umrüstungen des modularen Montagewerkzeuges möglichst gering ist. Die bedarfsgerechte Bereitstellung der Zuschnitte erfolgt ebenfalls über ein Paletten-Fördersystem (siehe Abbildung 102).

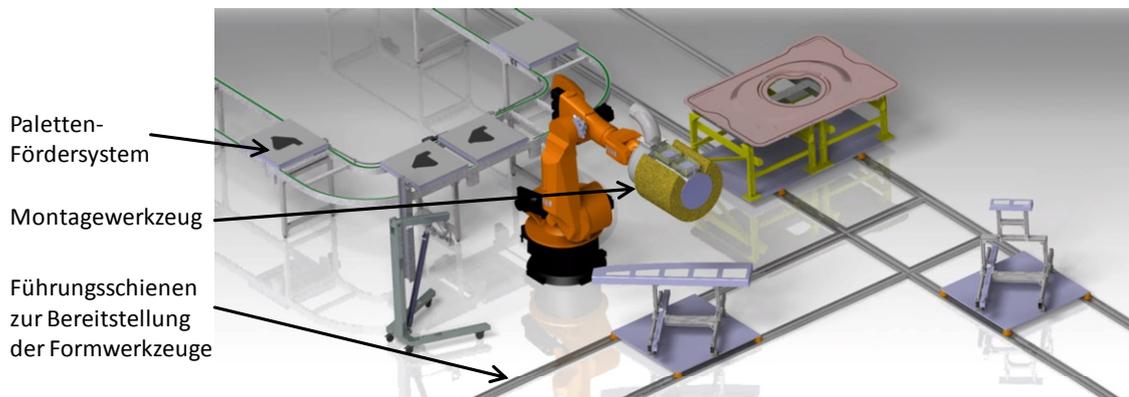


Abbildung 102: Mehrprodukt-Fließfertigung

Variante 4: Einprodukt-Fließfertigung (V4)

Da für neue Flugzeugbaureihen (z. B. A 350) eine große Anzahl (> 40 000 Spannte) an gleichartigen Strukturbauteilen prognostiziert wird (DRECHSLER & VOGGENREITER 2010), wird auch das Szenario einer Einprodukt-Fließfertigung am Beispiel des Referenzbauteils Spant näher beleuchtet. In diesem Fall sind der modulare Aufbau des MWZ und Standzeiten zum Umrüsten überflüssig. Die Bereitstellung der Zuschnitte und der Formwerkzeuge erfolgt bedarfsgerecht und automatisiert über ein Paletten-Fördersystem bzw. Führungsschienen (siehe Abbildung 103).

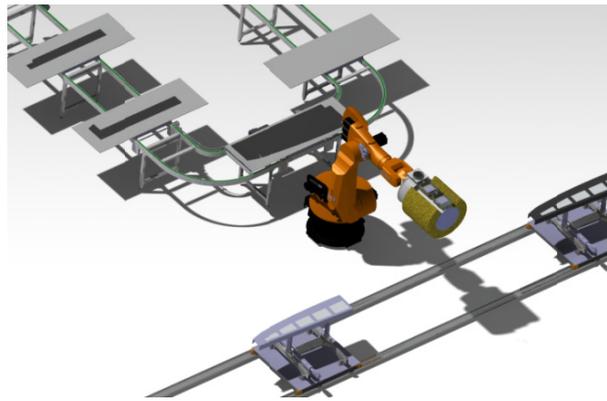


Abbildung 103: Einprodukt-Fließfertigung

Variante 5: Manuelle Einprodukt-Fertigung (V5)

Im Gegensatz zur Variante 4 wird bei der manuellen Einprodukt-Fertigung das Referenzbauteil Spant ausschließlich gemäß des herkömmlichen Fertigungsprozesses hergestellt (siehe Abbildung 3).

Die Annahmen des Wiederbeschaffungswertes K_{WB} basieren auf Expertengesprächen und Rechercheergebnissen. Im Vergleich zu den manuellen Fertigungsvarianten (V1, V5) verursachen die automatisierten Fertigungsszenarien (V2, V3, V4) eine deutlich höhere Kapitalbindung. Eine Aufschlüsselung der Annahmen zur Ermittlung des Wiederbeschaffungswertes K_{WB} findet sich in Anhang 10.16. Desweiteren wird die Annahme getroffen, dass bei den Mehrprodukt-Fertigungsszenarien (V1, V2, V3) eine Produktionseinheit (PE) jeweils ein Panel, ein Diaphragm und einen Spant umfasst. Im Gegensatz dazu wird bei der Einprodukt-Fertigung (V4, V5) nur das Referenzbauteil Spant produziert. Tabelle 9 und Tabelle 10 fassen die getroffenen Wertannahmen, welche die Grundlage für die nachfolgende wirtschaftliche Betrachtung bilden, zusammen.

Tabelle 9: Variantenunabhängige Wertannahmen (in Anlehnung an BAUMANN 2005)

Kalkulatorischer Zinssatz	8%
Mietpreis	120 €/m ² a
Strompreis	0,2 €/kWh
Produktionseinheit (PE)	V1, V2, V3: 1 PE = 1 Diaphragm + 1 Spant + 1 Panel V4, V5: 1 PE = 1 Spant
Manuelle Fertigungszeit	Diaphragm: $T_{Dm}=2100$ s, Spant: $T_{Sm}=8520$ s, Panel: $T_{Pm}=12600$ s, Umrüstzeit: $T_U=900$ s
Automatisierte Fertigungszeit	Diaphragm: $T_{Da}=796$ s, Spant: $T_{Sa}=7720$ s, Panel: $T_{Pa}=3046$ s, Umrüstzeit $T_U=900$ s

	Variante 1: Manuelle Mehrprodukt-Fertigung	Variante 2: Flexible Mehrprodukt- Fertigung mit variabler Bereitstellung	Variante 3: Mehrprodukt-Fließfertigung	Variante 4: Einprodukt-Fließfertigung	Variante 5: Manuelle Einprodukt- Fertigung
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage (AT)/a á 16 h • Verfügbarkeit: 95% → Nettoarbeitszeit: 3 800 h/a • Taktzeit je PE: $T_{Dm} + T_{Sm} + T_{Pm} + 3T_{U} = 25\ 920\ s = 432\ min$	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 AT/a á 16 h • Verfügbarkeit: 90% → Nettoarbeitszeit: 3 600 h/a • Taktzeit je PE: $T_{Da} + T_{Sa} + T_{Pa} + 3T_{U} = 14\ 262\ s = 237,7\ min$	<ul style="list-style-type: none"> • 3-Schicht-Betrieb • 250 AT/a á 24 h • Verfügbarkeit: 90% → Nettoarbeitszeit: 5 400 h/a • Taktzeit je PE: $T_{Da} + T_{Sa} + T_{Pa} + 3T_{U} = 14\ 262\ s = 237,7\ min$	<ul style="list-style-type: none"> • 3-Schicht-Betrieb • 250 AT/a á 24 h • Verfügbarkeit: 95% → Nettoarbeitszeit: 5 700 h/a • Taktzeit je PE: $T_{Sa} = 7\ 720\ s = 128,7\ min$	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 AT/a á 16 h • Verfügbarkeit: 95% → Nettoarbeitszeit: 3 800 h/a • Taktzeit je PE: $T_{Sm} + T_{U} = 9\ 420\ s = 157\ min$
Personal	2 Mitarbeiter (MA): Preformaufbau (Stundensatz bei 2-Schicht- Betrieb: 50 €/h)	1 MA: Anlagenbetreuung (Stundensatz bei 2-Schicht- Betrieb: 50 €/h)	1 MA: Anlagenbetreuung (Stundensatz bei 3-Schicht- Betrieb: 60 €/h)	1 MA: Anlagenbetreuung (Stundensatz bei 3-Schicht- Betrieb: 60 €/h)	2 MA: Preformaufbau (Stundensatz bei 2-Schicht- Betrieb: 50 €/h)
Wiederbeschaff- ungswert K_{WB}	213 500 €	441 750 €	473 250 €	473 250 €	211 000 €
Voraussichtliche Nutzungsdauer	2-Schicht-Betrieb → 8 Jahre	2-Schicht-Betrieb → 8 Jahre	3-Schicht-Betrieb → 6 Jahre	3-Schicht-Betrieb → 6 Jahre	2-Schicht-Betrieb → 8 Jahre
Instandhaltungs- kosten	2-Schicht-Betrieb → 4% K_{WB}	2-Schicht-Betrieb → 4% K_{WB}	3-Schicht-Betrieb → 8% K_{WB}	3-Schicht-Betrieb → 8% K_{WB}	2-Schicht-Betrieb → 4% K_{WB}
Flächenbedarf	Ca. 30 m ²	Ca. 40 m ² (da zwei Drapierbereiche)	Ca. 30 m ²	Ca. 30 m ²	Ca. 30 m ²
Energieverbrauch pro Taktzeit	0,6 kWh	11,4 kWh	11,4 kWh	5,0 kWh	0,2 kWh

Tabelle 10: Variantenabhängige Wertannahmen (in Anlehnung an BAUMANN 2005)

7.3 Wirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung werden die verschiedenen Realisierungsalternativen (siehe Kapitel 7.2) im Hinblick auf die verursachten Kosten miteinander verglichen, um so eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der wirtschaftlichsten Variante zu generieren (PERRIDON ET AL. 2009, HOFFMEISTER 2008). Dabei gilt es alle während der Nutzungsdauer anfallenden Kosten in der Kalkulation zu berücksichtigen. Die anfallenden Kapital-, Betriebs- und Instandhaltungskosten stellen hierbei die wesentlichen Kostenpunkte dar. Für den Kostenvergleich werden dabei Durchschnittswerte verwendet, welche für die gesamte Nutzungsdauer abgeschätzt wurden. Da den zu vergleichenden Umsetzungsvarianten unterschiedliche Produktionskapazitäten zugrunde liegen, wird die kostengünstigere Alternative durch einen Vergleich der Stückkosten bestimmt (siehe Tabelle 11) (WARNECKE 2003). Als wesentlicher Bestandteil der Herstellkosten dienen sie dazu, die Zielkosten bei neuen Produkten zu bestimmen (LOTTER & WIENDAHL 2006).

Tabelle 11: Stückkostenvergleich der Realisierungsalternativen

Eingangsgrößen		Kostenart	V1	V2	V3	V4	V5
Wiederbeschaffungswert K_{WB}	[€]		213.500,00	441.750,00	473.250,00	473.250,00	211.000,00
Nutzungsdauer t_n	[a]		8	8	6	6	8
Nettoarbeitszeit t_{NAZ}	[h/a]		3.800	3.600	5.400	5.700	3.800
Erreichbare Stückzahl n	[Stück/a]		527	908	1.363	2.657	1.452
Nettoleistung $P_{NL} = n/t_{NAZ}$	[Stück/h]		0,14	0,25	0,25	0,47	0,38
Maschinenstundensatz							
Kalk. Abschreibung $K_A = K_{WB}/t_n$	[€/a]	fixe Kosten	26.687,50	55.218,75	78.875,00	78.875,00	26.375,00
Kalk. Zinssatz $K_Z = 8\%K_{WB}/2$	[€/a]	fixe Kosten	8.540,00	17.670,00	18.930,00	18.930,00	8.440,00
Instandhaltungskosten K_I	[€/a]	fixe Kosten	8.540,00	17.670,00	37.860,00	37.860,00	8.440,00
Energiekosten K_E	[€/a]	variable Kosten	63,24	2.070,24	3.107,64	2.657,00	58,08
Raumkosten K_R	[€/a]	fixe Kosten	3.600,00	4.800,00	3.600,00	3.600,00	3.600,00
Maschinenstundensatz							
$K_{MH} = (K_A + K_Z + K_I + K_E + K_R)/t_{NAZ}$	[€/h]		12,48	27,06	26,37	24,90	12,35
Lohnkosten							
Mitarbeiter			2	1	1	1	2
Stundensatz	[€/h]	variable Kosten	50,00	50,00	60,00	60,00	50,00
Personalkostensatz K_{PK}							
	[€/h]		100,00	50,00	60,00	60,00	100,00
Montagekosten $K_M = K_{PK} + K_{MH}$							
	[€/h]		112,48	77,06	86,37	84,90	112,35
Montagestückkosten $K_{ST} = K_M/P_{NL}$							
	[€/Stück]		811,06	305,54	342,17	182,13	294,02

Im Vergleich zum manuellen Fertigungsablauf (V1, V5) können mit Hilfe der automatisierten Varianten deutlich geringere Montagestückkosten erreicht werden. Hierbei fällt auf, dass eine maximale Auslastung der Anlage im 3-Schicht-Betrieb (V3) aufgrund der höheren Personal- und Instandhaltungskosten nicht zu einem Kostenvorteil führt, so dass hier V2 zu bevorzugen ist.

Weiterhin ist es von betriebswirtschaftlichem Interesse, die kritische Produktionsmenge zu bestimmen, ab der sich die Investition in eine automatisierte Umsetzungsvariante lohnt. Dies ist vor allem dann sinnvoll, falls die Produktionsmenge schwer vorhersagbar bzw. mit Unsicherheiten behaftet ist (WARNECKE 2003). Für eine anschauliche Bestimmung des Grenzwertes dient Abbildung 104, welche die Varianten V1, V2, V3 miteinander vergleicht.

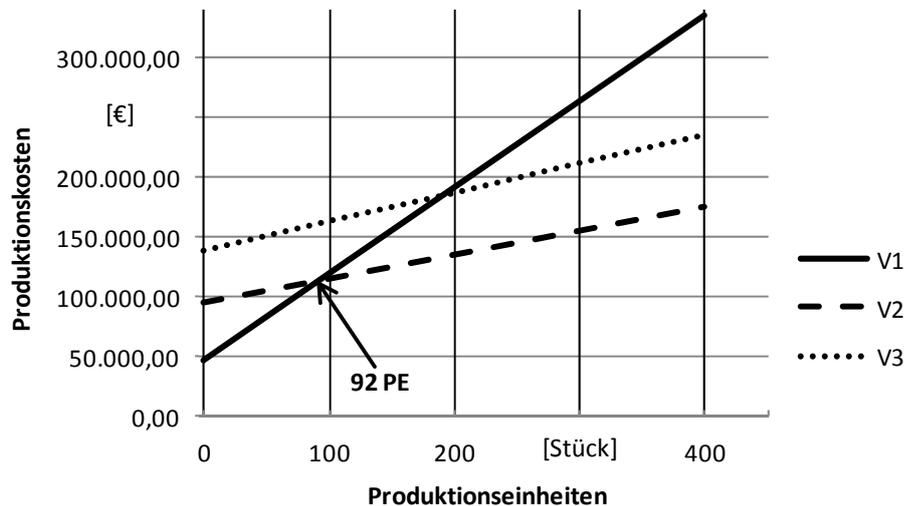


Abbildung 104: Ermittlung der kritischen Produktionsmenge

Beim Vergleich der Varianten V1, V2, V3 ist demnach ab einer kritischen Produktionsmenge von 92 PE die Investition in die automatisierte Variante V2 empfehlenswert. Für die Varianten V4, V5 liegt der Grenzwert, bei dem mit Variante V4 wirtschaftlicher gefertigt werden kann, bei 700 PE.

Mit Hilfe der Amortisationsrechnung wird der Zeitraum bestimmt, in welchem das eingesetzte Kapital über Erlöse wieder an die Investoren zurückfließt. Hierbei ist diejenige Variante am vorteilhaftesten, welche die kürzeste Amortisationszeit aufweist (PERRIDON ET AL. 2009). Die Amortisationsrechnung dient dabei als ergänzende Entscheidungshilfe (HOFFMEISTER 2008), so dass eine statische Betrachtung in der Praxis häufig ausreichend ist (LOTTER & WIENDAHL 2006). Gemäß BAUMANN (2005) lässt sich die Amortisationszeit bei Rationalisierungsinvestitionen folgendermaßen berechnen:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionsausgaben [€]}}{\text{Kostensparnis und Abschreibungen [\frac{€}{a}]}} \quad (7-1)$$

Auf Basis der getroffenen Annahmen werden für die automatisierten Varianten V2, V3, V4 die Amortisationszeiten ermittelt und in Tabelle 12 dargestellt.

7 Wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems

Tabelle 12: Ermittlung der Amortisationszeiten

Eingangsgrößen		V1	V2	V3	V4	V5
Wiederbeschaffungswert K_{WB}	[€]		441.750,00	473.250,00	473.250,00	
Montagestückkosten K_{ST}	[€/Stück]	811,06	305,54	342,17	182,13	294,02
Erreichbare Stückzahl n	[Stück/a]		908	1.363	2.657	
			Ersatz von V1 durch V2	Ersatz von V1 durch V3	Ersatz von V5 durch V4	
Jährliche Kostenersparnis	[€/a]					
Kosteneinsparung pro Stück $K_{ES}=K_{ST V1/V5}-K_{ST V2/V3/V4}$	[€/Stück]		505,52	468,89	111,89	
Jährliche Kostenersparnis $K_{JE}=K_{ES} \cdot n$	[€/a]		459.013,49	639.102,14	297.281,89	
Amortisationszeit $t_A=K_{WB}/K_{JE}$	[a]		0,96	0,74	1,59	

Wird die manuelle Fertigung V1 durch eine automatisierte Variante V2 bzw. V3 ersetzt, so ergeben sich in beiden Fällen Amortisationszeiten von unter einem Jahr. Trotz der höheren Montagestückkosten von Variante V3 (siehe Tabelle 11) kann im Vergleich zu V2 aufgrund der höheren erreichbaren Stückzahl eine schnellere Amortisation der Gesamtanlage erzielt werden. Auch bei einer Substitution der Variante V5 durch V4 liegt die Amortisationszeit mit ca. 19 Monaten in einem akzeptablen Bereich für industrielle Anwendungen.

7.4 Fazit

Der Vergleich der Montagestückkosten zeigt, dass mit Hilfe der automatisierten Varianten V2, V3, V4 eine deutliche Reduktion möglich ist. Durch die höheren Personal- und Instandhaltungskosten im 3-Schicht-Betrieb entstehen bei V3 im Vergleich zu V2 höhere Montagestückkosten. Durch die größere erreichbare Stückzahl kann die kürzeste Amortisationszeit mit V3 erzielt werden, jedoch liegen auch die Amortisierungszeiten der Varianten V2 und V4 in einem akzeptablen Bereich. Ausgehend von der Annahme, dass bei V1, V2, V3 in einer Produktionseinheit (PE) jeweils ein Diaphragm, ein Spant und ein Panel gefertigt werden, ist bereits ab 92 PE die Verwendung von V2 anstelle von V1 wirtschaftlicher. Bei der in V4 und V5 dargestellten Einprodukt-Fließfertigung des Referenzbauteils Spant liegt dieser Grenzwert bei 700 PE. Da die ermittelten Kennwerte jedoch maßgeblich von den getroffenen Annahmen abhängen, stellen die Beispielrechnungen lediglich das wirtschaftliche Potential der realisierten Automatisierungslösung dar. Für eine reale unternehmerische Entscheidung ist es demnach unerlässlich, eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Verwendung realer Werte des vorliegenden Anwendungsszenarios durchzuführen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Ökonomische und ökologische Gründe führten in der Vergangenheit zu einem starken Wachstum des FKV-Marktes, welches Prognosen zu Folge auch zukünftig anhalten wird (JEC COMPOSITES 2009). Ausgehend von Prototyp- und Kleinserienanwendungen erobern FVK-Bauteile zunehmend Einsatzbereiche, in welchen höhere Stückzahlen in Mittel- und Großserie gefordert werden. In dem weiten Feld möglicher Herstellungsverfahren konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Herstellung von endkonturnahen Vorformlingen (Preforms) aus trockenen, konturvarianten Einzellagen, welche im nachfolgenden Injektions- bzw. Infusionsprozess mit der Matrix durchtränkt und in ein konsolidiertes Bauteil überführt werden. Aufgrund des hohen Anteils an manuellen Tätigkeiten und hoher Ausschussraten verursacht der Arbeitsschritt der Preformherstellung ca. 50 % der gesamten Bauteilkosten. Eine umfassende Automatisierung dieses kostentreibenden Prozessschrittes birgt somit ein hohes Potenzial, die Kostenstruktur von FVK-Bauteilen positiv zu beeinflussen sowie einen wirtschaftlichen Einsatz und eine höhere Marktdurchdringung in technischen Produkten zu erzielen. Die vielfältigen, in Kapitel 2.2 vorgestellten Lösungsansätze stellen meist Speziallösungen dar und können somit nur in eingeschränktem Maß für die vorherrschende Variantenvielfalt verwendet werden. Benötigt werden daher flexible Werkzeugkonzepte, welche variantenreiche Bauteilspektren mit geringem Adaptionsaufwand meistern.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, ein Vorgehen zur Realisierung einer flexiblen Automatisierungslösung für die Erstellung des Preformaufbaus zu erarbeiten. Hierfür werden zunächst die vorherrschenden Prozessanforderungen sowie technische und wirtschaftliche Anforderungen einer automatisierten Preformherstellung detailliert analysiert. Darauf aufbauend wird eine Methodik vorgestellt, welche die systematische Entwicklung eines angepassten Montagewerkzeuges sowie die rechnergestützte Offline-Programmierung zur Einbindung in eine durchgängige Prozesskette als Schwerpunkte beinhaltet. Für eine anwendungsorientierte Umsetzung des Montagewerkzeuges erfolgt zunächst eine Analyse des Preformaufbaus hinsichtlich automatisierungsrelevanter Geometriemerkmale.

8 Schlussbetrachtung

Im Hinblick auf die identifizierten Geometriemerkmale wird der Leistungsbereich der vorgestellten Montagewerkzeuge in Vorversuchen bestimmt und anhand eines Netzdiagramms visualisiert. Durch den Abgleich der auftretenden Geometriemerkmale mit dem ermittelten Leistungsbereich eines Montagewerkzeuges kann eine geeignete Automatisierungslösung ausgewählt und falls nötig, Ergänzungen bereits in der Konzeptphase vorgenommen werden. Im Umkehrschluss kann dieses Vorgehen auch dazu verwendet werden, um bei neuen Bauteilen ein „Design for Automation“ zu realisieren, welches den Leistungsbereich bestehender Montagewerkzeuge bereits berücksichtigt. Die hergeleiteten Montagewerkzeugkonzepte integrieren eine selektive Greif- und Heizfunktionalität, welche es ermöglicht, konturvariante Zuschnitte zu greifen und diese an bestimmten Bereichen auf dem Formwerkzeug durch gezieltes Aufschmelzen des thermoplastischen Binders zu fixieren. Durch eine fortschreitende Abrollbewegung der Montagewerkzeuge auf der Bauteiloberfläche können Falten und Luft einschüsse vermieden werden, so dass eine hohe Preformqualität erreicht wird. Das Textil wird dabei in einem mehrstufigen Drapierprozess verformt. Für die aufgabenspezifische Gestaltung der MWZ kommt ein dreistufiges Vorgehen zum Einsatz, bei dem zunächst die Auslegung der Werkzeuggeometrie sowie der integrierten Teilfunktionen und abschließend die Feinauslegung der MWZ erfolgen. Bei der Auswahl der notwendigen Anlagenperipherie müssen bestehende Restriktionen und Abläufe der existierenden Produktionsumgebung berücksichtigt werden. Durch die simulative Absicherung des Anlagenentwurfs und der Prozessabläufe fließt identifiziertes Optimierungspotenzial frühzeitig in den Planungsprozess ein. Für die komplexe Bahnplanung der MWZ wird ein Vorgehen vorgestellt, welches auf der Definition von Legekurven auf der Bauteiloberfläche zur Umsetzung der Drapierstrategie basiert. Aufbauend auf dem bereits erstellten Simulationsmodell, der individuellen Konfiguration des eingesetzten MWZ sowie der Definition der Legeaufgabe erfolgt die Bahntransformation zur Erzeugung von Robotercode mit bahnsynchronen Ansteuersignalen.

Die vorgestellte Methodik wird anhand einer Versuchsanlage praktisch umgesetzt. Die eingesetzten industriellen Referenzbauteile aus der Luft- und Raumfahrt stellen dabei aufgrund ihrer Material-, Formen- und Konturvielfalt hohe Ansprüche an das roboterbasierte Montagewerkzeug, dessen Funktionsprinzip zunächst mit Hilfe von Funktionsmustern im Labormaßstab abgesichert wird. Der modulare Aufbau des realisierten zylinderförmigen Montagewerkzeuges ermöglicht eine schnelle Konfiguration und Adaption an die verschiedenen Referenzbauteile. Relevante Prozessparameter des Drapierprozesses können durch die integrierte Sensorik überwacht und auf einen vorgegebenen Sollwert geregelt

werden. Die Versuchsumgebung beinhaltet neben dem roboterbasierten MWZ auch ein Ablagesystem sowie einen Drapierbereich zur Positionierung der Formwerkzeuge. Für die Umsetzung der rechnergestützten Offline-Programmierung werden zunächst in einem CAD-Programm Legekurven erstellt, welche anschließend in einen Drapierassistent importiert und weiterverarbeitet werden. In diesem kann der Benutzer die bauteilindividuelle Konfiguration und Parametrierung des MWZ, die Textilpositionierung sowie die bahnsynchrone Konfiguration der Ansteuerbefehle festlegen. Auf Basis dieser Angaben erfolgt die automatische Berechnung der Aufnahme- und Legekurven, welche simulativ überprüft werden können, bevor das entsprechende Roboterprogramm mit bahnsynchronen Schaltsignalen erzeugt wird.

In der anschließenden experimentellen Validierung wird die funktionale Leistungsfähigkeit der realisierten Automatisierungslösung anhand des industriellen Referenzszenarios bewertet. Hierfür werden die einzelnen Prozessphasen, die Positioniergenauigkeit, die Prozesszeit, der Schallpegel sowie der Energieverbrauch näher untersucht. Die positiven Versuchsergebnisse zeigen die erfolgreiche und zielführende Umsetzung der vorgestellten Methodik anhand der Versuchsanlage. Das Potenzial des entwickelten Montagewerkzeuges für neue Anwendungsmöglichkeiten wird durch weiterführende Voruntersuchungen aufgezeigt.

In der abschließenden wirtschaftlichen Bewertung werden fünf realitätsnahe Anwendungsszenarien näher beleuchtet. Hierbei zeigt sich, dass mit Hilfe der automatisierten Anwendungsszenarien eine deutliche Senkung der Montagestückkosten sowie industriell akzeptable Amortisationszeiten erreicht werden können.

8.2 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurde der Grundstein für eine automatisierte Preformherstellung in einer durchgängigen Prozesskette gelegt. Für industrielle Anwendungen im Dauerbetrieb muss insbesondere für die elastische Drapierschiicht des Montagewerkzeuges eine robustere Materialauswahl getroffen werden. Zudem würde eine Vakuumerzeugung direkt auf dem Montagewerkzeug durch den Förderschlauch verursachte Bewegungseinschränkungen vermeiden. Die resultierende kompakte Bauform kann über ein Standardwerkzeugwechselsystem an den Roboter angebunden werden, so dass lange Rüstzeiten entfallen

8 Schlussbetrachtung

und die Einbindung in einen Werkzeugbahnhof möglich ist. Durch eine geschickte geometrische Gestaltung und Anbindung der Kammern ist ebenfalls eine automatisierte Konfiguration des modularen MWZ möglich. Zudem könnte eine Kammer mit standardisierten Abmaßen und Schnittstellen zum Einsatz kommen, welche bereits alle notwendigen Funktionen integriert. Durch die Anbindung der Standardkammer an eine entsprechend gestaltete Trägereinheit kann somit auch die Werkzeuggeometrie des MWZ variabel gestaltet werden (siehe Abbildung 105). Die um diesen Freiheitsgrad vergrößerte Flexibilität des MWZ steigert einerseits die allgemeingültige Einsetzbarkeit des Funktionsprinzips, andererseits lassen sich durch die Standardisierung auch Kosten reduzieren.

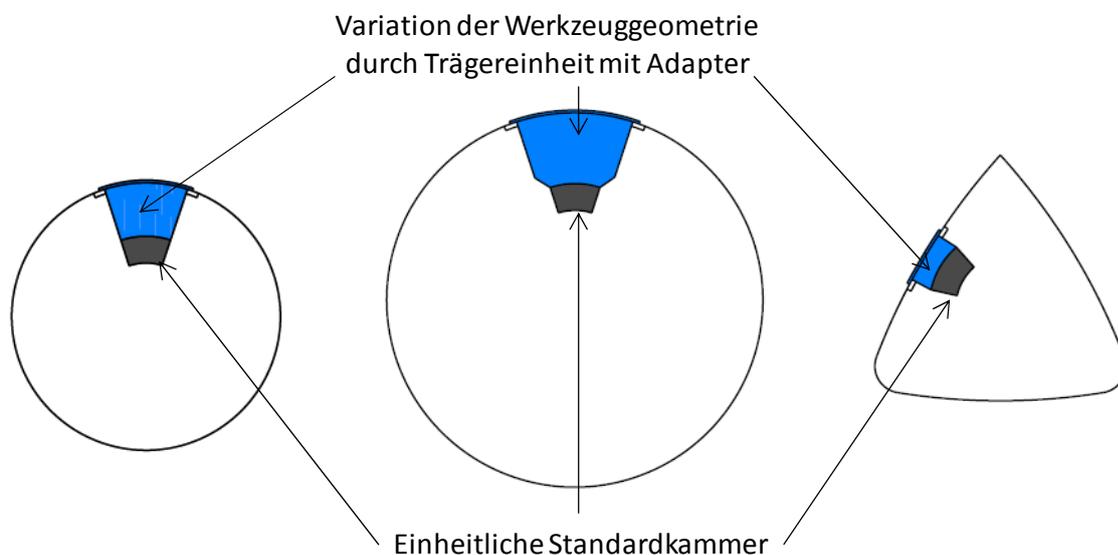


Abbildung 105: Einsatz von Standardkammern zur Variation der Werkzeuggeometrie

Weiterhin würde der Einsatz in ersten industriellen Anwendungen wichtige Impulse für eine funktionale Weiterentwicklung der vorgestellten Automatisierungslösung liefern. Für eine industrielle Etablierung muss jedoch auch soweit wie technisch möglich ein automatisierungsfreundliches Design der CFK-Bauteile umgesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass bereits im Konstruktionsprozess die Grenzen und Möglichkeiten bestehender Automatisierungslösungen Berücksichtigung finden müssen.

Im Bereich der Forschung erschließt sich ein großes Potenzial durch den Aufbau einer intelligenten Inline-Prozessregelung, da im derzeitigen Fertigungsprozess auftretende Fehler in der Prozesskette spät oder nicht erkannt werden. Bei einer Erkennung direkt am Entstehungsort könnte hingegen noch korrigierend eingegriffen werden (REINHART ET AL. 2010). Bestehende Systeme zur Fehlererken-

nung und Qualitätssicherung, wie in GÖTTINGER ET AL. (2009), MIENE (2009), SCHMITT & MERSMANN (2010), THANNER & PALFINGER (2010) und ORTH (2008) beschrieben, müssten für die Integration in das MWZ und den Aufbau einer Inline-Prozessregelung entsprechend adaptiert werden. Durch diese Maßnahme kann die Bauteilqualität verbessert und dokumentiert werden, wodurch die Eignung neuer Automatisierungstechnologien transparent und überprüfbar wird.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem in einer Verbesserung der bestehenden Bahnplanung. Die realisierte Bahntransformation beschränkt sich auf Montagewerkzeuge, welche die Geometrie eines geraden Kreiszylinders aufweisen. Bei abweichenden Werkzeuggeometrien wird die mathematische Beschreibung der Bahntransformation deutlich komplizierter. Um für beliebige, abrollbare Werkzeuggeometrien die Bahntransformation durchführen zu können, muss hier ein Algorithmus gefunden werden, welcher eine allgemeine Beschreibung der notwendigen Transformation zulässt.

Ein interessanter Forschungsansatz ist es weiterhin durch den Einsatz neuartiger Simulationsmethoden, welche die Drapierfähigkeit und das Drapierverhalten von technischen Textilien beinhalten (POTLURI & ATKINSON 2003), definierte Legestrategien und die dadurch erreichbare Drapierqualität frühzeitig zu überprüfen und zu optimieren.

9 Literaturverzeichnis

ANGERER ET AL. 2011

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W.; Reinhart, G.: Design of an Automation System for Preforming Processes in Aerospace Industries. In: Wang, M. Y. (Hrsg.): IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2011) // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2011. Piscataway, NJ: IEEE 2011, S. 557-562. ISBN: 978-1-4577-1730-7.

ANGERER ET AL. 2010

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W.; Reinhart, G.; Straßer, G.: Automated Cutting and Handling of Carbon Fiber Fabrics in Aerospace Industries. (Hrsg.): 6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering 2010, S. 861-866.

APMANN ET AL. 2010

Apmann, H.; Flessner, T.; Hemmen, A.; Herkt, M.: Automated handling of dry carbon and prepreg materials for the serial production for aeronautical and automotive applications. In: SAMPE EUROPE (Hrsg.): 1st Symposium on Automation in Composite Technology 2010.

AVK 2010

AVK: Handbuch Faserverbundkunststoffe. 3., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0881-3.

BAUMANN 2005

Baumann, A.: Produktionsorganisation mit Qualitätsmanagement und Produktpolitik. 4., verb. Aufl., 1. Dr. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer 2005. ISBN: 3-8085-5244-1.

BELL 2005

Bell, I.: The future of control (programmable automation controllers). Manufacturing Engineer 84 (2005), S. 36-39.

BENDER 2005

Bender, K.: Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Dordrecht: Springer 2005. ISBN: 978-3-5402-7370-7.

BERCHTHOLD ET AL. 2009

Berchthold, G.; Schimkus, R.; Schulte, K.: Automatisierungstechnologien für große CFK-Strukturen der Luftfahrt. Lightweight Design (2009) 4/5, S. 72-76.

BERUFGENOSSENSCHAFT 1990

Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Lärm. Berufsgenossenschaft 1990.

BICKELMAIER 2010

Bickelmaier, M.: Entwurf und Umsetzung einer Anwendung zur roboterbasierten Fertigung von Kohlenstofffaserbauteilen (Diplomarbeit): ISSE Universität Augsburg. Augsburg (27.10.2010).

9 Literaturverzeichnis

BIERMANN ET AL. 2008

Biermann, D.; Hufenbach, W.; Seliger, G.: Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe: Sefawe. Untersuchung zum Forschungs- und Handlungsbedarf (2008). ISBN: 978-3-0002-6217-3

BILSING AUTOMATION GMBH 2012

Bilsing Automation GmbH: Flexible Tooling.

<http://p52279.typo3server.info/fileadmin/downloads/brochures/BA_Flexible_Tooling_Greifen_und_Transportieren.pdf> - 02.01.2012.

BRECHER & EMONTS 2011

Brecher, C.; Emonts, M.: Automatisierte Handhabung für die FVK-Großserienproduktion. In: 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe 2011.

BREIING & KNOSALA 1997

Breiling, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer Verlag 1997. ISBN: 3-540-61086-3.

BREMER WERK FÜR MONTAGESYSTEME GMBH 2012

Bremer Werk für Montagesysteme GmbH: Faserverbundwerkstoffe.

<http://www.bwm-gmbh.de/faserverbundwerkstoffe_226f96c657f9c269/faserverbundwerkstoffe.html> - 02.01.2012.

BRÖTJE-AUTOMATION GMBH 2010

Brötje-Automation GmbH: Automated handling system for fibre composites. JEC Composites Magazine 47 (2010) 57, S. 38.

BUCKINGHAM & NEWELL 1996

Buckingham, R. O.; Newell, G. C.: Automating the manufacture of composite broadgoods. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 27A (1996) 3, S. 191-200.

CAMPBELL 2004

Campbell, F. C.: Manufacturing processes for advanced composites. Oxford: Elsevier 2004. ISBN: 1-8561-7415-8.

CONRAD 2005

Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. 3., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser 2005. ISBN: 3-446-40471-6.

CORIOLIS COMPOSITES 2011

Coriolis Composites: Roboter für Fiber Placement. <<http://www.coriolis-composites.com/technologie.php>> - 15.02.2012.

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen (Techn. Univ., Diss.--München, 2000). München: Utz 2000. ISBN: 3-896-75783-0. (Forschungsberichte / iwB Bd. 143).

DANGELMAIER 2001

Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer 2001. ISBN: 3-540-42098-3.

DÄUMLER & GRABE 2007

Däumler, K.-D.; Grabe, J.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. 12 Aufl.: Nwb 2007. ISBN: 978-3-482-52302-1.

DECHENT ET AL. 1991

Dechent, H.-O.; Haggemüller, R.; Ludwig, A.: Informations- und Funktionsmodellierung mit GRAPES. Berlin, München: Siemens-Aktienges. 1991. ISBN: 978-3-800-94108-7.

DIESS 1988

Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse (Techn. Univ., Diss.--München, 1988). Berlin: Springer 1988. ISBN: 3-540-18799-5. (Forschungsberichte / iwv Bd. 11).

DIN EN ISO 12100

DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin: Beuth 2011.

DIN 6763

DIN 6763: Nummerung - Grundbegriffe. Berlin: Beuth 1985.

DIN 4000

DIN 4000: Sachmerkmal-Listen. Berlin: Beuth 1992.

DIN 8593

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2003.

DÖRNER 1990

Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. 13. - 16. Tsd. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1990. ISBN: 978-3-498-01260-1.

DÖRSCH 2010

Dörsch, C.: Das bwm-Composite-Production-System. (Hrsg.): Husum Windenergy Congress 2010.

DRECHSLER 2008

Drechsler, K.: Automatisierung als Schlüssel für die kostengünstige Fertigung von Faserverbund-Leichtbaustrukturen im Flugzeug- und Automobilbau (Automatica 2008). München: 12.06.2008.

DRECHSLER 2009

Drechsler, K.: Einführung in Werkstoffe und Fertigungstechnologien für Carbon Composites (Vorlesungsskript). Garching: 2009.

DRECHSLER & VOGGENREITER 2010

Drechsler, K.; Voggenreiter, H.: Augsburg - Zentrum für Leichtbau. Symposium Material Innovativ – Faserverbundwerkstoffe und Hightech-Metalle für Automobil und Maschinenbau. Augsburg: 24.03.2010.

9 Literaturverzeichnis

DUFLOU ET AL. 2009

Duflou, J. R.; De Moor, J.; Verpoest, I.; Dewulf, W.: Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. *Annals of the CIRP* 58 (2009), S. 9-12.

DUTZ 2008

Dutz, A.: Entwicklung von Legestrategien für die automatische Konfektionierung von trockenen Kohlenstofffasermatten in Formwerkzeuge (Diplomarbeit). iwB, TU München 2008.

EBERHARDT 2007

Eberhardt, G.: Umformtechnik. Tiefziehen (Vorlesungsskript). Pforzheim: 2007.

EBERT ET AL. 2008

Ebert, J.; Jahnel, C.; Wienecke-Janz, D.: Bionik. Gütersloh [u.a.]: Wissen Media Verl. 2008. ISBN: 978-3-577-16209-8.

EHRENSTEIN 2006

Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. 2., völlig überarb. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-22716-3.

EHRENSPIEL 2003

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 2., überarb. Aufl. München: Hanser 2003. ISBN: 3-446-22119-0.

ELEKTOR AIRSYSTEMS GMBH 2010

Elektor airsystems GmbH: Kennlinien CFH 250 D5 (Datenblatt) 2010.

ELMO RIETSCHLE 2012

Elmo Rietschle: www.gd-elmorietschle.de - 02.01.2012.

EVERSHEIM ET AL. 1999

Eversheim, W.; Bleicher, K.; Brankamp, K.; Bender, K.: Produktion und Management. Berlin [u.a.]: Springer 1999. ISBN: 3-540-59360-8.

FAILLI & DINI 2004

Failli, F.; Dini, G.: An Innovative Approach to the Automated Stacking and Grasping of Leather Plies. *Annals of the CIRP* 53 (2004) 1, S. 31-34.

FEILER 2001

Feiler, M.: VARI - Kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von großflächigen Luftfahrtbauteilen. DGLR Jahrestagung (Fachsitzung Produktionsverfahren). Hamburg: 17.-20. September 2001.

FELDMANN & SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly Flexible Assembly – Scope and Justification. *Annals of the CIRP* 50 (2001) 2, S. 489-498.

FLEMMING ET AL. 1999

Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Berlin: Springer 1999. ISBN: 978-3-54061-659-4.

FRAUENHOFER ET AL. 2007

Frauenhofer, M.; Dilger, K.; Böhm, S.; Ströhlein, T.: Potentiale des induktiven Preformens. ifs-Kolloquium 2007, Braunschweig.

FRESNER ET AL. 2009

Fresner, J.; Bürki, T.; Sittel, H. H.: Ressourceneffizienz in der Produktion. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposium 2009. ISBN: 978-3-93970-748-6.

GÖTTINGER ET AL. 2009

Göttinger, M.; Weimer, C.; Miene, A.: Inline-Prozesskontrolle in der CFK-Fertigung. (Hrsg.): Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009.

GÖTZ 1991

Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile (Techn. Univ., Diss.--München, 1991). Berlin: Springer 1991. ISBN: 3-540-54401-1. (Forschungsberichte / iwB Bd. 39).

GREB ET AL. 2010

Greb, C.; Schnabel, A.; Gries, T.; Kruse, F.: Development of new preforming processes for high performance fibre-reinforced plastic (FRP) components. SAMPE journal (2010) 5, S. 42-51.

GREB ET AL. 2011

Greb, C.; Schnabel, A.; Linke, M.; Gries, T.: Neuartige Technologien und Prozessketten für die Großserienfertigung textiler Preforms. In: 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe 2011.

GROßMANN ET AL. 2010

Großmann, K.; Mühl, A.; Löser, M.; Cherif, C.; Hoffmann, G.; Torun, Ahmet: New solutions for the manufacturing of spacer preforms for thermoplastic textile-reinforced lightweight structures. Production Engineering 4 (2010), S. 589-597.

GRUNDMANN 2009

Grundmann, T. C.: Automatisiertes Preforming für schalenförmige komplexe Faserverbundbauteile (Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2009.). Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-8322-8381-0.

GUTSCHE 1993

Gutsche, C.: Beitrag zur automatisierten Montage technischer Textilien (Techn. Univ., Diss.--Berlin, 1992). München: Hanser 1993. ISBN: 3-446-17485-0. (Produktionstechnik - Berlin 115).

HAGEMANN 2009

Hagemann, F.: Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen (Techn. Univ., Diss.--München, 2009). München: Utz 2009. ISBN: 978-3-8316-0861-4. (Forschungsberichte / iwB Bd. 226).

HANCOCK & POTTER 2006

Hancock, S. G.; Potter, K. D.: The use of kinematic drape modeling to inform the hand lay-up of complex composite components using woven reinforcements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006) 3, S. 413-422.

9 Literaturverzeichnis

HENNING 2008

Henning, K.: Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms. Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-7133-6. (Textiltechnik Bd. 14).

HERKT 2009

Herkt, M.: Automated Handling of Dry Carbon Fabric and Prepreg Material for Frame- and Stringer Production. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): EUCOMAS 2009.

HIGGINS 1994

Higgins, J. M.: 101 creative problem solving techniques. Winter Park, Fla: New Management Pub. Co. 1994. ISBN: 1-8836-2900-4.

HINTERHÖLZL 2010

Hinterhölzl, R. M.: Simulation der Composite-Prozesskette. Carbon Composites e. V., Augsburg: 09.07.2010.

HOFFMEISTER 2008

Hoffmeister, W.: Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. 2 Aufl. Berlin: BWV, Berliner Wiss.-Verl. 2008. ISBN: 978-3-8305-1503-6.

HOBMANN 1992

Hoßmann, J.: Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen (Techn. Univ., Diss.--München, 1991). Berlin: Springer 1992. ISBN: 3-540-55220-0. (Forschungsberichte / iwv Bd. 43).

HUFENBACH 2007

Hufenbach, W.: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. Dresden: SDV-Die Medien AG 2007. ISBN: 978-3-00-022109-5.

JACOBS & DÜRR 2002

Jacobs, H.-J.; Dürr, H.: Entwurf und Gestaltung von Fertigungsprozessen. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. 2002. ISBN: 3-446-21748-7.

JEC COMPOSITES 2009

JEC Composites: Strategic Studies, Global Market Scenario. JEC Composites 2009.

KLEINEBERG ET AL. 2000

Kleineberg, M.; Pabsch, A.; Herrmann, A. S.: Kostengünstige Faserverbundstrukturen - eine Frage neuer Produktionsansätze.

<http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/publikationen/2000/03_herrmann.pdf> - 11.08.2010.

KLEINEBERG ET AL. 2002

Kleineberg, M.; Wenner, U.; Hanke, M.: Cost Effective CFRP-Fuselage Manufacturing with Liquid Resin Infusion (LRI) -Technologies. Projektabschluss „Schwarzer Rumpf“, Braunschweig, Germany: 24.10.2002.

KLEPPMANN 2006

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. 4., überarb. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 3-446-40617-4. (Praxisreihe Qualitätswissen).

KÖHLER ET AL. 2009

Köhler, G.; Ochs, A.; Schneider, M.: Automatisierung in der Leichtbauproduktion. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 9, S. 614-617.

KOLLURU ET AL. 2000

Kolluru, R.; Valavanis, K. P.; Smith, S. A.; Tsourveloudis, N.: Design Fundamentals of a Reconfigurable Robotic Gripper System. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 30 (2000) 2.

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2007

Mitteilungen der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament: Ergebnisse der Überprüfung der Strategie der Gemeinschaft zur Minderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Brüssel: 07.02.2007.

KORDI 2009

Kordi, M. T.: Entwicklung von Roboter-Endeffektoren zur automatisierten Herstellung textiler Preforms für Faserverbundbauteile. Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-8322-8449-7.

KORDI ET AL. 2008

Kordi, M. T.; Hüsing, M.; Corves, B.: Development of a Multifunctional Robot End-Effector System for Automated Manufacture of Textile Preforms. (Hrsg.): 2007 IEEE/Asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: IEEE 2008. ISBN: 978-1-4244-1263-1.

KREBS 2010A

Krebs, F.: Offline Programmierung & Digitale Fabrikplanung. Carbon Composites e. V., Augsburg: 09.07.2010.

KREBS 2010B

Krebs, F.: Digital Composites Manufacturing mit Dassault Systèmes DELMIA Robotics and CATIA Composites Design. Carbon Composites e. V., Augsburg: 19.11.2010.

KRENKEL 2009

Krenkel, Walter (Hrsg.): Verbundwerkstoffe. Weinheim: Wiley-VCH 2009. ISBN: 978-3-5273-2615-0.

KUGELMANN 1999

Kugelman, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Utz 1999. ISBN: 3-89675-615-X. (Forschungsberichte / iwB Bd. 127)

KUKA ROBOTER GMBH 2010

KUKA Roboter GmbH: WorkVisual 1.1. KUKA System Technology. Stand 30.03.2010.

9 Literaturverzeichnis

LIEN & DAVIS 2008

Lien, T. K.; Davis, P. G.: A novel gripper for limb materials based on lateral Coanda ejectors. *Annals of the CIRP* 57 (2008), S. 33-36.

LINDEMANN 2005

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2005. ISBN: 3-540-14041-7.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3-5402-1413-7.

LUGER ET AL. 1999

Luger, A. E.; Geisbüsch, H.-G.; Neumann, J. M.: *Funktionsbereiche des betrieblichen Ablaufs*. 4. Aufl. München [u.a.]: Hanser 1999. ISBN: 3-446-21158-6.

LUNZE 2008

Lunze, J.: *Automatisierungstechnik*. 2. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg 2008. ISBN: 978-3-486-58061-7.

MAG IAS 2011

MAG IAS: *Produktionslösungen für die automatisierte Verarbeitung von Faser-verbundwerkstoffen*. <<http://www.mag-ias.com/mag/produkte-services/composites.html>> - 20.02.2012.

MAHRHOLZ ET AL. 2008

Mahrholz, T.; Mosch, J.; Wurl, T.; Ströhlein, T.; Kleineberg, M.: *Inductive Heating for CFRP Production*. DLR - Institute of Composite Structures and Adaptive Systems. Innovation Report 2008.

MASEY & CALDWELL 2007

Masey, R. J. M.; Caldwell, D. G.: *Design of an Automatic Handling System for Limb, Flexible Sheet Lasagna Pasta*. (Hrsg.): 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation 2007. ISBN: 1-4244-0601-3.

MEUNIER & KNIBBS 2007

Meunier, M.; Knibbs, S.: *Design Tools for Fibre Reinforced Polymer Structures*. <<http://www.ncn-uk.co.uk/DesktopDefault.aspx?tabindex=117&tabid=401>> - 12.01.2012.

MEYER 2008

Meyer, O.: *Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen*. Online-Ressource: <<http://d-nb.info/988375435>>. Stuttgart: 2008.

MIENE 2009

Miene, A.: Genau in die Textur geschaut. *Kunststoffe* (2009) 5, S. 62-65.

MILLS 2001

Mills, A.: Automation of carbon fibre preform manufacture for affordable aerospace applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (July 2001) 7, S. 955-962.

MILLS 2006

Mills, A.: Development of an automated preforming technology for resin infusion processing of aircraft components. *Journal of Aerospace Engineering* 220 (2006), S. 499-505.

MITSCHANG 2004

Mitschang, P.: Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM-Fertigung. Kaiserslautern: IVW 2004. ISBN: 3-934930-42-5.

MITSCHANG & BERESHEIM 2004

Mitschang, P.; Beresheim, G.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. München: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22041-0.

MONKMAN 2007

Monkman, G. J.: *Robot grippers*. Weinheim: Wiley-VCH 2007. ISBN: 978-3-527-40619-7.

MORO ET AL. 2009

Moro, J. L.; Alihodzic, B.; Rottner, M.; Weißbach, M.: *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 3-540406-13-1.

MÜLLER 2007

Müller, D. H.: *Technischer Abschlussbericht für das Verbundprojekt PRO-CFK*. Bremen: 2007. <<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/572303122.pdf>> - 20.02.2012.

MUSER 2007

Muser, M.: *Komplexe Strukturen in VAP-Infusionstechnik*. <http://bayern-innovativ.de/ib/site/documents/media/ce2ba7f9-af78-0289-a8cd-4559fe02348a.pdf/Muser_frei.pdf> - 30.06.2010.

OCHS 2010

Ochs, A.: *Schwingungsunterstütztes Greifen von technischen Textilien*. *wbk topics* (2010) 1, S. S. 3.

OHLENDORF ET AL. 2010

Ohlendorf, J.-H.; Hans, C.; Ghrairi, Z.; Thoben, K.-D.: *Intelligent Production of Rotor Blades using IT-aided Automation Approaches*. *DEWI-Magazin* (2010) 37, S. 16-25.

ORTH 2008

Orth, A.: *Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen*. Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-6983-8.

OSTHUS 1996

Osthus, T.: *Comparison of the economic efficiency of textile prepregs*. In: *Proceedings of the International Man-Made-Fibres Congress*. Dornbirn: 1996.

OXEON AG 2011

Oxeon AG: *Safety Data Sheet - TeXtreme and TeXero* 2011.

9 Literaturverzeichnis

PAHL ET AL. 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Pahl-Beitz: Konstruktionslehre. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 3-5403-4060-2.

PERRIDON ET AL. 2009

Perridon, L.; Steiner, M.; Rathgeber, A. W.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. 15. Aufl. München: Vahlen 2009. ISBN: 978-3-8006-3679-2.

PETERSEN 2003

Petersen, B.: Flexible Handhabungstechnik für die automatisierte Mikromontage. Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1815-7.

PIEPENBROCK 2007

Piepenbrock, J.: Automatisierte CFK-Schalenfertigung. Abschlussbericht für das Verbundprojekt PRO-CFK. Stade: 2007. <<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/572298498.pdf>> - 20.02.2012.

PONN & LINDEMANN 2008

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-68562-3.

POTLURI & ATKINSON 2003

Potluri, P.; Atkinson, J.: Automated manufacture of composites: handling, measurement of properties and lay-up simulations. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 34 (2003), S. 493-50.

R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH 2003

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Handbuch Faserverbundwerkstoffe. <http://download.r-g.de/handbuch/handbuch_komplett.pdf>. 20.02.2012.

REINHART & EHINGER 2010A

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Einsatz eines hochflexiblen Roboter-Endeffektors zum automatisierten Preformen. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen: Utz 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

REINHART & EHINGER 2010B

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Highly flexible robot end-effector for automated draping of dry carbon fiber textiles. In: SEICO (Hrsg.): Improvement of materials and application characteristics. Riehen: SAMPE Europe Conferences 2010, S. 468-475. ISBN: 978-3-9523565-0-0.

REINHART & EHINGER 2012

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Novel robot-based end-effector design for an automated preforming of limb carbon fiber textiles. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Future Trends in Production Engineering - Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Berlin, Germany, 8th-9th June 2011. ISBN: 978-3-642-24490-2.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.: Überblick über aktuelle Technologien für eine automatisierte Herstellung von Composites. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen: Utz 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

REINHART & STRAßER 2011

Reinhart, G.; Straßer, G.: Flexible gripping technology for the automated handling of limp technical textiles in composites industry. Production Engineering 5 (2011), S. 301-306.

REYNE 2008

Reyne, M.: Verbundwerkstoff-Lösungen: Duroplaste und Thermoplaste. Paris: JEC Group 2008. ISBN: 978-2-9526276-2-7. (JEC Publications).

RICHTLINIE 2006/42/EG 2006

Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates: 17.05.2006. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:177:0001:0001:DE:PDF>> - 20.02.2012.

ROGERS 2001

Rogers, D. F.: An introduction to NURBS. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers 2001. ISBN: 978-1-558-60669-2.

SAADAT & NAN 2002

Saadat, M.; Nan, P.: Industrial applications of automatic manipulation of flexible materials. Industrial Robot: An International Journal 29 (2002) 5, S. 434-443.

SAERTEX GMBH & Co. KG 2010

Saertex GmbH & Co. KG: VAP-Technologie. <http://www.saertex.com/fileadmin/user_upload/PDFs_etc/VAP-Technologie_D.pdf> - 10.08.2010.

SCHAAF 2010

Schaaf, W.: Composite-Textilien greifen. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen: Utz 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

SCHÄFER 2002

Schäfer, T.: Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrierobotern. Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart. Stuttgart (13.03.2002). <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3032/pdf/Diss_Schaefer_hs.pdf> - 14.10.2010.

SCHEITL 2008

Scheitle, J.-P.: Trends bei der Automatisierung der Fertigung von Faserverbundstrukturen für Hochleistungsanwendungen. Cluster-Treff Mechatronik und Automation. Oberpfaffenhofen: 27.05.2008.

SCHEMME 2010

Schemme, M.: Reaktivverfahren - Stand der Technik und Anwendungspotenziale. In: Bayern Innovativ (Hrsg.): Serientaugliche Reaktivverfahren für großflächige Composite-Bauteile. Rosenheim: 2010.

9 Literaturverzeichnis

SCHLICKSUPP 1999

Schlicksupp, H.: Innovation, Kreativität und Ideenfindung. 5., überarbeitete und erw. Aufl. Würzburg: Vogel 1999. ISBN: 3-8023-1786-6.

SCHLIMBACH 2006

Schlimbach, J.: Ökonomische Prozessanalyse und Modellintegration zur Kostenberechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe 2006. ISBN: 3-934930-60-3.

SCHMIDT 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme (Techn. Univ., Diss.--München, 1992). Berlin, New York: Springer 1992. ISBN: 978-3-5405-5025-9. (Forschungsberichte / iwv Bd. 41).

SCHMITT & MERSMANN 2010

Schmitt, R.; Mersmann, C.: Kamera prüft Faserorientierung großer CFK-Strukturen. VDI-Z Integrierte Produktion (2010) 10, S. 52-55.

SCHNEIDER 1999

Schneider, B.: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile (Techn. Univ., Diss.--München, 1999). München: Utz 1999. ISBN: 3-8967-5559-5. (Forschungsberichte / iwv Bd. 122).

SCHUH ET AL. 2011

Schuh, G.; Aghassi, S.; Orilski, S.; Schubert, J.; Bambach, M.; Freudenberg, R.; Hinke, C.; Schiffer, M.: Technology roadmapping for the production in high-wage countries. Production Engineering 5 (2011), S. 463-473.

SCHÜRMAN 2007

Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007. ISBN: 978-3-540-72189-5. (VDI-Buch).

SCHUTZRECHT DE 1003023 A1

SCHUTZRECHT DE 1003023 A1 (21.02.2002). Bayerische Motoren Werke AG. Pr.: 10.08.2000. Berthold, K.: Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines Rohlings für ein Bauteil.

SCHUTZRECHT DE 10152232 A1

SCHUTZRECHT DE 10152232 A1 (08.05.2003). DaimlerChrysler AG. Habisreiter, U.; Nordmann, B.: Verfahren und Vorrichtung zum automatisierten handhaben von Harzmatten bei der Herstellung von SMC-Teilen.

SCHUTZRECHT DE102005047645B4

SCHUTZRECHT DE102005047645B4 (25.03.2010). Bremer Werk für Montagesysteme GmbH. Pr.: 23.09.2005. Gebauer, I.; Dörsch, C.; Eckner, F.: Vorrichtung zum Aufnehmen und Ablegen flächiger Teile.

- SCHUTZRECHT DE 20 2009 014 155.1
SCHUTZRECHT DE 20 2009 014 155.1 (01.04.2010). IMA Ingenieurbüro Anton Abele+Partner GmbH; Technische Universität München. Pr.: 19.10.2009. Ehinger, C.; Haas, B.; Scharrer, J.; Straßer, G.: Vorrichtung zum Legen von flachen Bauteilen, insbesondere von formlabilen Bauteilen, auf ein Formwerkzeug.
- SCHUTZRECHT WO 01/068353 A1
SCHUTZRECHT WO 01/068353 A1 (20.09.2001). EADS Deutschland GmbH. Pr.: 13.03.2001. Filsinger, J.; Lorenz, T.; Stadler, F.; Utecht, S.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mittels eines Injektionsverfahrens.
- SELIGER ET AL. 1992
Seliger, G.; Gutsche, C.; Hsieh, L.-H.: Process Planning and Robotic Assembly System Design for Technical Textile Fabrics. Annals of the CIRP 41 (1992) 1, S. 33-36.
- SELIGER ET AL. 2003
Seliger, G.; Szimmat, F.; Niemeier, J.; Stephan, J.: Automated Handling of Non-Rigid Parts. Annals of the CIRP 52 (2003) 1, S. 21-24.
- SENDLER & WAWER 2008
Sendler, U.; Wawer, V.: CAD und PDM. 2., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 3-4464-1202-6.
- SEVERIN 1987
Severin, F.: Planung der Flexibilität von roboterintegrierten Bearbeitungs- und Montagezellen. München: C. Hanser 1987. ISBN: 978-3-4461-5001-0.
- SGL ROTEC 2010
SGL Rotec: Leistungsstarke Rotorblätter für eine neue Generation von Windenergieanlagen.
<http://www.sglgroup.com/export/sites/sglcarbon/_common/downloads/products/product-groups/ae/ae_index/SGL_Rotec_Leistungsstarke_Rotorblaetter_d.pdf>
- 20.02.2012.
- SPUR & STÖFERLE 1983
Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik. München; Wien: Hanser 1983. ISBN: 978-3-4461-2538-4.
- STEINHILBER 2009
Steinhilber, M.: Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Herstellung faserverstärkter Bauteile: Teil des deutsch-österreichischen Projektverbundes "Redux - Realisierung einer durchgängigen Prozesskette zur effizienten Produktion von CFK-Strukturen in textiler Preform-/RTM-Technik": Schlussbericht; 01.10.2005 - 31.12.2008. Ottobrunn: 2009.
- STEPHAN 2001
Stephan, J.: Beitrag zum Greifen von Textilien. Berlin: IPK 2001. ISBN: 3-8167-5622-0. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

9 Literaturverzeichnis

STRABER 2010

Straßer, G.: Automatisierte Handhabung konturvarianter, textiler Halbzeuge für die Faserverbundproduktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen: Utz 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

STRABER 2012

Straßer, G.: Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung (Techn. Univ., Diss.--München, 2012). München: Utz 2012.

SZIMMAT 2007

Szimmat, F.: Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile (Diss.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007. ISBN: 978-3-8167-7424-2.

THANNER & PALFINGER 2010

Thanner, P.; Palfinger, W.: Qualitätssicherung von Carbonfaserteilen mittels Bildverarbeitung. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen: Utz 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

TSCHÄTSCH & DIETRICH 2010

Tschätsch, H.; Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik. 10., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-1013-7. (Praxis).

UNBEHAUEN 2007A

Unbehauen, H.: Regelungstechnik I. 9. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag 2007. ISBN: 978-3-8348-9139-6.

UNBEHAUEN 2007B

Unbehauen, H.: Regelungstechnik II. 9. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg 2007. ISBN: 978-3-528-83348-0.

VAN BRUSSEL 1990

Van Brussel, H.: Planning and Scheduling of Assembly Systems. Annals of the CIRP 39 (1990) 2.

VDI 2860

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Montageeinrichtungen, Begriffe, Definitionen. Düsseldorf: Beuth 1990.

VDI 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: Beuth 1993.

VDI 2803

VDI 2803: Funktionenanalyse - Grundlage und Methode. Berlin: Beuth 1996.

VDI 2225

VDI 2225: Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch wirtschaftliche Bewertung. Berlin: Beuth 1998.

VDI 2206

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth 2004.

VERDENHALVEN 2008

Verdenhalven, J.: Industrialization of the Carbon Composite Industry. In: SAMPE EUROPE Business Office and Scientific Committee of SAMPE EUROPE (Hrsg.): CFRP: The cost down solution for top performance 2008. ISBN: 978-3-9522677-8-3.

VISTAGY 2009

Vistagy: FiberSIM 5.3 Training Materials 2009.

WANG J. ET AL. 1999

Wang J.; R. Paton; J. R. Page: The draping of woven fabric preforms and prepregs for production of polymer composite components. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 30 (1999) 6, S. 757-765.

WARNECKE 2003

Warnecke, H.-J.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. 3. Aufl. München [u.a.]: Hanser 2003. ISBN: 3-446-18593-3.

WATTER 2008

Watter, H.: Hydraulik und Pneumatik. 2 Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/GWV Fachverlage, Wiesbaden 2008. ISBN: 978-3-8348-0539-3.

WEBER 2009

Weber, W.: Industrieroboter. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. 2009. ISBN: 978-3-446-41031-2.

WIEDEMANN 2009

Wiedemann, M.: Status of application in airframe structures and future development process. In: National Agency for Finite Element Methods and Standards (Hrsg.): The analysis advantage: perspectives on engineering simulation for today and beyond. Glasgow: NAFEMS 2009. ISBN: 978-1-87437-642-2.

WORTHMANN AUTOMATION GMBH 2011

Worthmann Automation GmbH: Portalroboter zur Herstellung großer Faserverbundbauteile. <http://www.worthmann-ma.de/pdf/Produktinformation%20AB01134%20PREBLADE_Portalroboter_mit_Beschreibung.pdf> - 21.05.2011.

ZANGENMEISTER 1973

Zangenmeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 3. Auflage München: Wittmannsche Buchhandlung 1973.

ZIMMERMANN 1967

Zimmermann, Dieter (Hrsg.): ZAFO. Stuttgart-Vaihingen: Technischer Verlag Günter Grossmann GmbH 1967.

Auflistung der Veröffentlichungen der Autorin:

ANGERER ET AL. 2011

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W.; Reinhart, G.: Design of an Automation System for Preforming Processes in Aerospace Industries. In: Wang, M. Y. (Hrsg.): IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2011). Piscataway, NJ: IEEE 2011, S. 557-562. ISBN: 978-1-4577-1730-7.

ANGERER ET AL. 2010

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W.; Reinhart, G.; Straßer, G.: Automated Cutting and Handling of Carbon Fiber Fabrics in Aerospace Industries. In: IEEE (Hrsg.): IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2010). Piscataway, N.J: IEEE 2010, S. 861-866. ISBN: 978-1-4244-5447-1.

EHINGER 2011

Ehinger, C.: Überblick über neue Automatisierungstechnologien in der Faserverbundfertigung. Technikforum Produktion 2020, Nördlingen: 29.11.2011.

EHINGER 2010A

Ehinger, C.: Handhaben, Ablegen und Drapieren trockener Faser-Gelege. Vorstellung des Forschungsprojektes CFK-Text. Carbon Composites e. V., Augsburg: 19.03.2010.

EHINGER 2010B

Ehinger, C.: Steuerungstechnische Integration und Bahnplanung des Legewerkzeuges. Cluster-Workshop CFK-Text, Augsburg: 18.10.2010.

EHINGER 2009A

Ehinger, C.: Automatisiertes Konfektionieren von trockenen CFK-Textilien. Cluster-Treff Mechatronik & Automation, Augsburg: 28.04.2009.

EHINGER 2009B

Ehinger, C.: CFK-Text. Automatisiertes Preformen von CF-Textilien. 8. Forum Robotik, Nördlingen: 18.11.2009.

EHINGER & STRAßER 2009

Ehinger, C.; Straßer, G.: Ab jetzt drapiert der Roboter. Industrieanzeiger 52 (2009) 12, S. 26.

EHINGER ET AL. 2010A

Ehinger, C.; Straßer, G.; Reinhart, G.: Automatisierte Verarbeitung von trockenen CF-Textilien. Ingenieurspiegel (2010) 1, S. 46-47.

EHINGER ET AL. 2010B

Ehinger, C.; Straßer, G.; Reinhart, G.: Automatisiertes Konfektionieren von trockenen CF-Textilien beim iwb Anwenderzentrum Augsburg. CCeV NEWS (2010) 7, S. 7.

GLÜCK & EHINGER 2012A

Glück, A.; Ehinger, C.: Neue Automatisierungslösungen zur Herstellung komplexer Faserverbund-Strukturen. A³ business magazin (2012) 1, S. 49-50.

GLÜCK & EHINGER 2012B

Glück, A.; Ehinger, C.: Neue Automatisierungslösungen zur Herstellung komplexer Faserverbund-Strukturen. CCeV NEWS (2012) 11, S. 26-27.

REINHART & EHINGER 2012

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Novel robot-based end-effector design for an automated preforming of limb carbon fiber textiles. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Future Trends in Production Engineering - Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Berlin, Germany, 8th-9th June 2011. ISBN: 978-3-642-24490-2.

REINHART & EHINGER 2011

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Novel Draping End-Effector for an Automated Preforming Process of Dry Carbon-Fibre Textiles. 2nd Innovative International Composites Summit, JEC Automation Forum. Paris, Frankreich: 31.03.2011.

REINHART & EHINGER 2010A

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Einsatz eines hochflexiblen Roboter-Endeffektors zum automatisierten Preformen. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 6-1 - 6-17. ISBN: 978-3-89675-098-3.

REINHART & EHINGER 2010B

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Highly flexible robot end effector for automated draping of dry carbon fiber textiles. In: SEICO (Hrsg.): Improvement of materials and application characteristics. Riehen: SAMPE Europe Conferences 2010, S. 468-475. ISBN: 978-3-9523565-0-0.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Glück, A.; Ehinger, E.: Automated Process Chain for the Manufacturing of Fiber Reinforced Plastics (FRP). In: SAMPE EUROPE (Hrsg.): 2nd Symposium on Automation in Composite Technology 2012, München, 24.05-25.05.2012.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Philipp, T.; Schilp, J.; Shen, Y.; Spillner, Rüdiger; Thiemann, Christian: Novel automation technologies for an efficient production of fiber reinforced plastics (FRP) structures at a glance. In: SAMPE EUROPE Conference Management (Hrsg.): SAMPE EUROPE TECHNICAL CONFERENCE - SETEC 11. Basel: SAMPE Europe Conferences 2011, S. 411-418. ISBN: 978-3-9523565-4-8.

REINHART ET AL. 2010A

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.: Ansteuerungsentwicklung für ein roboter-basiertes, flexibles Handhabungswerkzeug zum automatisierten Absortieren von Zuschnitten. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop "Entwurf mechatronischer Systeme". Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut Universität Paderborn 2010, S. 157-169. ISBN: 978-3-93935-091-0.

REINHART ET AL. 2010B

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.: Der schwere Weg zum Carbon. A&D - Automation & Drives 12 (2010) 11, S. 78-80.

REINHART ET AL. 2010C

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.: Überblick über aktuelle Technologien für eine automatisierte Herstellung von Composites. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 1-1 – 1-17. ISBN: 978-3-89675-098-3.

REINHART ET AL. 2010D

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.: Automation technology for efficient manufacturing of fibre reinforced plastics (FRP). In: SAMPE EUROPE (Hrsg.): 1st Symposium on Automation in Composite Technology 2010, München, 09.06-10.06.2010.

REINHART ET AL. 2010E

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.: Highly flexible automated manufacturing of composite structures consisting of limp carbon fibre textiles. SAE International Journal of Aerospace 2 (2010) 1, S. 181-187.

REINHART ET AL. 2010F

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.; Scharrer, J.; Schilp, J.: Innovative Handhabungstechnik – Überblick und Entwicklungen. Maschinenbau 40 (2010) 2, S. 16-18.

REINHART ET AL. 2009A

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Scharrer, J.; Straßer, G.; Schilp, J.: Innovative Handhabungstechnik - Trends und zukünftige Entwicklungen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben. München: Utz 2009, S. 1-1 – 1-18. ISBN: 978-3-89675-093-8.

REINHART ET AL. 2009B

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.; Schilp, J.: Automatisierungsansätze beim Konfektionieren von CF-Textilien. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben. München: Utz 2009, S. 5-1 – 5-19. ISBN: 978-3-89675-093-8.

REINHART ET AL. 2009C

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.: Automated Handling and Processing of Carbon Fibre Textiles. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): EUCOMAS 2009 European Conference On Materials And Structures In Aerospace (1.-2. July 2009). Augsburg 2009. ISBN: 978-3-00-027303-2.

REINHART ET AL. 2009D

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.: Flexibel automatisierte Verarbeitung textiler, nicht-vorimprägnierter CF-Halbzeuge. In: MunichExpo (Hrsg.): Composites in Automotive & Aerospace. 5. Internationaler Fachkongress für Composites (14.-15. Oktober 2009). München: Materialica, MunichExpo Veranstaltungs-GmbH 2009.

STRAßER & EHINGER 2011

Straßer, G.; Ehinger, C.: CFK-Text: Forschungsprojekt zur automatisierten Herstellung von Faserverbund-Strukturen. A³ business magazin (2011) 1, S. 38.

STRAßER & EHINGER 2010

Straßer, G.; Ehinger, C.: Verbundprojekt CFK-Text: Automatisierte Herstellung von Faserverbundstrukturen. iwv Newsletter 12 (2010) 4, S. 6-7.

10 Anhang

10.1 Technische Anforderungen

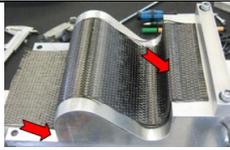
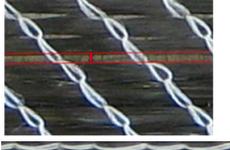
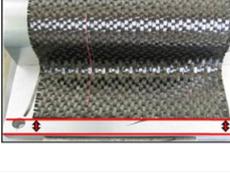
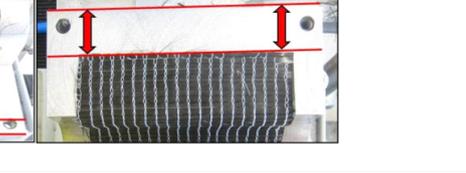
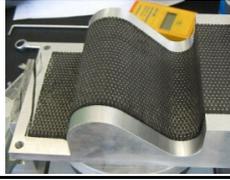
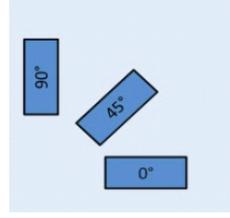
Tabelle 13: Typische Kennwerte für technische Anforderungen

Anforderung	Ausprägung
Minimal auftretende Radien	5 mm
Genauigkeit der Temperaturregelung	± 5°C
Prozessgeschwindigkeit	
Große Lagen	300 s
Kleine Lagen	60 s
Maximale Beulenbildung	2 mm
Verbotener Fremdmiteleintrag	Öle, Silikone
Kompaktierung	flächig
Zu überwachende Prozessgrößen	Differenzdruck, Heiztemperatur

10.2 Auswahl von Wirkprinzipien

Tabelle 14: Wirkprinzipienauswahl Teilfunktion „Positionieren, Orientieren“

Einteilung gemäß Abb.36	Wirkprinzipienauswahl Preforming-Prozess Teilfunktion "Positionieren und Orientieren"
1. Lösungsraum aufstellen	Multipoint-Tooling-Werkzeug/verschiebbare Stempel Vakuumaufbau mit Membran Druckluftaufbau Ansaugen durch Form Drapierrolle Kugelrolle Schaumstoffstreicher Streichende Bürste Rotierende Bürste Elastisches Schaumstoffelement Gefüllter Ballon Sandbeutel Vakuumbeutel mit Styroporkügelchen Luftstrom
2. KO-Kriterien definieren	Geringe Technologiereife/ hoher Realisierungsaufwand Kostenüberschreitung Prinzipbedingte Veränderung der Faserstruktur Fremdstoffeintrag
3. Lösungsraum eingrenzen	Drapierrolle Kugelrolle Schaumstoffstreicher Streichende Bürste Rotierende Bürste Schaumstoffelement Gefüllter Ballon Sandbeutel Vakuumbeutel mit Styroporkügelchen Luftstrom

<p>4. Untersuchungsgrößen definieren</p>	<p>Radienqualität (konkav und konvex)</p>		
	<p>Winkelveränderung des drapierten Zuschnitts</p>		
	<p>Faserbündelabstand</p>		
	<p>Faseraufweitung</p>		
	<p>Drapierte Länge des Zuschnittes</p>		
<p>Energieverbrauch</p>			
<p>5. Funktionstests durchführen</p>	<p>5.1 Design Referenzform Integration kritischer Formelemente (z. B. 90° Innen- und Außenwinkel, konkave und konvexe Winkel, maximale Verformtiefe 35 mm)</p>		
	<p>5.2 Einschränkung der Materialdaten Test aller Referenzmaterialien in verschiedenen Faserorientierungen. Untersuchte Faserorientierungen: -MAG +/-45 (rechts) -restliche Materialien des Referenzszenarios (links)</p>		
	<p>5.3 Dokumentation Fotographische Dokumentation aus unterschiedlichen Blickwinkeln</p>		
	<p>5.4 Funktionstests mit Wirkprinzipien</p> <p>Beschreibung</p> <p>5.4.1 Drapierrolle Unter Druck wird über das Textil auf dem Formwerkzeug gerollt.</p> <p>5.4.2 Kugelrolle Federnd gelagerte Kugelrollen werden über das Formwerkzeug geführt und drücken das Textil an.</p>	 	<p>Ergebnis</p> <p>Es entsteht kaum eine Relativbewegung zwischen Fasern und Formwerkzeug, so dass ein schonendes Drapieren möglich ist. Die weiche Oberfläche zerstört die Faserstruktur nicht.</p> <p>Durch die punktuelle Berührung der Kugeln können große Kräfte übertragen werden, in den Zwischenräumen wird das Textil allerdings nicht drapiert.</p>

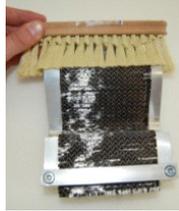
5. Funktionstests durchführen

5.4.3. Schaumstoffstreicher
Der elastische Schaumstoffstreicher streicht über die Oberfläche des Formwerkzeuges und drückt dabei das Textil an.



Aufgrund der Streichbewegung kommt es zu einer Relativbewegung zwischen den Fasern, welche die Faserstruktur negativ beeinflusst.

5.4.4. Streichende Bürste
Der Zuschnitt wird unter Druck und in einer streichenden Bewegung auf das Formwerkzeug drapiert. Damit die Borsten nicht in das Textil eindringen, wird die Bürste nicht senkrecht aufgesetzt.



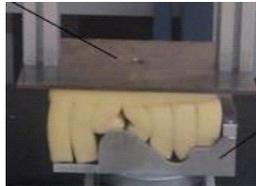
Aufgrund der Streichbewegung kommt es zu einer Relativbewegung zwischen den Fasern, welche die Faserstruktur stark negativ beeinflusst --> Ausschluss dieses Prinzips.

5.4.5. Rotierende Bürste
Im Gegensatz zur streichenden Bürste, wird der Kontakt zwischen Werkzeug und Zuschnitt durch eine Rotationsbewegung intensiviert.



Die Faserstruktur wird durch die Relativbewegung stark beschädigt --> Ausschluss dieses Prinzips.

5.4.6. Schaumstoffelement
Ein elastisches Schaumstoffelement, welches Segmentierungseinschnitte enthält, wird von oben auf das Formwerkzeug gedrückt.



Während des Andrückens entsteht keine Schädigung der Faserstruktur. Die Flexibilität des Schaumstoffs ermöglicht ein Nachfließen des Textils.

5.4.7. Gefüllter Ballon
Durch Stempelbewegungen mit einem mit Sand gefülltem Ballon kann das Textil auf das Formwerkzeug drapiert werden.



Die dehnbare, gummierte Außenhaut bewirkt, dass unter Druck eine Relativbewegung zwischen den Fasern entsteht, welche die Faserstruktur stark negativ beeinflusst --> Ausschluss dieses Prinzips.

5.4.8 Sandbeutel
Ein mit Sand gefüllter Beutel wird auf das Formwerkzeug aufgesetzt. Durch das Eigengewicht des Sandes wird das Textil in die Form drapiert.



Es kommt zu keiner Beeinflussung der Faserstruktur, jedoch kann der Drapiervorgang kaum kontrolliert oder reproduziert werden.

5.4.9 Vakuumbbeutel mit Styroporkügelchen/Sand
Ein mit Styroporkügelchen oder Sand gefüllter Vakuumbbeutel wird an die Werkzeugform angepasst und anschließend evakuiert. Die abgeformte Werkzeugkontur kann während des Drapiervorgangs als Stempel fungieren.



Durch die Stempelbewegung kann es vorkommen, dass die Faserstruktur teilweise beeinträchtigt wird.

5.4.8. Luftstrom
In einem definierten Abstand fährt eine Luftdüse über das Formwerkzeug und bläst das Textil an das Formwerkzeug.



Die Faserstruktur wird nicht beschädigt. Der Drapiervorgang kann schlecht reproduziert werden. Ein hoher Energiebedarf ist notwendig.

6. Bewertung der Wirkprinzipien	Bewertungskriterien	
	Draperqualität	Drapierte Länge des Zuschnittes Max. Faserbündelabstand Max. Faseraufweitung Winkelveränderung des drapierten Zuschnitts (quer) Winkelveränderung des drapierten Zuschnitts (längs) Max. lokaler Faserverzug Radienqualität konkav Radienqualität konvex Beulenbildung Faltenbildung Prozentualer flächiger Anteil von Faserveränderungen Gesamteindruck
	Werkzeugparameter	Anpassungsfähigkeit an 3-dim. Geometrien Gewicht Synergiepotenzial Bauraum
	Wirtschaftlichkeit	Herstellungskosten Betriebskosten Verschleiß Wartung
Bewertungsergebnis der untersuchten Wirkprinzipien: 1. Platz: Elastisches Schaumstoffelement 2. Platz: Drapierrolle 3. Platz: Luftstrom 4. Platz: Sandbeutel 5. Platz: Kugelrollen 6. Platz: Vakuumbbeutel mit Sandfüllung 7. Platz: Vakuumbbeutel mit Styroporkügelchen 8. Platz: Schaumstoffstreicher		

Tabelle 15: Wirkprinzipienauswahl für die Teilfunktion "Fixieren"

Einteilung gemäß Abb.36	Wirkprinzipienauswahl Preforming-Prozess Teilfunktion "Fixieren"
1. Lösungsraum aufstellen	Reibung mittels Vibration Reibung mittels Ultraschall Konduktion durch einen Heizwiderstand Konduktion durch Induktion Wärmestrahlung durch Laser Wärmestrahlung durch IR-Licht Konvektion durch Heißluft
2. KO-Kriterien definieren	Geringe Technologiereife/ hoher Realisierungsaufwand Kostenüberschreitung Prinzipbedingte Veränderung der Faserstruktur Fremdstoffeintrag

3. Lösungsraum eingrenzen	Reibung mittels Ultraschall Konduktion durch einen Heizwiderstand Konduktion durch Induktion Wärmestrahlung durch Laser Wärmestrahlung durch IR-Licht Konvektion durch Heißluft	
4. Untersuchungsgrößen definieren	Fixierqualität (subjektive Einschätzung) Energieverbrauch Haltekraft 	
5. Funktionstests durchführen	5. 1 Festlegung Fixierfläche 1000 mm ² , 500 mm ² , 250 mm ²	
	5.2 Funktionstests mit Wirkprinzipien Beschreibung 5.2.1 Reibung mittels Ultraschall Die von einem Ultraschall-Generator erzeugten elektrischen Schwingungen werden in mechanische Schwingungen umgewandelt und über eine Sonotrode dem Vlies zugeführt. 5.2.2 Konduktion durch einen Heizwiderstand Elektrischer Strom erwärmt einen Leiter, so dass Wärme frei wird.  5.2.3. Konduktion durch Induktion In einem magnetischen Wechselfeld werden Wirbelströme induziert, welche zu einer Erwärmung von elektrisch leitfähigen Materialien und somit zur Aktivierung des Binders führen. 5.2.4. Wärmestrahlung durch Laser Durch die Wärmestrahlung des Lasers ist es möglich, Energie in den Zuschnitt einzubringen, welche zu einer Aktivierung des Binders führt. 5.2.5. Wärmestrahlung durch IR-Licht Mit Hilfe eines Infrarotlicht-Strahlers kann das Bindervlies flächig aufgeschmolzen werden. 5.2.6. Konvektion durch Heißluft Thermische Energie wird durch Zuführen von Heißluft auf das Textil und da Bindervlies übertragen. 	Ergebnis Die Bewertung erfolgt auf theoretischer Basis, da aus Kostengründen keine Umsetzung im Rahmen von Vorversuchen möglich ist. Durch den Anpressdruck kann eine hohe Haftung zwischen den Textilien erreicht werden. Ein weiterer Vorteil ist die Gestaltungsfreiheit der Heizwiderstände. Die Bewertung erfolgt auf theoretischer Basis, da aus Kostengründen keine Umsetzung im Rahmen von Vorversuchen möglich ist. Die Bewertung erfolgt auf theoretischer Basis, da aus Kostengründen keine Umsetzung im Rahmen von Vorversuchen möglich ist. Die Bewertung erfolgt auf theoretischer Basis, da aus Kostengründen keine Umsetzung im Rahmen von Vorversuchen möglich ist. Durch den fehlenden Anpressdruck und den großen Wärmeverlust kann nur ein leichtes Anhaften der Textilien erreicht werden.

6. Bewertung der Wirkprinzipien	Bewertungskriterien	
	Prozessparameter	Materialverträglichkeit Prozesssicherheit Automatisierungsaufwand Reproduzierbarkeit Kompatibilität Schutzaufwand
	Werkzeugparameter	Taktzeit Temperaturveränderung pro Zeit Thermische Belastung Gewicht Bauraum Geometrie der Fixierstelle
	Wirtschaftlichkeit	Anschaffungskosten Betriebskosten Wartung
	Bewertungsergebnis der untersuchten Wirkprinzipien: 1. Platz: Konduktion durch einen Heizwiderstand 2. Platz: Konduktion durch Induktion 3. Platz: Wärmestrahlung durch Laser 4. Platz: Wärmestrahlung durch Infrarot 5. Platz: Konvektion durch Heißluft 6. Platz: Reibung mittels Ultraschall	

Tabelle 16: Bewertung der Kombinierbarkeit

7. Bewertung der Kombinierbarkeit	Bewertungskriterien	
	Synergiepotenzial	Einsparpotenzial bei Komponenten Zeitliches Einsparpotenzial Komplexität des Aufbaus Komplexität der Steuerung Möglichkeit synchroner Abläufe Nutzung gleicher Ressourcen
	Prozessparameter	Prozesssicherheit Automatisierungsgrad Reproduzierbarkeit
	Einzelpotenzial	Platzierung "Positionieren und Orientieren" Platzierung "Fixieren"
	Wirtschaftlichkeit	Anschaffungskosten Betriebskosten Verschleiß Wartung
Bewertungsergebnis: 1. Platz: Elastisches Schaumstoffelement und Konduktion 2. Platz: Drapierrolle und Konduktion 3. Platz: Schaumstoffelement und Konvektion 4. Platz: Drapierrolle und Konvektion 5. Platz: Schaumstoffelement und Wärmestrahlung 6. Platz: Drapierrolle und Wärmestrahlung		

10.3 Aufbau einer Drapiereinheit und Variationsmöglichkeiten der integrierten Submodule

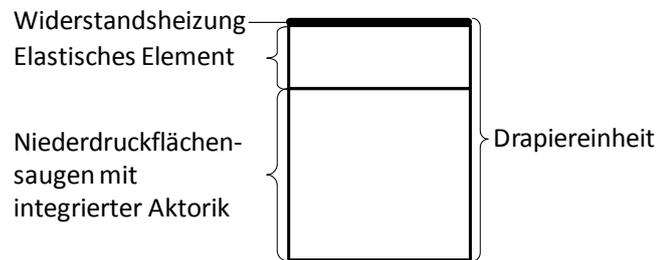


Abbildung 106: Abstrahierte Drapiereinheit mit Submodulen

Tabelle 17: Variationsmöglichkeiten der integrierten Submodule

(Sub-)Modul	Auswahl an Variationsmöglichkeiten
Drapiereinheit	Schnittstelle zur Trägereinheit, Geometrie, Anbindung der Submodule
Widerstandsheizung	Materialauswahl, Heizleistung, Sensorintegration, Anzahl und Gestalt der Heizfelder, Integration von Sensorik und Überwachungsmaßnahmen, Anbindung innerhalb Drapiereinheit
Elastisches Element	Materialauswahl (Stauchhärte, Temperaturbeständigkeit, Partikelemission, Porenausprägung), Beschichtung, Geometrie, Gestaltung der Luftführung, Anbindung innerhalb Drapiereinheit
Niederdruckflächensaugen: Aktorik:	Bohrungsabstand, -durchmesser, und -muster Gestaltung des Verschlussmechanismus, Anbringung in Drapiereinheit

10.4 Spezialgeometrien

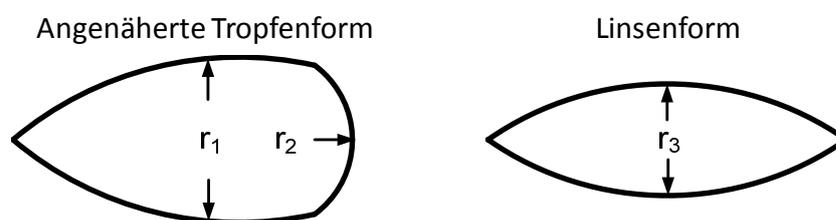


Abbildung 107: Beispielhafte Spezialgeometrien für die Gestalt des MWZ

10.5 Bewertung der Basiskonzepte ZF und MRD gemäß VDI 2225

Tabelle 18: Bewertungsergebnisse der Drapierversuche für die Basiskonzepte ZF und MRD gemäß VDI 2225

Merkmal	Grenzen (in mm)	Wert	ZFL	MRD
Konkave Elemente	R>100	1	4	4
	80<R<=100	2	3	3
	65<R<=80	3	2	3
	50<R<=65	4	1	3
	R<=50	5	0	2
Konvexe Elemente	R>50	1	4	4
	20<R<=50	2	3	4
	10<R<=20	3	3	3
	5<R<=10	4	3	3
	R<=5	5	2	2
2D Lagenabmessungen	L<1000,B<500	1	4	4
	L<1000,B<1000	2	4	4
	L<1500,B<1000	3	4	4
	L<1500,B<1500	4	1	1
	L<2000,B<1500	5	1	1
	L<2000,B<2000	6	0	0
	L<2500,B<2000	7	0	0
Grundgeometrie	Platte	1	4	4
	Quader	2	4	4
	Konvexe Schale	3	2	3
	Konkave Schale	4	2	2
Winkel der 3D-Lage	$\beta < 15^\circ$	1	4	4
	$15^\circ \leq \beta < 30^\circ$	2	3	4
	$30^\circ \leq \beta < 45^\circ$	3	2	3
	$45^\circ \leq \beta < 60^\circ$	4	0	3
	$60^\circ \leq \beta < 75^\circ$	5	0	3
	$75^\circ \leq \beta < 90^\circ$	6	0	3
	Höhenänderungen	D<5	1	4
5<=D<10		2	4	4
10<=D<20		3	3	4
20<=D<50		4	2	3
50<=D<100		5	2	2
D>=100		6	2	2
Einlegeteile	D<5	1	4	4
	5<=D<10	2	3	3
	10<=D<20	3	2	2
	20<=D<50	4	1	1
	D>=50	5	0	0

Richtlinie VDI 2225

4	sehr gut
3	gut
2	ausreichend
1	gerade noch tragbar
0	ungenügend

10.6 Exemplarische Nachdrapierwerkzeuge

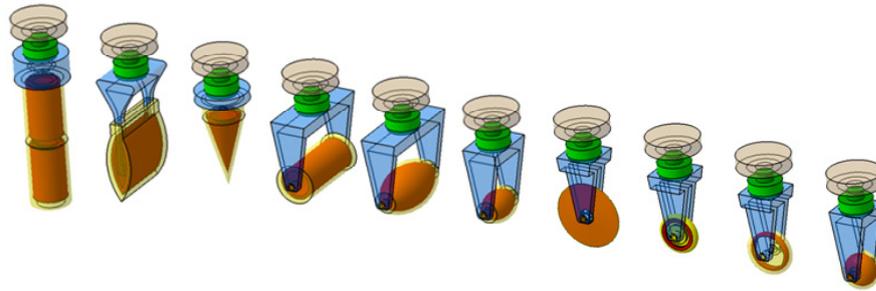


Abbildung 108: Beispiele für mögliche Nachdrapierwerkzeuge

10.7 Versuchsergebnisse des zylinderförmigen Funktionsmusters

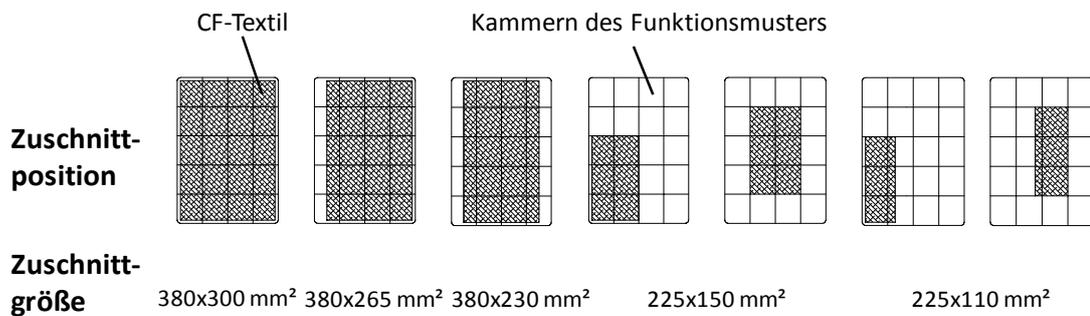


Abbildung 109: Größe und Positionierung der untersuchten Zuschnitte

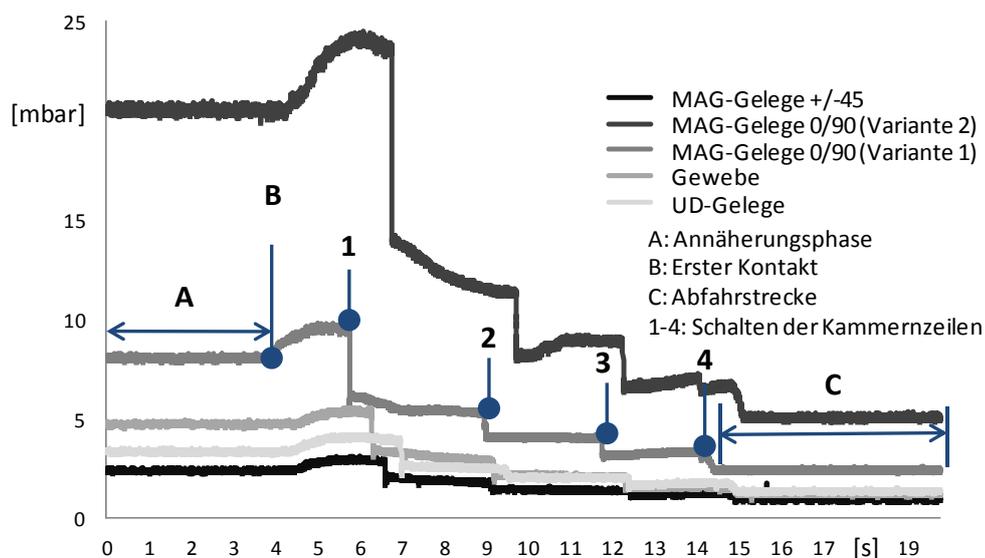


Abbildung 110: Differenzdruckverlauf bei Textilaufnahme (Zuschnittgröße: 380x300 mm²)

10.8 Bewertungsergebnisse des Funktionsmusters zum Drapieren von konkaven Winkeln

Tabelle 19: Bewertungsergebnisse gemäß VDI 2225

Winkel	Radius	Faser	Orientierung	Abrollbewegung		Stempelbewegung	
				Drapierqualität	Fixierergebnis	Drapierqualität	Fixierergebnis
90°	10 mm	UD-Gelege	Variante 1	4	4	4	4
		UD-Gelege	Variante 2 (parallel)	1	3	2	4
		MAG-Gelege +/-45	-	2	3	3	3
		Gewebe	-	3	4	3	4
		MAG-Gelege 0/90	Variante 1	4	4	4	4
		MAG-Gelege 0/90	Variante 2 (parallel)	4	4	4	4

Richtlinie VDI 2225

4	sehr gut
3	gut
2	ausreichend
1	gerade noch tragbar
0	ungenügend

10.9 Erfassung der Heizfeldtemperatur

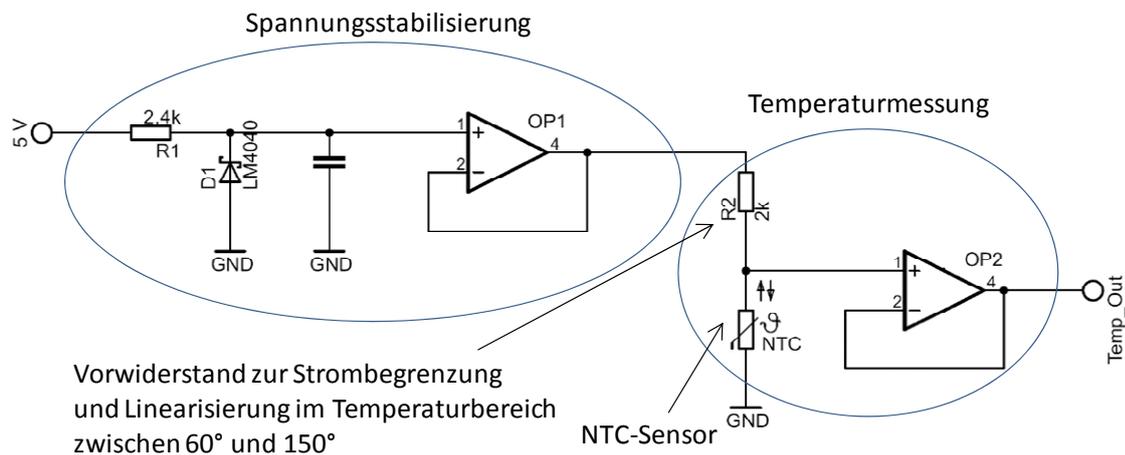


Abbildung 111: Messschaltung zur Temperaturerfassung

10.10 Drapierstrategie der Referenzbauteile Spant und Diaphragm

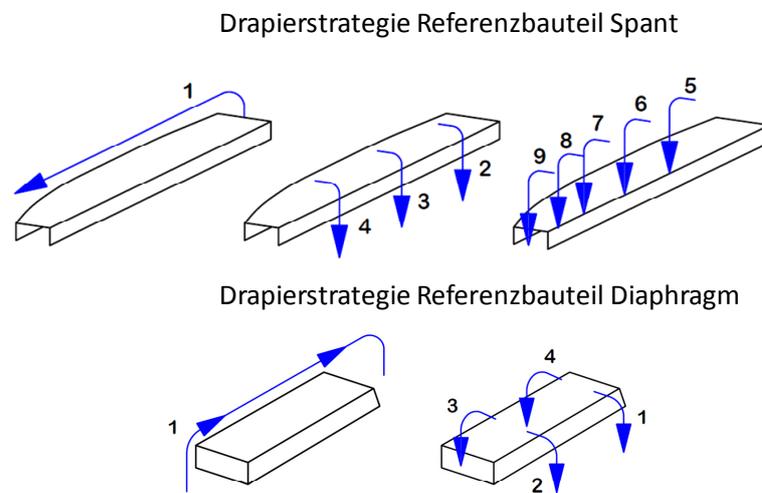


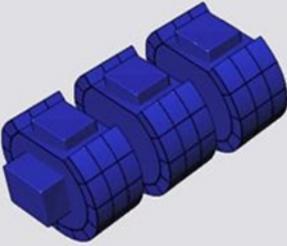
Abbildung 112: Mehrstufige Drapierstrategie der Referenzbauteile Spant und Diaphragm mit primärer Legekurve (1) und sekundären Legekurven (2...9)

10.11 Schritte des Drapierassistenten

Werkzeugkonfiguration

MontageWerkzeug
 Anzahl der Segmente

Drapier-Modul
 Außenradius [mm]
 Innenradius [mm]
 Winkel [°]
 Breite [mm]
 Maximale Stauchung [%]
 Standardstauchung [mm]
 Saug/Heizelemente pro Zeile
 Saug/Heizelemente pro Spalte



Roboterbelegung
 Drapierroboter
 Absortierroboter

Import Bauteildaten

Bauteildaten
 Name
 Beschreibung
 Hersteller
 ID

CAD Daten des Bauteils
 2D Lagenschema
 H:\CATIA\TestPart.dxf
 Legekurven
 H:\CATIA\TestPart.igs

Oid	Name	Product	Manufacturer
0	Torque Panel	product missing	ECD
0	Diaphragm	product missing	EADS
0	Spant	product missing	EADS
0	TestPart	product missing	--

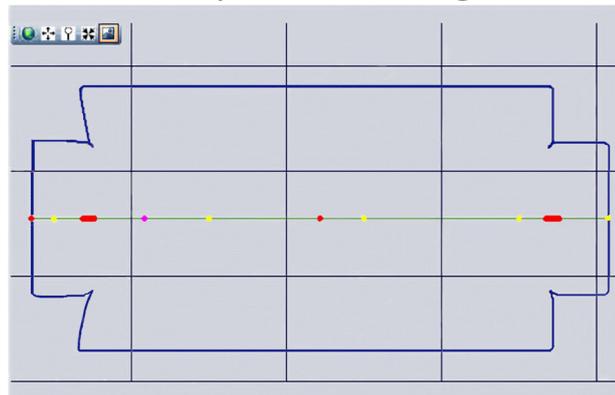
Lagenauswahl

Legekurven
 Lage
 Legekurve

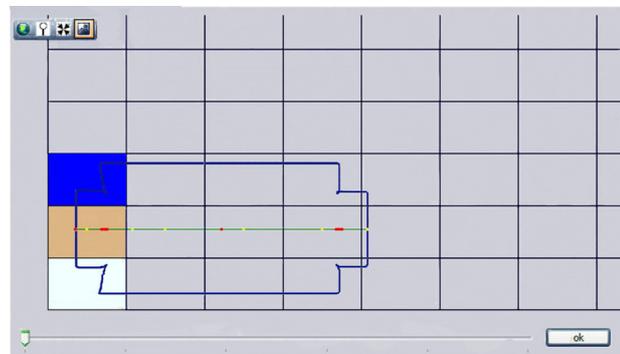
Basen- und TCP-Referenzen
 Werkzeug TCP
 Basis Lagertisch
 Basis Form-Werkzeug

Voreinstellungen
 Roboterhand-Stellung

Textilpositionierung



Kammernkonfiguration



Bahnparametrisierung

Bahnparameter

TCP-Kurve

Richtung der Bahn umkehren

Drehrichtung der Drapierkurve umkehren

Roboterhand-Stellung:

Kompression [mm]:

Kompression verwenden:

Anfahrts- und Rückzugspunkte hinzufügen

Abstand:

Feineinstellung

zusätzliche Stützpunkte:

Drehwinkelfaktor:

Bahntransformation

Abbildung 113: Prozessschritte des Drapierassistenten (in Anlehnung an BICKELMAIER 2010)

10.12 Datenblatt einer Beispiellage

Bauteil	<i>Spant</i>	Lage	2	Material	MAG-Gelege +/-45																																																	
Position auf Lagertisch																																																						
Vakuumschaltung		Hauptbahn		Nebenbahn																																																		
<table border="1"> <tr><th>Trigger</th><th>Segmente Legewerkzeug</th></tr> <tr><td>T1</td><td></td></tr> <tr><td>T2</td><td></td></tr> <tr><td>T3</td><td></td></tr> <tr><td>T4</td><td></td></tr> <tr><td>T5</td><td></td></tr> <tr><td>T6</td><td></td></tr> <tr><td>T7</td><td></td></tr> </table>		Trigger	Segmente Legewerkzeug	T1		T2		T3		T4		T5		T6		T7		<table border="1"> <tr><th>Trigger</th><th>Segmente Legewerkzeug</th></tr> <tr><td>H1</td><td></td></tr> <tr><td>H2</td><td></td></tr> <tr><td>H3</td><td></td></tr> <tr><td>H4</td><td></td></tr> <tr><td>H5</td><td></td></tr> <tr><td>H6</td><td></td></tr> <tr><td>H7</td><td></td></tr> <tr><td>H8</td><td></td></tr> <tr><td>H9</td><td></td></tr> <tr><td>H10</td><td></td></tr> <tr><td>H11</td><td></td></tr> </table>		Trigger	Segmente Legewerkzeug	H1		H2		H3		H4		H5		H6		H7		H8		H9		H10		H11		<table border="1"> <tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>5</td><td colspan="2">4x schräg</td></tr> <tr><td colspan="3">2x gerade</td></tr> </table>		2	3	4	5	4x schräg		2x gerade		
Trigger	Segmente Legewerkzeug																																																					
T1																																																						
T2																																																						
T3																																																						
T4																																																						
T5																																																						
T6																																																						
T7																																																						
Trigger	Segmente Legewerkzeug																																																					
H1																																																						
H2																																																						
H3																																																						
H4																																																						
H5																																																						
H6																																																						
H7																																																						
H8																																																						
H9																																																						
H10																																																						
H11																																																						
2	3	4																																																				
5	4x schräg																																																					
2x gerade																																																						
Prozessparameter																																																						
Benötigter Unterdruck Aufnehmen <table border="1"><tr><td>3,1</td><td>mbar</td></tr><tr><td>4</td><td>V</td></tr></table> Transportieren <table border="1"><tr><td>1,6</td><td>mbar</td></tr><tr><td>4</td><td>V</td></tr></table> Drapieren <table border="1"><tr><td>3,1</td><td>mbar</td></tr></table>			3,1	mbar	4	V	1,6	mbar	4	V	3,1	mbar	Prozesszeit Aufnahme <table border="1"><tr><td>00:35</td><td>min:s</td></tr></table> Hauptbahn <table border="1"><tr><td>04:02</td><td>min:s</td></tr></table> Nebenbahnen <table border="1"><tr><td>03:46</td><td>min:s</td></tr></table>			00:35	min:s	04:02	min:s	03:46	min:s																																	
3,1	mbar																																																					
4	V																																																					
1,6	mbar																																																					
4	V																																																					
3,1	mbar																																																					
00:35	min:s																																																					
04:02	min:s																																																					
03:46	min:s																																																					
Heizparameter Heizen <table border="1"><tr><td>115</td><td>°C</td></tr></table> Heizdauer <table border="1"><tr><td>5</td><td>s</td></tr></table> Vorheizen <table border="1"><tr><td>100</td><td>°C</td></tr></table> Vorheizdauer <table border="1"><tr><td>20</td><td>s</td></tr></table> Formheizung <table border="1"><tr><td>35</td><td>°C</td></tr></table> nur notwendig bei den ersten 4-5 Lagen am Spant			115	°C	5	s	100	°C	20	s	35	°C	Eckdaten Geschwindigkeit <table border="1"><tr><td>T2 / 30%</td></tr></table> Roboterprogramm <table border="1"><tr><td>cs_Spant_Lage_2</td></tr></table> Base_Data (Aufnahme) <table border="1"><tr><td>[7] Universaltisch</td></tr></table> Base_Data (Drapieren) <table border="1"><tr><td>[6] Spant</td></tr></table> Tool_Data <table border="1"><tr><td>[4] Legewerkzeug</td></tr></table> Anzahl Segmente <table border="1"><tr><td>3</td></tr></table>			T2 / 30%	cs_Spant_Lage_2	[7] Universaltisch	[6] Spant	[4] Legewerkzeug	3																																	
115	°C																																																					
5	s																																																					
100	°C																																																					
20	s																																																					
35	°C																																																					
T2 / 30%																																																						
cs_Spant_Lage_2																																																						
[7] Universaltisch																																																						
[6] Spant																																																						
[4] Legewerkzeug																																																						
3																																																						
Position auf Lagertisch X ₁ <table border="1"><tr><td>122</td><td>mm</td></tr></table> Y ₁ <table border="1"><tr><td>60</td><td>mm</td></tr></table>			122	mm	60	mm	Stauchung Aufnehmen <table border="1"><tr><td>0</td><td>mm</td></tr></table> Ablegen <table border="1"><tr><td>15</td><td>mm</td></tr></table>			0	mm	15	mm																																									
122	mm																																																					
60	mm																																																					
0	mm																																																					
15	mm																																																					
Besonderheiten / Kommentar																																																						
Aufnehmen			Ablegen / Drapieren																																																			
<ul style="list-style-type: none"> - Aufnahmerichtung von der breiten Seite her - erstmaliges Schalten (HM) von einer Zeile für sicheres Aufnehmen - kleiner schmaler Streifen (bei 5) franst sehr leicht aus; dann kaum aufnehmbar - bei intakter Faserstruktur sicheres Aufnehmen 			<ul style="list-style-type: none"> - Drapierprozess dreigeteilt: Hauptbahn (1), Nebenbahn schräg (2,3,4,5) und gerade (6,7) - gute Positionierung auf dem Spant, lediglich kleiner schmaler Streifen nicht optimal - bei erster Lage längere Heizzeiten erforderlich (ca. 8s) - kein Faltenwurf - Legestrategie mit CIRC-Bewegung für Stirnflächen bevorzugen 																																																			

Abbildung 114: Exemplarisches Datenblatt für einen Zuschnitt des Referenzbauteils Spant

10.13 Materialabhängige Standardparameter für die Prozessphasen

Tabelle 20: Materialabhängige Standardparameter für die Aufnahme, den Transport und das Drapieren von beliebigen Zuschnitten

Material	Standardspannung Frequenzumrichter Aufnahme	Standardspannung Frequenzumrichter Transport	Standard-Sollwertvorgabe zur Regelung des Differenzdrucks während des Drapierens in Abhängigkeit von x = Anzahl geöffnete Kammern
Gewebe	7 V	7 V	$\Delta p_{\text{Soll}} = (-0,0292 \cdot x + 4,7084)$ mbar
UD-Gelege	7 V	6,8 V	$\Delta p_{\text{Soll}} = (-0,0281 \cdot x + 4,7937)$ mbar
MAG-Gelege 0/90	7 V	6,8 V	$\Delta p_{\text{Soll}} = (-0,0281 \cdot x + 4,7987)$ mbar
MAG-Gelege +/-45	7,5 V	7,5 V	$\Delta p_{\text{Soll}} = (-0,0391 \cdot x + 5,7469)$ mbar

10.14 Positioniergenauigkeit beim Drapieren einer ebenen Lage des Referenzbauteils Panel

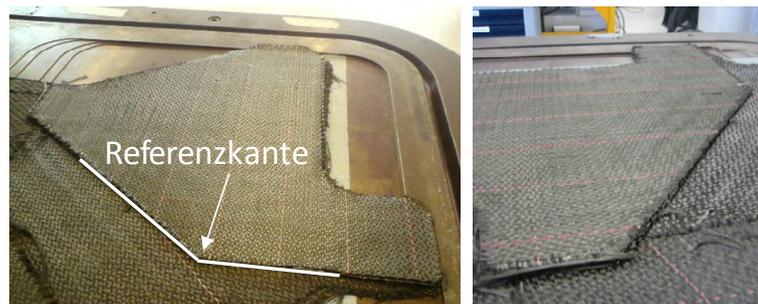


Abbildung 115: Drapieren von zehn ebenen Referenzzuschnitten zur Untersuchung der Positioniergenauigkeit

10.15 Taktzeitabschätzung

$$T_{Ges} = \sum_{i=1}^a t_{AZ} \cdot k_i + 2 \cdot a \cdot t_T + \sum_{j=1}^l (h_j \cdot t_{HZ} + n_j \cdot t_{NB} + ns_j \cdot t_{HZ}) \quad (10-1)$$

- a = Anzahl der notwendigen Aufnahmebewegungen
- h = Anzahl der zu heizenden Kammernzeilen der primären Legekurve
- k = Aufliegende Kammernzeilen pro Aufnahmebewegung
- l = Anzahl der Lagen im Preformaufbau
- n = Anzahl der sekundären Legekurven
- ns = Gesamtanzahl der zu heizenden Kammernzeilen der sekundären Legekurven
- t_{AZ} = Aufnahmezeit pro Kammernzeile (Annahme: 2 s)
- T_{Ges} = Prozesszeit pro Preformaufbau
- t_{HZ} = Heizzeit (Annahme: 10 s)
- t_{NB} = Transferzeit zum Umsetzen auf sekundäre Legekurve (Annahme: 5 s)
- t_T = Transferzeit zum Formwerkzeug

10.16 Abschätzung des Wiederbeschaffungswertes

	V1: Manuelle Mehrprodukt- Fertigung	V2: Flexible Mehrprodukt- Fertigung mit variabler Bereitstellung	V3: Mehrprodukt- Fließfertigung	V4: Einprodukt- Fließfertigung	V5: Manuelle Einprodukt Fertigung
Hardware					
Roboter inkl. Steuerung		110.000,00 €	110.000,00 €	110.000,00 €	
Montagewerkzeug		200.000,00 €	200.000,00 €	200.000,00 €	
Bereitstellung der Zuschnitte	5.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	5.000,00 €
Bereitstellung der FWZ	3.000,00 €		10.000,00 €	10.000,00 €	
Aufspannung der FWZ	150.000,00 €	3.000,00 €	15.000,00 €	15.000,00 €	1.000,00 €
Laserprojektionssystem					150.000,00 €
PC (Einlernvorgang, Auftragsplanung)			4.000,00 €	4.000,00 €	
Hardwarekosten	158.000,00 €	347.000,00 €	369.000,00 €	369.000,00 €	156.000,00 €
Aufschlag Aufbau (20%)	31.600,00 €	69.400,00 €	73.800,00 €	73.800,00 €	31.200,00 €
Aufschlag IBN (5%)	7.900,00 €	17.350,00 €	18.450,00 €	18.450,00 €	7.800,00 €
Schulungen	16.000,00 €	8.000,00 €	12.000,00 €	12.000,00 €	16.000,00 €
Beschaffungskosten gesamt	213.500,00 €	441.750,00 €	473.250,00 €	473.250,00 €	211.000,00 €

Tabelle 21: Abschätzung der Wiederbeschaffungswertes der Realisierungsalternativen

11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2008 bis 2011 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur automatisierten Montage von Faserverbund-Vorformlingen untersucht wurden. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

Studierende(r)	Studienarbeit
Brucker, B.	Aufbau einer Versuchsumgebung und Untersuchungen zur Regelbarkeit eines Unterdruckerzeugers für das automatisierte Drapieren von trockenen CF-Textilien (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im September 2010)
Casper, L.	Ansteuerungsoptimierung und Bewertung eines roboterbasierten Montagewerkzeuges zum automatisierten Drapieren von trockenen CF-Textilien (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2011)
Felch, F.	Entwicklung und Realisierung von Funktionsmustern für das Absortier- und Legewerkzeug in der automatisierten Fertigung von Faserverbundbauteilen aus trockenen Kohlenstofffasersystemen (Diplomarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Juni 2009)
Glück, A.	Ansteuerungsentwicklung zum automatisierten Drapieren von CF-Textilien (Masterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im April 2011)
Hackinger, J.	Entwicklung und prototypische Umsetzung der Ansteuerung eines Handhabungs- und Legewerkzeuges für die automatisierte Fertigung von Kohlenstofffaserverbundstrukturen (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im März 2009)
Hess, M.	Technische und wirtschaftliche Bewertung eines roboterbasierten Werkzeuges zur automatisierten Montage von Faserverbundpreforms (Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2011)

11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Hopfauf, H.	Entwicklung und prototypische Umsetzung der Ansteuerung eines Legewerkzeuges für die automatisierte Fertigung von Kohlenstofffaserverbundstrukturen (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im November 2009)
Joas, F.	Implementierung einer Temperatur- und Vakuumregelung in ein roboterbasiertes Werkzeug (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2011)
Kunert, C.	Ansteuerungsentwicklung zur experimentellen Validierung eines Legewerkzeuges an Referenzbauteilen (Diplomarbeit, Hochschule Kempten, abgegeben im Oktober 2010)
Lorenz, R.	Simulative Analyse eines roboterbasierten Legewerkzeuges sowie Konstruktion einer Vorrichtung zur Positionierung der Referenzbauteile (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im September 2010)
Menhart, D.	Konzeption und Entwicklung eines Roboterwerkzeugs für das automatisierte Einlegen von Kohlenstofffasertextilien in Formwerkzeuge (Diplomarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Juli 2009)
Meßmer, M.	Bahnplanung und Ansteuerung eines roboterbasierten Endeffektors zum automatisierten Legen von trockenen CF-Textilien (Diplomarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Mai 2010)
Nistor, P.	Klassifizierung von Bauteilen und Entwicklung von Legestrategien und Werkzeugkonzepten (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im September 2010)
Ross, S.	Strömungssimulation und Vakuumauslegung eines unterdruckbasierten Greifsystems (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im März 2010)
Sailer, B.	Vorgehen zur Auslegung eines Montagewerkzeuges zum automatisierten Drapieren von CF-Textilien (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im März 2011)
Schmidt, C.	Experimentelle Validierung und Optimierung eines roboterbasierten Montagewerkzeugs zur automatisierten Herstellung von CFK-Bauteilen (Diplomarbeit, Hochschule Amberg-Weiden, abgegeben im März 2011)

11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Schwegler, F.	Aufbau einer Temperaturregelung zum Beheizen von CF-Textilien (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2010)
Schweinberg, R.	Aufbau einer Temperaturregelung zum Beheizen von CF-Textilien (Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im November 2010)
Seitz, P.	Inbetriebnahme und Optimierung eines roboterbasierten Legewerkzeuges zum automatisierten Drapieren von trockenen CF-Textilien (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im Oktober 2010)
Skibbe, M.	Ansteuerungsentwicklung zur experimentellen Validierung eines Montagewerkzeuges an Referenzbauteilen (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im November 2010)
Weiß, M.	Experimentelle Validierung und Optimierung eines flexiblen, roboterbasierten Legewerkzeugs für trockene CF-Textilien (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2010)
Zacherle, B.	Simulation des Absortier- und Drapiervorgangs von CF-Zuschnitten mit KUKA-Sim (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im August 2010)

Desweiteren waren u. a. folgende Studierende unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin als studentische Hilfskräfte tätig:

S. Barm, L. Casper, F. Renger, V. Martel, M. Kohler, T. Bauer, P. Seitz, J. Hackinger, H. Hopfauf, M. Horsche, S. Markgraf, S. Hornig

Die Autorin dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.