

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen
Handhabung textiler Halbzeuge**

Johannes Graf

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Prof. h.c. (Moscow State Univ.)
Dr.-Ing. Thomas Gries

Die Dissertation wurde am 29.06.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 04.12.2017 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg.

Mein besonderer Dank gilt dem geschäftsführenden Leiter der Fraunhofer-Einrichtung und Institutsleiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München, Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Förderung sowie großzügige Unterstützung bei der Umsetzung der Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich weitergehend sehr herzlich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie die sehr gute Zusammenarbeit während der Vorlesungsbetreuung am *iwb*.

Bei Herrn Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries, dem Leiter des Lehrstuhls für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie ausdrücklich bei allen Studierenden der Fraunhofer-Einrichtung und des *iwb*, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Herrn M.Sc. Albrecht Lottermoser, Herrn M.Sc. Lucas Kiefer sowie Herrn Dipl.-Ing. Simon Berger für die enge, konstruktive Zusammenarbeit und die fruchtbaren Diskussionen. Herrn Dr.-Ing. Yi Shen, Frau Professor Dr.-Ing. Claudia Ehinger sowie Herrn Dipl.-Ing. Matthias Amberger danke ich für die Durchsicht und die konstruktiven Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Mein spezieller Dank gilt dem Leiter der mechanischen Werkstatt am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Herrn Kurt Hartmann, für die unermüdliche Unterstützung und seinen großen persönlichen Einsatz bei der Realisierung der Versuchsaufbauten.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie für die Förderung meiner Ausbildung sowie für die immerwährende Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertationschrift. Meinem engen persönlichen Umfeld danke ich für die Aufmunterung, die Geduld und das Verständnis, mit dem ich stets bei der Erstellung der Arbeit begleitet wurde.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	V
Verzeichnis der Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Entwicklungen in der Produktionstechnik	1
1.2 Grundlagen und Einteilung der Faserverbundtechnologie . . .	4
1.2.1 Aufbau und Eigenschaften von Faserverbundbauteilen .	5
1.2.2 Überblick über bestehende Fertigungsverfahren	9
1.2.3 Defizite der heutigen Fertigungstechnologien	13
1.3 Handlungsfelder und abgeleitete Zielsetzung	15
1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit	16
2 Stand der Technik und Wissenschaft	19
2.1 Einteilung und Definitionen	19
2.2 Automatisierung technischer Teilsysteme am Beispiel eines Handhabungsvorgangs	20
2.2.1 Prozessbeschreibung und Festlegung der Systemgrenzen	23
2.2.2 Wirkprinzipien zur Handhabung von Textilien	24
2.2.3 Systeme zur Handhabung formlabiler Textilien	25
2.3 Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung	28
2.3.1 Begriffsdefinition und Einordnung	28
2.3.2 Ansätze und Möglichkeiten der Qualitätssicherung . . .	30
2.3.3 Sensorsysteme für die Bauteilprüfung	33
2.3.4 Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung	34
2.3.5 Ansätze zur Qualitätssicherung bei der Handhabung textiler Halbzeuge	42
2.4 Methoden zur Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung	45

2.5	Zusammenfassung und Detaillierung der Zielsetzung	46
2.5.1	Diskussion der vorgestellten Ansätze und Lösungen zur qualitätskonformen Handhabung	46
2.5.2	Detaillierung der Zielsetzung	47
3	Methodik zur qualitätskonformen Handhabung	
	textiler Halbzeuge	49
3.1	Anforderungen an die Vorgehensweise und Definition des Gültigkeitsbereichs	49
3.2	Methodisches Vorgehen zur qualitätskonformen Handhabung .	51
3.2.1	Einteilung und Auswahl verschiedener Vorgehensmodelle	51
3.2.2	Einführung der Methodik	53
3.2.3	Überblick über die einzelnen Schritte der Methodik . . .	54
3.3	Detaillierte Beschreibung und Anwendung der Methodik	62
3.3.1	Beschreibung des Handhabungsszenarios	62
3.3.2	Aufnahme und Detaillierung der relevanten Prozessgrößen	64
3.3.3	Identifikation von Fehlern und Schwachstellen im Prozess	68
3.3.4	Erarbeitung sensorbasierter Teillösungen	71
3.3.5	Gesamtkonzept mit gewählter Sensorik und geeigneter Prozessintegration	77
3.4	Zusammenfassung	88
4	Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage	89
4.1	Definition einer Vorgehensweise zur Umsetzung des Handhabungsszenarios	89
4.2	Beschreibung des Referenzszenarios	91
4.2.1	Hinterradschwinge als Anwendungsszenario	91
4.2.2	Auswahl und Detaillierung der Prozesskette für das Referenzbauteil	92
4.2.3	Fertigungsspezifikation der Schwinge	93
4.3	Anforderungen an die Integration und Umsetzung des Systems	94
4.4	Konzeption der Versuchsanlage	96
4.4.1	Allgemeiner Systementwurf	96
4.4.2	Domänenspezifischer Systementwurf	100
4.4.3	Systemintegration	118
4.5	Umsetzung und Realisierung der Versuchsanlage	119

4.6 Zusammenfassung	120
5 Technische Validierung des Handhabungssystems	121
5.1 Zielsetzung der Validierung und Definition der Vorgehensweise	121
5.2 Untersuchung der Einflussgrößen und Ableitung des Validierungsansatzes	124
5.3 Analyse der Zuverlässigkeit des Handhabungsprozesses	126
5.4 Untersuchung der Ablagequalität	130
5.4.1 Güte des Messsystems	133
5.4.2 Einflussgrößen im Hinblick auf die Prozesszeit	136
5.4.3 Erzielbare Qualität des textilen Halbzeugs nach Durchführung des Handhabungsvorgangs	140
5.5 Übergeordnete Prozessbewertung	146
5.6 Zusammenfassung	149
6 Wirtschaftliche Bewertung	151
6.1 Szenariodefinition	152
6.2 Wirtschaftliche Bewertung des Handhabungssystems	153
6.2.1 Auswahl eines geeigneten Bewertungsverfahrens	153
6.2.2 Rahmenbedingungen und Bewertungskriterien	155
6.2.3 Durchführung der Bewertung	156
6.3 Fazit	159
7 Schlussbetrachtung	161
7.1 Zusammenfassung	161
7.2 Ausblick	163
Literatur	165
Anhang	201

Abkürzungsverzeichnis

AI	Analog Input
AO	Analog Output
AD	Ansaugdruck
ATL	Automated Tape Laying
BD	bidirektional
BM	Betriebsmodus
BMW	Bayerische Motoren Werke
bspw.	beispielsweise
BV	Bildverarbeitung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAT	Control Automation Technology
CCD	Charge Coupled Device
CF	Carbonfaser
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNC	Computational Numerical Control
CNOMO	Comité de Normalisation des Moyens de production
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit
DI	Digital Input
DIN	Deutsche Industrienorm, Deutsches Institut für Normung e. V.
DO	Digital Output
dxf	Drawing Interchange File
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
dt.	deutsch
d. h.	das heißt
FVW	Faserverbundwerkstoff
ggf.	gegebenenfalls

Abkürzungsverzeichnis

GigE	Gigabit-Ethernet
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HHS	Handhabungssystem
HM	Hubmagnet
HMI	Human Machine Interface
IDE	Integrated Development Environment
IEC	International Electrotechnical Commission
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
IWU	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
KR	Kuka Robot
KRC	Kuka Robot Controller
LIN	lineare Roboterbewegung
MA	Mitarbeiter
MAG	Multiaxialgelege
MAI	München Augsburg Ingolstadt
MD	multidirektional
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
MTBF	Mean Time between Failure
MTTR	Mean Time to Repair
NC	Numerical Control
ND	Niederdruck
NDT	Nondestructive Testing
OSG	obere Spezifikationsgrenze
PEP	Produktentstehungsprozess
PF	Prozessformulierung, Phenol-formaldehyd
PROFINET	Process Field Network
PTC	Positive Temperature Coefficient
PTP	Point to Point
RTM	Resin Transfer Moulding
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SK	Sensorklasse
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TB	Toleranzbereich
TCP	Transmission Control Protocol
TCP	Tool Center Point
TRTM	Thermoplastic Resin Transfer Molding
u. a.	unter anderem
UD	unidirektional

UF	Harnstoff, engl. Urea-formaldehyd
UP	ungesättigter Polyester
USG	untere Spezifikationsgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WF	Wirkfläche
WP	Wirkprinzip
WWS	Werkzeugwechselsystem
XAE	eXtended Automation Engineering
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung
3D	dreidimensional

Verzeichnis der Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung am TCP
$a_{max,x}$	m/s^2	maximale Beschleunigung in x-Richtung
A_{An}	mm^2	Fläche der Anströmung
A_{Kap}	mm^2	Wirkfläche des kapazitiven Sensors
A_{ref}	m^2	Referenzfläche
A_{Saug}	mm^2	Fläche des Saugers
b	m	Länge des Hebelarms
b	mm	Breite der Wirkfläche der Kamera
B	mm	Breite des Sensors
B_i	mm	Bildwandlergröße
c	mm	Kantenlänge des Textils
c_p	–	Prozesspotenzial
c_{pK}	–	Prozessfähigkeit
c_W	–	Luftwiderstand
C	F	Kapazität des Sensors
d_i	–	Versuchseinheiten zum Zeitpunkt i
d_{Kap}	mm	Durchmesser des Wirkbereichs des Sensors
f	mm	Brennweite
$F_{A,z}$	N	Beschleunigungskraft in z-Richtung
$F_{A,x}$	N	Beschleunigungskraft in x-Richtung
F_G	N	Gewichtskraft
F_L	N	Anströmkraft
F_R	N	Haftreibungskraft
F_S	N	Ansaugkraft
g	mm	Gegenstandsweite
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
G	kg	Gewicht des Greifers
G_i	mm	Bildgröße
H	mm	Höhe des Sensors
I	$kg\ m^2$	maximales Massenträgheitsmoment
k	–	Klassenzahl einer Normalverteilung
l	mm	Kantenlänge einer Saugfläche

Verzeichnis der Formelzeichen

l_{Kf}	<i>mm</i>	Länge einer Kurzfaser
l_{Lf}	<i>mm</i>	Länge einer Langfaser
l_{Ef}	<i>mm</i>	Länge einer Endlosfaser
L	<i>mm</i>	Länge des Sensors
L	–	untere Spezifikationsgrenze (USG)
n	–	Anzahl der auftretenden Aktionen
n	–	Position in der Normalverteilung
n	–	Stichprobenumfang
m_{Textil}	<i>kg</i>	Masse des Textils
$M_{\text{Fertigung}}$	<i>€</i>	Fertigungskosten einer Preform
M_i	<i>Nm</i>	Belastungsmoment
$M_{R,max}$	<i>Nm</i>	maximales Drehmoment am Roboter (Achse 1)
$MTBF$	<i>s</i>	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen
$MTRR$	<i>s</i>	mittlere Reparaturzeit
n_i	–	ausgefallene Einheiten zum Zeitpunkt i
N_T	–	technischer Nutzungsgrad
p_{min}	<i>mm</i>	translatorische Auflösung des Kamerasystems
q_i	–	Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt i
$R(t)_i$	–	Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt i
$SW_{n;1-\alpha}$	–	kritischer Schwellwert nach Shapiro-Wilk
t	–	Anzahl der Wiederholungen ohne Zwischenfall
t	<i>mm</i>	Wanddicke
$t_{\text{Amortisation}}$	<i>a</i>	Amortisationsdauer
t_{Korr}	<i>s</i>	Prüf- und Korrekturzeit des Handhabungsvorgangs
T	<i>mm</i>	Toleranz
T_T	<i>s</i>	technische Ausfallzeit
T_B	<i>s</i>	gesamte Belegungszeit
TBF	<i>s</i>	Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen
TTR	<i>s</i>	Reparaturzeit zwischen zwei Ausfällen
U	–	obere Spezifikationsgrenze (OSG)
v	<i>mm/s</i>	Verfahrgeschwindigkeit am TCP
v_{max}	<i>m/s</i>	Maximale Geschwindigkeit am TCP
v_{Prozess}	<i>m/s</i>	Geschwindigkeit während des Handhabungsvorgangs
V_T	–	technische Verfügbarkeit
W	–	Prüfgröße zum Nachweis der Normalverteilung
\bar{x}	–	Erwartungswert
\hat{X}_i	–	Quantil an der Stelle i
x_i	–	Messgröße einer Stichprobe
α	–	Irrtumswahrscheinlichkeit

α	rad/s^2	Winkelbeschleunigung am TCP
α_k	—	Koeffizienten des Shapiro-Wilk-Tests
β	$^\circ$	Anströmwinkel
γ_{min}	$^\circ$	rotatorische Auflösung des Kamerasystems
Δ	—	Prozessstreuung
Δp_S	N/mm^2	Differenzdruck zum Ansaugen
Δx	mm	Positionsabweichung in x-Richtung
ΔX	mm	Verschiebung bei der Aufnahme in x-Richtung
Δy	mm	Positionsabweichung in y-Richtung
ΔY	mm	Verschiebung bei der Aufnahme in y-Richtung
$\Delta\phi$	$^\circ$	rotatorische Positionsabweichung
$\Delta\Phi$	$^\circ$	rotatorische Verschiebung bei der Aufnahme
ϵ_0	As/Vm	elektrische Feldkonstante
ϵ_r	—	relative Permittivität
μ	$mm, ^\circ$	Erwartungswert
μ_{HR}	—	Haftreibungskoeffizient
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit am TCP
ρ	g/mm^3	Dichte der Luft (Normbedingungen)
σ	$mm, ^\circ$	Standardabweichung

1 Einleitung

1.1 Aktuelle Entwicklungen in der Produktionstechnik

Die Produktionstechnik steht in der heutigen Zeit vielfältigen Herausforderungen und Aufgaben gegenüber. Ausgehend von einer stark wachsenden Weltbevölkerung sowie einer kontinuierlich stärker werdenden Verflechtung der globalen Wirtschaftsbeziehungen ergeben sich Chancen und Risiken auch für die Forschungsarbeiten in Deutschland (ABELE & REINHART 2011). Ein Beispiel hierfür liefert der Megatrend Mobilität, der aktuell einen tiefgreifenden Wandel in der Produktionstechnik bewirkt (BRECHER 2012). Durch neue Märkte, vorwiegend in Asien und auf dem amerikanischen Kontinent, ergeben sich Chancen durch neue Absatzmöglichkeiten, jedoch stehen ihnen die Risiken eines größeren Wettbewerbsdrucks und einer steigenden Konkurrenz durch alternative Angebote gegenüber. Verstärkt werden diese Effekte durch partiell stark fluktuierende Aufwände für Ressourcen, den weiteren Ausbau der Elektromobilität (vgl. ECKSTEIN ET AL. (2014)) sowie durch strengere politische Rahmenbedingungen und Regularien, die sich aus gesetzlich festgelegten Grenzwerten ergeben (BRAESS ET AL. 2013).

Es werden Lösungen und Strategien entwickelt, um diesen Trends begegnen zu können. Einen Ansatz bietet die konsequente Entwicklung wirtschaftlicher Leichtbautechnologien (FRIEDRICH 2013). Beispielhaft kann der Einsatz eines hochfesten Faserverbundwerkstoffs (FVW) aufgrund seiner strukturellen Vorteile einen wesentlichen Beitrag zur Einhaltung der gesetzlichen Forderungen zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes liefern (HUBER ET AL. 2009). Durch die technologische Qualifizierung und Weiterentwicklung der industriellen Fertigung, speziell von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK), lassen sich neue Potenziale bei der Gestaltung und im Betrieb technischer Systeme in unterschiedlichen Branchen, wie der Luft- und Raumfahrtindustrie und der Automobilindustrie, erkennen und umsetzen (LEOHOLD 2011).

HERRMANN (2011) beziffert die Kerosineinsparung eines konventionellen Flugzeugs auf 3 Tonnen pro 1 Kilogramm eingesparter Masse über die gesamte Betriebszeit. Bezogen auf die Automobilindustrie ergibt sich durch eine Massenreduktion von 100 Kilogramm eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 0,5 Liter pro

1 Einleitung

100 Kilometer. Speziell im Nutzfahrzeugbereich lässt sich durch Ausnutzung des Leichtbaupotenzials bei konstantem zulässigen Gesamtgewicht die Nutzlast erhöhen und damit ein wirtschaftlicher Vorteil erzielen (SIEBENPFEIFFER 2014). In der Windindustrie ermöglicht der Einsatz von CFK eine Massenreduktion von 50 % beim Auslegen der Flügel, womit sich wesentliche strukturelle Vorteile für das Gesamtsystem ergeben (DRECHSLER 2010). Infolge der positiven Leichtbaueigenschaften und der daraus resultierenden steigenden Nachfrage findet durch den zunehmenden Einsatz von CFK-Bauteilen ein starkes Wachstum in der CFK-Nachfrage statt, wie in Abbildung 1.1 am Beispiel des globalen Bedarfs an Kohlenstofffasern verdeutlicht wird.

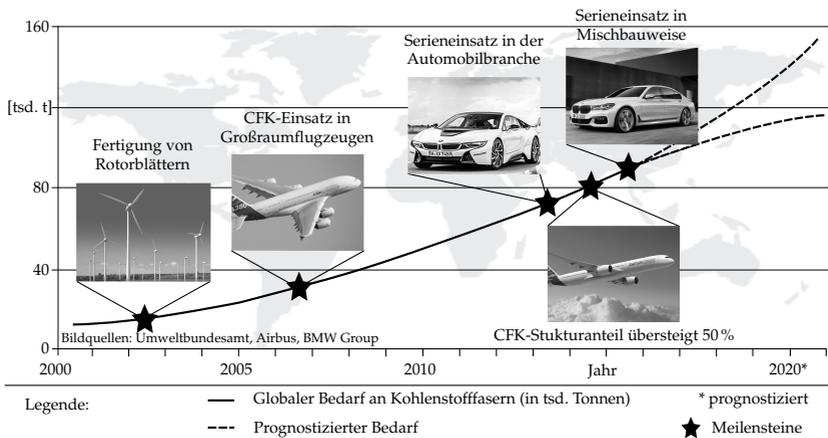


Abbildung 1.1: Entwicklung des CFK-Verbrauchs anhand der verarbeiteten Verstärkungsfasern (ACMITE 2016; ERATH 2008; KOLL 2006; KRAUSS ET AL. 2015; NEITZEL ET AL. 2014)

Daraus prognostizieren LÄSSIG ET AL. (2012) für hochfeste Faserverbundbauteile ein jährliches Wachstum von 17 % bis zum Jahr 2020. HEUSS ET AL. (2012) erwarten vor allem in der Automobilindustrie in den nächsten Jahren ein starkes Wachstum, sodass im Jahre 2030 bei gleichbleibenden Zuwachszahlen 70 % des gesamten CFK-Marktes durch Automobilanwendungen bedient werden könnten. Als Folge der positiven Entwicklung in der Faserverbundindustrie weist auch der gesamte Kunststoffmarkt ein überproportionales Wachstum von jährlich 10 % auf (WITTEN 2013). PASSREITER (2013) detailliert die Stufen der Einführung in der Automobilindustrie und unterscheidet, ausgehend von vorgestellten Technologiekonzepten (eingesetzt von der BMW Group, Modellreihe

Z8, Jahr 2000), die Industrialisierung (BMW M3, 2007) und die Serienproduktion (BMW, Megacity Vehicles i3, 2013) (KRAUSS ET AL. 2015; NEDELJKOVIC 2014; REUTER 2014; WÜLLNER 2013). Neben der Automobilindustrie bescheinigt PETERMANN (2013) auch der Luftfahrtindustrie, die ein jährliches Wachstum von 5 % aufweist, einen wesentlichen Anteil an der steigenden globalen Nachfrage. Dies lässt sich am prognostizierten Bedarf von 24 000 neuen Flugzeugen für den Zeitraum von 2010 bis 2026 verdeutlichen (BEAUMONT 2010). Aus diesen Anwendungen lässt sich eine hohe Relevanz für Faserverbundanwendungen ableiten.

Jedoch stehen den strukturellen und mechanischen Vorteilen hohe Kosten für die Gewinnung des Werkstoffs sowie für die Fertigung der Bauteile gegenüber, die eine weitere schnelle Verbreitung und vollständige Marktdurchdringung hemmen (LÄSSIG ET AL. 2012). Am Beispiel eines flächigen CFK-Bauteils mit der Referenzfläche $A_{ref} = 0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$, das mit einem standardmäßig eingesetzten Fertigungsverfahren für VW hergestellt wird, wird die Kostenstruktur mit einem in den Abmessungen gleichartigen Bauteil aus Stahl und Aluminium verglichen (vgl. Abbildung 1.2).

Im Vergleich zu den konventionell eingesetzten Materialien Stahl und Aluminium sind die Kosten für ein durch CFK substituiertes Bauteil um den Faktor 2,5 bis 4 höher. Die gesamten Fertigungskosten entlang der Wertschöpfungskette weisen dabei einen Anteil von 64 % der Gesamtkosten auf.

Somit stellt vor allem die Verringerung der Fertigungskosten einen bedeutenden Stellhebel für eine signifikante Kostenreduktion von CFK-Bauteilen dar (FEHER ET AL. 2006). Aufgrund der hohen Kosten wird der Materialmix, das heißt die kombinierte Verwendung verschiedener Materialien wie Stahl, Aluminium oder Magnesium, branchenübergreifend als der Schlüssel für die zukünftige Fertigung gesehen (BEAUMONT 2010; PETERMANN 2013).

DURST (2011) fasst diesen Ansatz zusammen, den passenden Werkstoff am geeigneten Ort in der richtigen Menge einzusetzen. Diesem Trend folgend wird in der Automobilindustrie erstmals in der Oberklasse für größere Stückzahlen eine Karosserie in Mischbauweise gefertigt, bei der durch CFK-Strukturbauteile eine erhebliche Gewichtsersparnis zu erzielen ist (vgl. Abbildung 1.1) (GUTBROD ET AL. 2015). Obwohl die strukturellen Vorteile und die materialbedingten Leichtbaupotenziale bekannt sind, geht der Trend bei der Werkstoffauswahl für große Serienanwendungen in verschiedenen Industriebereichen noch immer hin zu konventionellen Stahl- und Aluminiumbauweisen. Als Gründe sind hier unzureichende Industrialisierungskonzepte sowie fehlendes Know-how in der Fertigung anzuführen (FRIEDRICH 2013). Hieraus lässt sich ableiten, dass der

1 Einleitung

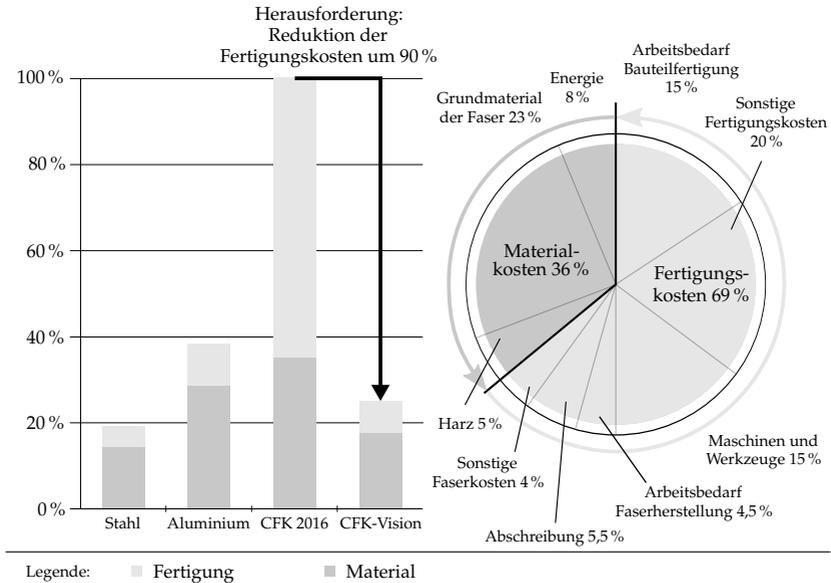


Abbildung 1.2: Kostenstruktur eines CFK-Bauteils im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen (in Anlehnung an TIMM (2010) und LÄSSIG ET AL. (2012))

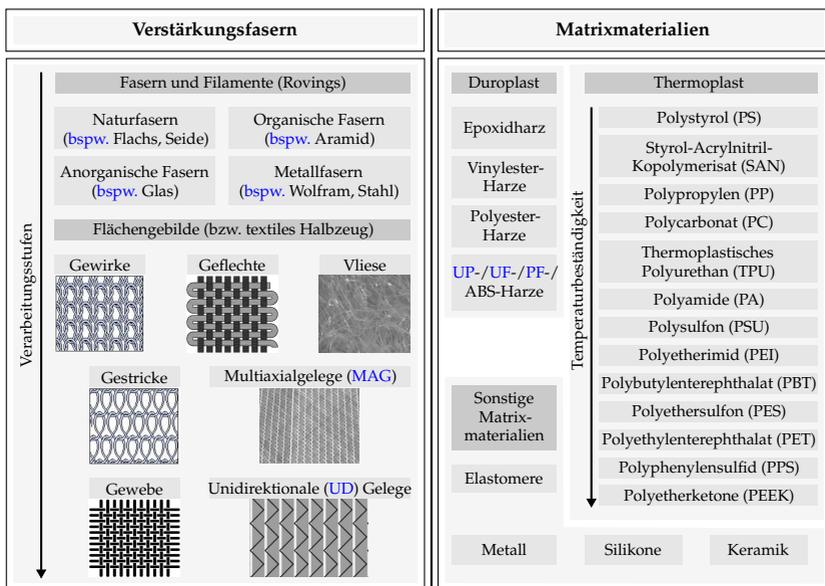
wirtschaftliche Einsatz von FVW trotz der Einsparpotenziale erst nach einer nachhaltigen Kostensenkung einen breiten Anwendungsbereich finden kann (HEUSS ET AL. 2012). TIMM (2010) formuliert als notwendigen Befähiger für ihre entscheidende Verbreitung eine Kostenreduktion von 90 % im Vergleich zum Jahr 2010.

1.2 Grundlagen und Einteilung der Faserverbundtechnologie

Zur Identifikation der Kostentreiber in der Fertigung werden nachfolgend die für die weitere Arbeit benötigten Grundlagen der Fertigung und Einteilung der FVW vermittelt. Ausgehend vom Aufbau und von den Eigenschaften werden die wesentlichen industriellen Fertigungsverfahren beschrieben, woraus schließlich die Ursachen für die hohen Fertigungskosten sowie mögliche Potenziale zur Kostenreduktion erarbeitet werden.

1.2.1 Aufbau und Eigenschaften von Faserverbundbauteilen

FVV setzen sich entsprechend ihrer Verbundbauweise aus einer Faserstruktur zusammen, die von einer Matrix umgeben ist (VDI 1989). Durch den kombinierten Einsatz beider Komponenten werden die Vorzüge der jeweiligen Materialien ausgenutzt (KOLL 2006). Die Verstärkungsfasern übernehmen die Aufnahme und Übertragung der am Bauteil und an den Lasteinleitungsstellen anliegenden Belastungen (Kräfte und Momente), wodurch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte ermöglicht wird (SCHÜRMANN 2007). Dagegen sorgt die Matrix als der die Fasern umgebende und schützende Werkstoff vor allem für die Einhaltung der geometrischen Anordnung der Fasern sowie für die Lastaufnahme bei Belastungen quer zur Faserrichtung (SCHÜRMANN 2007). Abbildung 1.3 gibt einen Überblick über die Unterscheidung der Komponenten.



Bildquellen: TU Berlin, Fraunhofer IGCV

Abbildung 1.3: Zusammensetzung eines **FVV** (in Anlehnung an SCHÜRMANN (2007), NEITZEL ET AL. (2014), GRIES & SCHOUTEN (2006) und SCHMITT, GRIES ET AL. (2008))

1 Einleitung

Gemäß der Verbundstruktur können für beide Werkstoffkomponenten unterschiedliche Materialien eingesetzt werden. Aufseiten der Matrix dominieren polymere Werkstoffe mit einem Anteil von 64 % am gesamten Umsatz der Matrixwerkstoffe. Die sich daraus ergebenden Verbundbauteile lassen sich weiter in thermoplastische (Anteil 24 %) und duroplastische Werkstoffe (Anteil 76 %) unterteilen (KRAUSS ET AL. 2015).

Während duroplastische Kunststoffe nach der Aushärtung nicht mehr verformt werden können, lassen sich thermoplastische Materialien reversibel in einem definierten Temperaturbereich aufschmelzen und verformen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Eigenschaften besitzt die Entscheidung über das gewählte Matrixmaterial einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften sowie auf die verwendete Prozessroute (BONNET 2008; DRECHSLER 2010; PETERS 1998; WITTEN 2013).

Speziell für Serienanwendungen bietet die thermoplastische Matrix ein hohes Potenzial zur Reduktion der Aushärtezeiten, da für die zu erreichende Formstabilität nur eine schnelle Abkühlung gewährleistet werden muss. Jedoch weisen thermoplastische Materialien in Faserverbundanwendungen derzeit eine geringere Verbreitung in der industriellen Anwendung auf, weshalb die Verarbeitung duroplastischer Materialien einen technologischen Vorsprung hat. Jedoch wird aufgrund der aufgezeigten Potenziale durch die kürzere Prozesszeit ein starkes Wachstum für Thermoplaste erwartet (KRAUSS ET AL. 2015).

Die Grundstruktur der Verstärkungsfasern, die sich aus einzelnen Rovings und Filamenten zusammensetzen, kann aus unterschiedlichen Materialien gebildet werden. Außerdem können die Fasern auf verschiedene Arten eingesetzt werden. Als Verstärkungsfasern werden neben anorganischen Fasern (bspw. Glas oder Carbon) auch Natur- und Metallfasern sowie organische Materialien eingesetzt. Die höchste Verbreitung an verarbeiteten Fasern stellen aktuell die Glasfasern mit einem Anteil von ca. 90 % dar (WITTEN 2013). Die Länge l der eingesetzten Fasern beeinflusst dabei maßgeblich die Verstärkungswirkung. Die Fasern lassen sich wie folgt einteilen (SCHÜRMANN 2007).

- Kurzfaser: $0,1 \text{ mm} \leq l_{Kf} \leq 1 \text{ mm}$
- Langfaser: $1 \text{ mm} \leq l_{Lf} \leq 50 \text{ mm}$
- Endlosfaser: $50 \text{ mm} \leq l_{Ef} \leq \infty$

Endlosfasern weisen die höchsten Festigkeiten auf, da eine unidirektionale, lastorientierte und anisotrope Ausrichtung in Belastungsrichtung die günstigste Lastaufnahme ermöglicht. Hiermit lässt sich auch das höchste Leichtbaupotenzial erzielen. Anforderungsabhängig erfolgt die Konstruktion von FVW entweder lebensdauertolerant oder schadenstolerant (VDI 1993B). Endlosfasern bilden

das Grundmaterial für die weitere Verarbeitung, wodurch eine flächige formlabile Anordnung der Fasern geschaffen wird. Diese Struktur wird als textiles Halbzeug bezeichnet. Als Halbzeuge werden alle Materialien in unterschiedlichen Zuständen benannt, die entlang der Prozesskette verarbeitet werden. In einem textilen Halbzeug können sowohl die relative Faserorientierung der Lagen (bspw. als unidirektionale Struktur) als auch die Anordnung der Fasern zueinander (bspw. als Geflecht) variiert werden. Je nach Anwendungsfall und Auslegung lassen sich hiermit Bauteile mit doppelter Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung von bis zu 80 % gegenüber Stahl und bis zu 50 % im Vergleich zu Aluminium umsetzen (NEITZEL ET AL. 2014). Mit dem Einsatz von Kurzfasern und Langfasern können die Fasern längenbedingt nicht entlang einer Belastungsrichtung verlaufen, woraus ungünstigere Werkstoffeigenschaften gegenüber der Gruppe der endlosfaserverstärkten Kunststoffe resultieren (KOLL 2006; NEITZEL ET AL. 2014). Die Faserorientierung besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit (AHRENS ET AL. 1998). Hierzu stellt Abbildung 1.4 in zwei Darstellungen die relative Festigkeit der Verstärkungsfasern in Abhängigkeit der Faserorientierung dar.

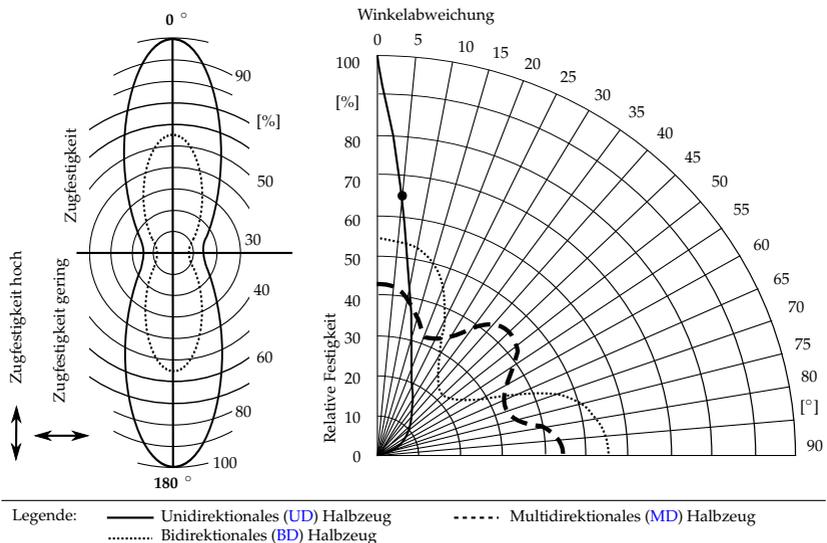


Abbildung 1.4: Einfluss der Faserorientierung auf die relative Festigkeit (in Anlehnung an CHERIF (2011) und SCHEITLE (2008))

1 Einleitung

Unidirektionale (UD) Halbzeuge weisen durch ihre Anisotropie die höchste Abhängigkeit von der Faserorientierung auf. Beispielsweise reduziert eine Faserwinkelabweichung von 5° von der Soll-Position die relative Festigkeit um 35%. Bei bidirektionalen (BD) und multidirektionalen (MD) Halbzeugen schwächt sich der Einfluss aufgrund der relativen Faserorientierung zueinander ab, jedoch ist die Festigkeit in einer Faserrichtung auf maximal 55% limitiert, womit das Potenzial der Faser nicht vollständig ausgeschöpft wird (SCHEITLE 2008). Neben der Fokussierung auf die Umsetzung von Leichtbaulösungen bieten FVW auch für weiterführende Anforderungen eine geeignete Lösung (NEITZEL ET AL. 2014). Durch die Kombination einer Keramikmatrix mit Glasfasern lassen sich bspw. nicht brennbare Verbundwerkstoffe gestalten (RAUENBUSCH 2013). Außerdem öffnen naturfaserverstärkte Kunststoffe neuartige Einsatzgebiete in der Automobil- und Bauindustrie (WITTEN 2013; WÜLLNER 2013). Somit leiten sich aus dem Einsatz von FVW zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Materialien ab, die bei entsprechender Werkstoffgestaltung erzielt werden können und nachfolgend zusammengefasst werden (BIERMANN ET AL. 2008; FLEMMING ET AL. 1999; VDI 1989; WITTEN 2013):

- Einstellung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften in einem weiten Belastungsbereich
 - Günstige thermische, elektromagnetische, tribologische und vibroakustische Eigenschaften
 - Hohe Crashresistenz bei gleichzeitig vorteilhaften Dämpfungs- und Schwingungseigenschaften
 - Anpassbare Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit
- Kombinationsfähigkeit verschiedener Grundwerkstoffe und Faserarchitekturen
- Anforderungsgerechtes Werkstoffdesign mit richtungsbezogenen (anisotropen) Materialeigenschaften, funktionsintegrierten Bauweisen und hoher Design- und Gestaltungsfreiheit
- Umsetzung der Bauteile durch eine Vielzahl flexibler Fertigungsprozesse

1.2.2 Überblick über bestehende Fertigungsverfahren

Die Herstellung von Faserverbundbauteilen lässt sich über eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsverfahren realisieren. Aufgrund der Verbundbauweise ist im Gegensatz zu anderen Werkstoffen, die aus einer homogenen Werkstoffstruktur aufgebaut sind, keine eindeutige Klassifizierung entsprechend der Deutschen Industrienorm [DIN 8580](#) möglich (DIN 2003D). Außerdem besteht bei [FVW](#) eine starke Abhängigkeit zwischen dem gewählten Verfahren, der geforderten Stückzahl sowie der Konstruktionsart, weshalb in der industriellen Praxis die Bauteilkonstruktion mit einem passenden Fertigungsverfahren kombiniert wird (SCHÜRMAN 2007). Aus den genannten Gründen existieren verschiedene Kriterien, anhand derer die industriell gebräuchlichsten Verfahren beschrieben werden können. Diese werden nachfolgend aufgeführt:

- *Länge der Verstärkungsfaser*

Die Fertigungsverfahren von kurzfaserverstärkten Verbänden unterscheiden sich grundlegend von denen der Endlosfaserstrukturen. Die wichtigsten Verfahren stellen das Faserspritzverfahren und die allgemeine Spritzgießtechnik dar (NEITZEL ET AL. 2014). Eine Kombination von Kurz- und Endlosfasern ist bei Verwendung einer thermoplastischen Matrix möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verarbeitung von Endlosfaserstrukturen fokussiert, daher werden die Kurz- und Langfaserverfahren nicht betrachtet.

- *Anwendungsbereich und Automatisierungsgrad*

Die Verfahren besitzen unterschiedliche Potenziale bezüglich der Automatisierbarkeit. Während für Serienanwendungen mit jährlichen Stückzahlen von 100 000 Bauteilen der Fokus auf einer hohen Verfügbarkeit und Belegung und den damit verbundenen geringen Stückkosten liegt, wird für Sonderanwendungen mit stark variierenden Produktionsbedingungen ein geringerer Automatisierungsgrad akzeptiert (LÄSSIG ET AL. 2012).

- *Bauteilkomplexität und -geometrie*

Unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrie, die sich aus dem Bauraum, den Lastfällen, den Lasteinleitungspunkten sowie den mechanischen Anforderungen ergibt, wird ein für die Anwendung geeignetes Verfahren gewählt. Eine grobe Unterteilung erfolgt zwischen flächigen sowie rotations-symmetrischen Bauteilen. Weitere Auswahlkriterien sind der gewählte Faservolumenanteil, die maximale Krümmung der Verstärkungsfasern sowie die Faserausrichtung (SCHÜRMAN 2007).

1 Einleitung

- *Auswahl und zeitliche Einbringung des Matrixmaterials*

Die unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften des Matrixmaterials beeinflussen maßgeblich die Gestaltung des Fertigungsverfahrens. Abhängig vom Zeitpunkt der eingebrachten Matrix wird zwischen Prepregs und Preforms unterschieden, die nachfolgend detailliert beschrieben werden. Zudem ist die Handhabung unterschiedlicher Halbzeugarten erforderlich, woraus unterschiedliche Umsetzungsansätze resultieren.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Einstufung zeigen, dass keine standardmäßige Klassifikation für die breite Gestaltung der Fertigungsverfahren vorherrscht. Unabhängig vom eingesetzten Matrixmaterial lassen sich die drei wesentlichen Prozessphasen *Halbzeugfertigung*, *Formgebung* und *Konsolidierung* sowie *Endbearbeitung* definieren, in welche die wichtigsten industriellen Prozessschritte eingeteilt werden und aus denen ein Überblick über die wesentlichen Fertigungsverfahren abgeleitet wird (vgl. Abbildung 1.5).

Ausgehend von einem Roving, womit ein kontinuierlich geordnetes Bündel von einzelnen Fasern bezeichnet wird, lassen sich zwei wesentliche Prozessrouten festlegen (BONNET 2008). Ohne eine separate Halbzeugfertigung ermöglicht eine Prozessvariante durch ein kontinuierliches Verfahren (bspw. Pultrusion und Wickeln) die finale dreidimensionale (häufig rotationssymmetrische) Konturfertigung. In einer weiteren Prozessroute werden zunächst die textilen Halbzeuge gefertigt (Variationen siehe Abbildung 1.3).

Imprägnierte Halbzeuge sind bereits mit der Matrix verbunden und werden als Prepregs bezeichnet. Bei einer thermoplastischen Matrix werden die Halbzeuge als Tapes oder Organobleche bezeichnet. Mit der Verwendung von textilen Halbzeugen ergeben sich Verfahren mit mehreren sequenziell ablaufenden Prozessschritten. Unter dem Begriff Preforming werden alle Prozessschritte zusammengefasst, mit denen endkonturnahe Faserverbundhalbzeuge hergestellt werden, die in einem nachfolgenden Schritt mit Matrixmaterial imprägniert werden müssen oder deren Matrix der finalen Konsolidierung bedarf.

Textile Halbzeuge, die für den Preformaufbau verwendet werden, tragen in der Regel den Zusatz „trocken“, da die Imprägnierung erst später stattfindet. Bei der Verwendung von textilen Halbzeugen ist ein Konturzuschnitt notwendig. Hierzu kann ein Schneidsystem oder eine Stanze verwendet werden (NEITZEL ET AL. 2014). Aktuelle Forschungsansätze befassen sich auch mit der Verwendung und Qualifizierung des Wasserstrahls als Trennverfahren (GRAF ET AL. 2014; LANGEMANN 1995; VOIT ET AL. 2017). Zusätzlich können die Halbzeuge während der Fertigung bereits mit verschiedenen Funktionselementen versehen werden (bspw. mit Inserts für Krafteinleitungspunkte und Sandwichstrukturen für Versteifungen).

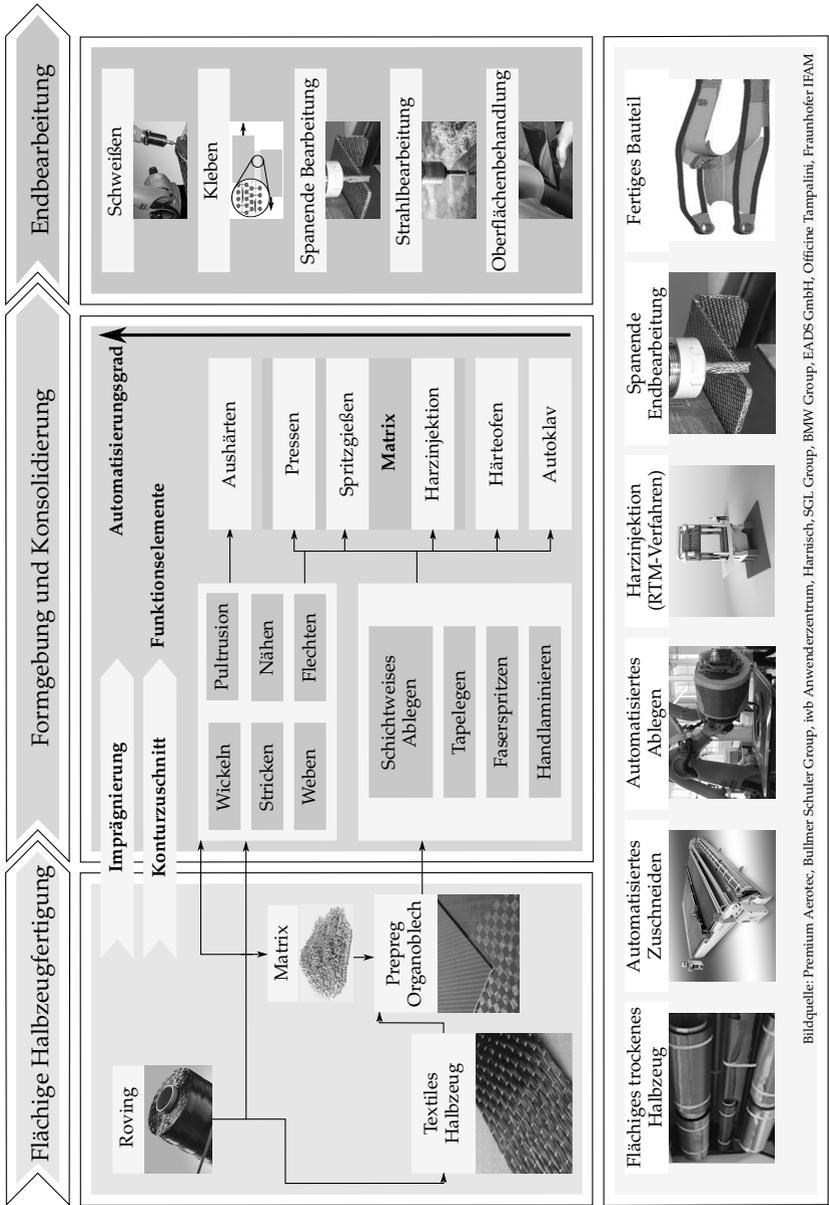


Abbildung 1.5: Übersicht über verschiedene Prozessketten zur Faserverbundfertigung (DRECHSLER 2010; EHRENSTEIN 2006; GRAF ET AL. 2014; NEITZEL ET AL. 2014; SCHÜRSMANN 2007)

1 Einleitung

Die Prozessrouten weisen unterschiedliche Grenzen hinsichtlich der maximalen Stückzahlen einer Linie auf. Während Pressverfahren in Anwendungen für bis zu 70 000 Bauteile pro Linie und Jahr eingesetzt werden, bieten Handlaminierte und Sprühverfahren in der Regel lediglich für geringe Stückzahlen und hohe Variantenschwankungen eine wirtschaftliche Lösung (EHRENSTEIN 2006). Abhängig von der gefertigten Stückzahl ist für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens der Automatisierungsgrad der Technologien eine wichtige Größe, der in Abbildung 1.5 die Herstellungsverfahren charakterisiert (LÄSSIG ET AL. 2012). Neben den abgebildeten Verfahren gibt es eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten und Prozessrouten, die aktuell in der Entwicklung und Qualifizierung sind (NEITZEL ET AL. 2014). Auch die hybridisierte Fertigung in Kombination mit anderen Materialgruppen und im Multimaterialdesign steht noch am Anfang der Erprobung (LÄSSIG ET AL. 2012).

Neben der allgemeinen Einordnung wesentlicher Prozessschritte zeigt Abbildung 1.5 im unteren Abschnitt mit dem Resin-Transfer-Moulding (RTM)-Prozess eine Prozesskette, die für die industrielle Anwendung bei hohen Stückzahlen und geringer Variantenvielfalt eine geeignete Lösung darstellen kann und aktuell weitverbreitet ist (NEITZEL ET AL. 2014). Dadurch weist sie eine hohe Relevanz für eine wirtschaftliche Fertigung von FVW auf. Dabei werden flächige textile Halbzeuge zunächst automatisiert auf einem Schneidtisch zugeschnitten. Hierzu dient das Nesting, welches als das optimale Zuschneiden der Textilien unter minimalem Ausschuss definiert ist.

Die konturvarianten und formlabilen Halbzeuge werden im nächsten Schritt vom Schneidtisch absortiert und schichtweise zur Preform aufgebaut oder direkt in einer Form verpresst und mit der Matrix ausgehärtet. Der Preformaufbau lässt sich in die Hauptgruppe Fügen der DIN 8580 einordnen (DIN 2003D). Auf Untergruppenebene erfolgt die Einteilung in Schichten gemäß der DIN 8593 (DIN 2003). Die Textilien können dabei einzeln oder mehrlagig abgelegt werden; im zweiten Fall werden die Halbzeuge als Multilayer bezeichnet. Durch die Aktivierung eines thermoplastischen Binders, mit dem die Textilien vorher versehen worden sind, kann die dreidimensionale Kontur der Preform stabilisiert und beibehalten werden. Eine weitere Möglichkeit der Fixierung bietet ein Näh- oder Heftprozess der abgelegten Textilien.

Anschließend wird die Preform durch den RTM-Prozess, der in die Harzinjektionsverfahren eingeteilt wird, in einer Form mit Harz infiltriert und unter Einwirkung von Druck und Wärme ausgehärtet. Dabei kann entweder die fertige formstabile Preform eingelegt oder die Textilien direkt in die Form abgelegt werden.

Aufgrund des hohen Potenzials des RTM-Prozesses wird kontinuierlich an der

Weiterentwicklung gearbeitet, sodass durch die Kombination mit dem Nasspressverfahren ein neuartiger serientauglicher Prozess erreicht werden kann (KRAUSS ET AL. 2015).

Aufbauend auf den beschriebenen Fertigungsverfahren sowie unter Fokussierung auf den detaillierten RTM-Prozess werden als Nächstes die aktuellen Defizite und Herausforderungen herausgearbeitet.

1.2.3 Defizite der heutigen Fertigungstechnologien

Trotz der aufgezeigten strukturellen Vorteile und Möglichkeiten zur Bauteilauslegung spielen industriell eingesetzte FVW eine bislang untergeordnete Rolle gemessen am Einsatz konventioneller Werkstoffe. Im Vergleich zur weltweiten Stahlnachfrage beträgt der Massenanteil verarbeiteter Carbonfasern 0,01 % (THEBEN ET AL. 2014). Der Grund für die noch fehlende Marktdurchdringung im Vergleich zu konventionellen Stahlbauweisen liegt im Wesentlichen in den Fertigungskosten (vgl. Abbildung 1.2). Als Gründe hierfür lassen sich folgende Aspekte ableiten, die schwerpunktartig die Handhabung der textilen Halbzeuge betreffen und teilweise in einem gegenseitigen Abhängigkeitsverhältnis stehen:

1. *Frühzeitige Festlegung der Lastungspfade des Bauteils*

Mit dem Ablegen der textilen Halbzeuge beim Preforming werden die Faserorientierung und damit die Lastpfade zu einem frühen Zeitpunkt der Fertigung festgelegt. Je früher eingebrachte Fehlstellen detektiert oder idealerweise vermieden werden können, desto geringer gestalten sich die Folge- und Ausschusskosten für das gesamte Bauteil.

2. *Aufwendige Fertigungsprozesse mit geringem Automatisierungsgrad*

Die Formgebung einer konventionellen Preform für den RTM-Prozess erfolgt durch sequenzielles Einlegen der formlabilen textilen Halbzeuge in die vorgesehene Form. Für einfache Operationen werden teilweise automatisierte Handhabungslösungen eingesetzt (APMANN 2008; PASSREITER 2013). Für Preforms mit erhöhten Qualitätsanforderungen und einer hohen Flexibilität wird der Prozess größtenteils manuell durchgeführt (WEILAND ET AL. 2015). Zudem müssen die bei der Fertigung durchlaufenen Prozessschritte über Handhabungsschritte miteinander verknüpft werden. Beispielsweise beziffern FRAUENHOFER ET AL. (2007) die Kosten eines RTM-Prozesses zur Preformfertigung auf bis zu 60 % der gesamten Fertigungskosten.

3. Hoher Einfluss der Fertigung auf die Bauteilqualität

Die textilen Halbzeuge werden beim Preformaufbau schichtweise gemäß der vorgegebenen Faserorientierung abgelegt. Aufgrund der inhomogenen Struktur von Faserverbundhalbzeugen hat eine geringe Winkeländerung einzelner Schichten einen großen Einfluss auf die Bauteilfestigkeit und damit auf die Qualität des entstehenden Bauteils (vgl. Abbildung 1.4). Somit stellt die Handhabung der textilen Halbzeuge eine bedeutende Fehlerquelle dar, woraus insbesondere für Anwendungen mit sehr hohen Qualitätsanforderungen eine hohe Ausschussrate resultiert (LANZA ET AL. 2012). Daraus lässt sich für die automatisierte Handhabung der formlabilen textilen Halbzeuge ein entscheidender Einfluss auf die Bauteilqualität und die Ausschusskosten ableiten.

4. Unzureichende Prozesssicherheit bei den Fertigungsverfahren

Speziell beim Aufbau der Preform durch die Handhabung konturvarianter und formlabiler Halbzeuge werden hohe Anforderungen an die Handhabungssysteme gestellt. Im automatisierten Preformaufbau werden textile Halbzeuge mit einem Greifsystem gehandhabt. Dabei erfährt das Textil bei der Aufnahme durch das Greifsystem, dem Textiltransport und bei der Ablage eine Vielzahl von Bewegungen und Umformungen, woraus ein hohes Fehlerpotenzial resultiert. Außerdem stellt die große Anzahl sequenzieller Prozessschritte hohe Anforderungen an die Gesamtverfügbarkeit des Preformaufbaus (CHERIF 2011; VDI 2013).

Als Ergebnis der Analyse stellt vor allem die Handhabung der textilen Halbzeuge einen signifikanten Stellhebel zur Einhaltung der Bauteilqualität im automatisierten Prozess dar, wodurch die Fertigungskosten nachhaltig reduziert werden können und eine schnellere Marktdurchdringung von [FVW](#) erzielt werden kann (WITTEN 2013). Gleichzeitig wird der Bedarf für eine automatisierte qualitätskonforme Handhabung textiler Halbzeuge aufgezeigt.

Zur Automatisierung von Prozessschritten in der Textilindustrie ist die automatisierte Handhabung textiler Zuschnitte seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung, jedoch ist hier der absolute Durchbruch noch nicht gelungen (CHERIF 2011; NEITZEL ET AL. 2014).

Die Luftfahrtindustrie setzt sehr hohe Qualitätsanforderungen an die Fertigung, die sich auf die Handhabung der Halbzeuge übertragen lassen und woraus eine aufwendige Implementierung bis zum Serieneinsatz resultiert (REINHART 2011A).

Trotz des erfolgreichen und etablierten Einsatzes von **FVW** in dieser Branche wird zukünftig infolge der Konkurrenzsituation mit anderen Materialien (bspw. Aluminium) ein verstärkter Fokus auf die wirtschaftlichere Fertigung gelegt werden (BEAUMONT 2010; SCHNIZER 2013).

1.3 Handlungsfelder und abgeleitete Zielsetzung

Aus der beschriebenen Problemstellung lassen sich zur Konkretisierung Handlungsfelder ableiten, in denen Potenziale zur Kostensenkung aufgezeigt werden können. Vor dem Hintergrund der derzeitigen Fertigungskosten befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Qualitätssicherung zur automatisierten Handhabung von textilen Halbzeugen. Abbildung 1.6 visualisiert die Handlungsfelder sowie die abgeleitete Zielsetzung der Arbeit mit den vorliegenden Randbedingungen.



Abbildung 1.6: Übersicht über die identifizierten Handlungsfelder und die daraus abgeleitete Zielsetzung

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen - erzielbare Qualität, erforderliche Prozesssicherheit sowie vorgegebene Zykluszeit - bei gleichzeitigem Fokus auf eine wirtschaftliche Umsetzung soll in der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge erarbeitet

1 Einleitung

werden. Als Handlungsfelder werden die Erhöhung der Prozesssicherheit und die gleichzeitige Reduktion des Materialausschusses identifiziert. Hiermit geht die Notwendigkeit eines Aufbaus von Prozessverständnis durch die Analyse relevanter Einflussgrößen einher.

Die Zielsetzung in dieser Arbeit ist es, einen definierten Handhabungsschritt hinsichtlich seiner Fehler und Schwachstellen zu analysieren und daraus geeignete Maßnahmen zur Realisierung eines prozesssicheren Handhabungsvorgangs unter Einhaltung der Qualitätsanforderungen abzuleiten und anschließend umzusetzen und zu validieren.

Als technischer Ansatz sollen zur Aufnahme der Prozessdaten Sensoren verwendet werden. Ein erwartetes Ergebnis der Arbeit ist die Verbesserung des Handhabungsprozesses in Form einer erhöhten Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Aufgrund der Herausforderungen und hohen Anforderungen bei der automatisierten Handhabung werden textile Halbzeuge als Handhabungsgut fokussiert.

Ein weiteres wesentliches Element stellt die Erarbeitung und Umsetzung von Maßnahmen dar, mit denen der Handhabungsprozess für die industrielle Anwendung qualifiziert werden kann. Als Ergebnis soll eine Methodik zur Sicherstellung der geforderten Qualität für Handhabungsschritte in der Faserverbundfertigung entstehen.

1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Abbildung 1.7 zeigt den Aufbau der vorliegenden Arbeit. Nach der Einführung in Kapitel 1 wird zunächst die Ausgangssituation im produktionstechnischen Umfeld beschrieben sowie der aus den bestehenden Defiziten resultierende Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet. Kapitel 2 erweitert die Grundlagen durch die detaillierte Beschreibung des aktuellen Standes der Technik und Wissenschaft mit dem Fokus auf bestehende relevante Handhabungslösungen und aktuelle Ansätze zur Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung, woraus der detaillierte Handlungsbedarf und die weiteren Schritte abgeleitet werden. Kapitel 3 stellt den wissenschaftlichen Hauptteil der Arbeit dar und beschreibt die Vorgehensweise zur Erhöhung der Prozesssicherheit und Einhaltung der geforderten Qualität bei der Handhabung textiler Halbzeuge.

Am Beispiel einer Versuchsanlage werden die erarbeiteten Ergebnisse prototypisch umgesetzt und auf einen beispielhaften Handhabungsschritt angewendet, dessen Umsetzung in Kapitel 4 detailliert dokumentiert wird. Im anschlie-

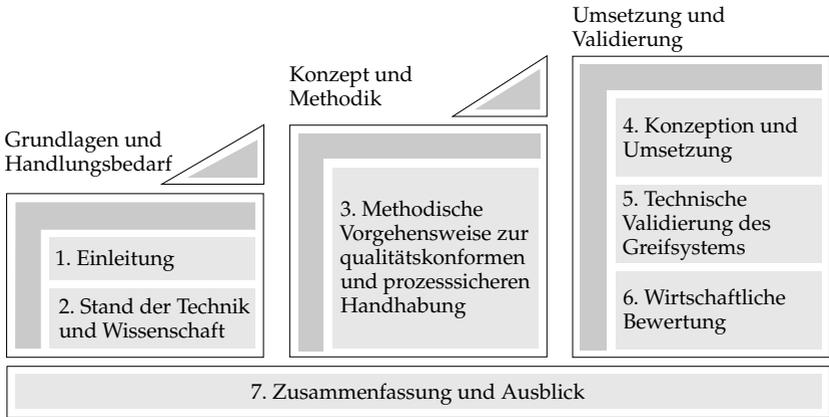


Abbildung 1.7: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Im fünften Kapitel werden die technischen Lösungen anhand experimenteller Versuchsreihen validiert. Die Ergebnisse fließen in die wirtschaftliche Bewertung ein, die in Kapitel 6 fokussiert wird. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsaspekte.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Das vorliegende Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft der für die nachfolgenden Kapitel erforderlichen Grundlagen. Der Schwerpunkt liegt dabei, der Zielsetzung folgend, zunächst auf der Darstellung des Aufbaus und des Ablaufs eines Handhabungsvorgangs am Beispiel der textilen Halbzeuge, wodurch ein Teilschritt der Faserverbundfertigung abgedeckt wird. Daran anschließend werden aktuelle Ansätze und Strategien zur Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung vorgestellt und der detaillierte Handlungsbedarf abgeleitet.

2.1 Einteilung und Definitionen

Die Richtlinie 2860 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) ermöglicht die Charakterisierung und Definition eines Handhabungsvorgangs und grenzt diesen Teilschritt gegenüber weiteren Prozessschritten und Verfahren der Fertigungstechnik ab (VDI 1990). Auf der Basis dieser Einteilung lässt sich Handhaben in unterschiedliche Betrachtungsfelder eingruppiert, deren wesentliche Teilfunktionen Abbildung 2.1 veranschaulicht.

Das Handhaben bildet neben dem Fördern und Lagern einen weiteren Teilschritt des Materialflusses. Die Abgrenzung des Handhabens erfolgt über die Information zu den Positionsbedingungen. Werden beim Fördern und Lagern nur die Anfangs- und Endpunkte der Bewegung benötigt, ist beim Handhaben zusätzlich die Kenntnis über die Orientierung der zu handhabenden Körper erforderlich (VDI 1970; VDI 1990).

HESSE (2006) definiert den Handhabungsschritt daher als „Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“. Handhaben unterteilt sich in die in Abbildung 2.1 aufgeführten Teilfunktionen, die sich gemäß der VDI-Richtlinie aus Elementarfunktionen zusammensetzen, die für die vollständige Erfüllung und Beschreibung eines Vorgangs notwendig sind. Für die Handhabung textiler Halbzeuge lassen sich das *Bewegen*, das *Sichern*

2 Stand der Technik und Wissenschaft

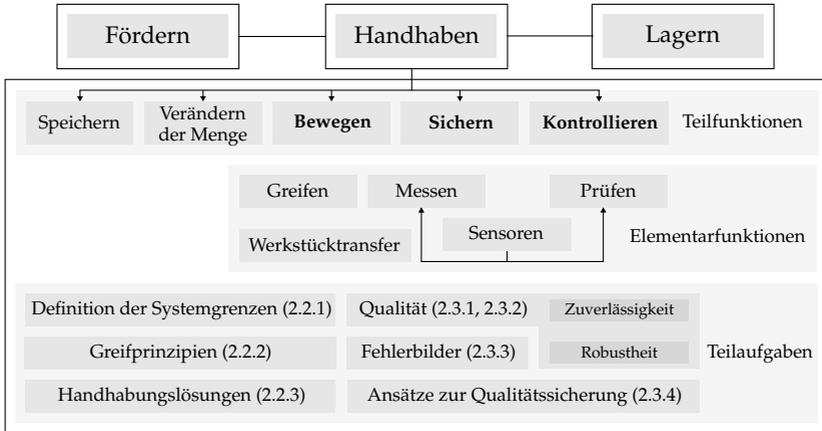


Abbildung 2.1: Aufbau und Einteilung eines Handhabungsvorgangs (in Anlehnung an VDI 2860 (1990))

und das *Kontrollieren* als Teilfunktionen ableiten, die im nachfolgenden Abschnitt 2.2 anhand der formulierten Teilaufgaben detailliert betrachtet werden. Diese Einteilung beinhaltet vor allem die Definition der Systemgrenzen sowie die Recherche von Greifprinzipien, die sich zur Handhabung textiler Halbzeuge eignen. In Abschnitt 2.3 werden die beteiligten Aufgaben untersucht, die einen Einfluss auf die Erfüllung der Teilfunktion *Kontrollieren* besitzen. Ein inhaltlicher Schwerpunkt liegt auf der Definition und Abgrenzung der Begriffe Qualität und Prozesssicherheit im Kontext der Handhabung, der Identifikation möglicher Fehlerbilder im Fertigungsprozess sowie auf den bestehenden Ansätzen zur Detektion der Fehler.

2.2 Automatisierung technischer Teilsysteme am Beispiel eines Handhabungsvorgangs

Im Gegensatz zur allgemeinen Handhabung, die auch manuelle Teilschritte einschließt, wird nachfolgend der Fokus auf die automatisierte Handhabung sowie deren Qualifizierung und Umsetzung gelegt. DIN 19233 (1998) definiert *Automatisieren* als das „Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet“. BINDEL

& HOFMANN (2013) beschreiben die Vorgehensweise und den Ablauf von Automatisierungsprojekten unter dem Gesichtspunkt des Projektmanagements, das in verschiedenen Phasen abläuft. Im Zuge der Erarbeitung einer Automatisierungslösung bestehen oftmals Unsicherheiten ob der Gefahr eines fehlerhaften und ungenügenden Aufbaus von notwendigem Prozessverständnis, aus dem negative Effekte auf die Qualität der Produkte resultieren können (GEVATTER 2006). Dies gilt insbesondere für Prozesse und Prozessschritte mit erhöhten Sicherheits- oder Qualitätsanforderungen. Aus diesem Grund müssen für die erfolgreiche Umsetzung einer Automatisierung folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- *Technische Machbarkeit*

Eine wichtige Voraussetzung ist der Nachweis der technischen Machbarkeit. Im Zuge der kontinuierlichen technischen Fortschritte und Innovationen der eingesetzten Teilsysteme, wie **bspw.** Sensoren, Roboter oder Werkstoffe, ist die Umsetzung und Realisierung immer anspruchsvollerer Prozesse möglich (SCHNIEDER 1999).

- *Fähigkeit zur Automatisierung*

Neben den technischen Voraussetzungen sind Aspekte wie betriebswirtschaftliche, gesellschaftliche und firmenstrategische Belange zu berücksichtigen. Beispielsweise kann es vorkommen, dass es aus Marketinggründen angebracht ist, eine manuelle oder eine teilautomatisierte Produktion beizubehalten, obwohl eine Automatisierung aus ergonomischen Gründen oder zur Erreichung einer geforderten Qualität durchaus erwünscht wäre (SCHNEIDER 1999).

- *Prozess und Vorgehensweise der Automatisierung*

Zur Automatisierung eines bestehenden manuellen Prozessschrittes erfolgen die schrittweise Analyse und die nachgelagerte Überführung in eine technische Lösung. Hierbei können Teilsysteme ergänzt bzw. substituiert werden. Damit die automatisierte Fertigung bestimmungsgemäß arbeiten kann, ist eine nachvollziehbare Vorgehensweise zur Überführung in die technische Lösung eine Voraussetzung.

- *Ausreichende Verfügbarkeit des eingesetzten Systems*

Neben der Projektierung der Automatisierungsebene liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Prozessführung. Eine erfolgreiche Automatisierung setzt eine ausreichende Gewährleistung der Prozesssicherheit voraus, um die geforderte Verfügbarkeit zu erreichen (BINDEL ET AL. 2013; VDI

2 Stand der Technik und Wissenschaft

2007). Die Verfügbarkeit gibt dabei „den prozentualen Anteil der Bearbeitungszeit an, für den die Anlage ohne technischen Mangel der Produktion zur Verfügung steht“ (VDI 2011).

Übertragen auf die Automatisierung einzelner Teilschritte lässt sich ein mehrstufiges Vorgehen ableiten, in dem die verschiedenen Stufen parallel oder sequenziell durchlaufen werden können. Tabelle 2.1 zeigt für die Handhabung die Schritte zur vollständigen Automatisierung eines Systems.

Teilfunktion	Bewegen	Sichern	Kontrollieren		Erklärung
Elementarfunktion	Werkstücktransfer	Greifen	Messen und Prüfen	Übergeordnete Logik	
1. Stufe					Einfaches unterstützendes Hilfsmittel für eine manuelle Fertigung oder Montage
2. Stufe	X				Automatisierung des Fertigungsvorgangs
3. Stufe	X	X			Automatisierung der Bauteilentnahme, ggf. mithilfe von Handhabungseinrichtungen
4. Stufe	X	X	X		Automatisierung des Prüfvorgangs
5. Stufe	X	X	X	x	Automatisierung der Parameteraufnahme in die Fertigungssteuerung
6. Stufe	X	X	X	X	Vollständige Integration in die Fertigungssteuerung

Tabelle 2.1: Stufen zur Automatisierung eines Teilschrittes am Beispiel der Handhabung (in Anlehnung an SCHNIEDER (1999), MITTELHUBER & WINKLER (2002), FLEISCHER (2015) und BINDEL & HOFMANN (2013))

Abhängig vom Entwicklungsstand lässt sich ein Handhabungsvorgang, der sich aus unterschiedlichen Teil- und Elementarfunktionen zusammensetzt, in eine Stufe einordnen. Die quantitative Erfassung und Bewertung der Automatisierung für eine gesamte Fertigungslinie erfolgt anhand des Automatisierungsgrades, der gemäß DIN 19233 (1998) als „Anteil der automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion einer Anlage“ definiert ist. Übertragen auf das vorliegende Beispiel eines einzelnen Prozessschrittes werden die Teilfunktionen für die Charakterisierung des Automatisierungsgrades herangezogen.

In der vorliegenden Arbeit soll die automatisierte Handhabung bei gleichzeitiger Prozessüberwachung untersucht werden, womit die Erhöhung des Automatisierungsgrades im Handhabungsprozess angestrebt und mindestens die vierte Stufe erreicht werden soll. Unter betriebswirtschaftlichen Gesichts-

punkten ließen sich dadurch betriebliche Abläufe effizienter gestalten und die Potenziale der Kostensenkung und der Erhöhung der Rationalität im Rahmen einer Automatisierung ausschöpfen (EHRENSPIEL ET AL. 2014).

2.2.1 Prozessbeschreibung und Festlegung der Systemgrenzen

Nach der Beschreibung der Herausforderungen an die qualitätskonforme Handhabung werden die nachfolgenden Untersuchungen am Beispiel der textilen Halbzeuge durchgeführt (vgl. Abschnitt 1.2.3). Durch die steigenden Anforderungen an den Handhabungsvorgang erwartet HIRZINGER (2011) für die Zukunft komplexere Handhabungslösungen zur Fertigung von Faserverbundstrukturen. Basierend auf dem vorgestellten Fertigungsprozess aus Abbildung 1.5 detailliert Abbildung 2.2 den Handhabungsprozess zum Aufbau der Preform und grenzt das System ein, um im Zuge der Prozessanalyse die beteiligten Funktionen bewerten zu können (DIN 1998C; EHINGER ET AL. 2010; REINHART ET AL. 2010).

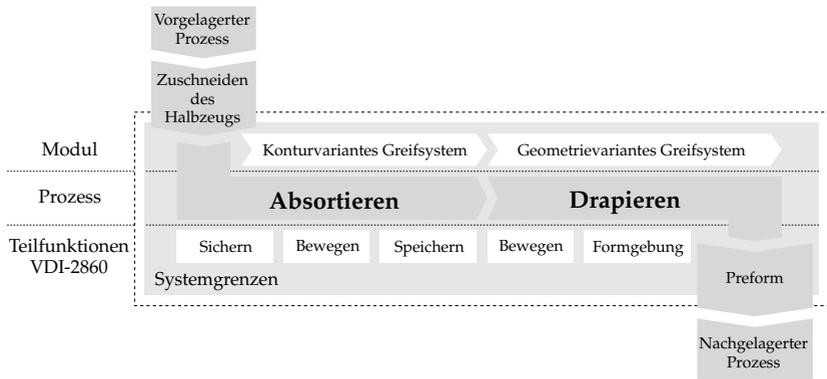


Abbildung 2.2: Übersicht über die Teilprozesse und Systemgrenzen eines Handhabungsvorgangs zum Preformaufbau

In Anlehnung an die Einteilung nach der DIN 2860 erfolgt die Unterteilung unter Berücksichtigung der Teilfunktionen. Die zentralen Prozessschritte bilden dabei der Absortier- sowie der Drapierprozess:

- *Absortieren* bezeichnet das Aufnehmen und Vereinzeln flächiger, zugeschnittener und konturvarianter Halbzeuge vom Zuschneidetisch auf einen temporären Zwischenspeicher (REINHART ET AL. 2012).

- *Drapieren* ist definiert als das Aufnehmen flächiger textiler Halbzeuge und das anschließende Umformen und Ablegen in eine dreidimensionale Form (EHINGER 2013).

Die Systemgrenze zum vorgelagerten Prozess bildet der Zuschnittprozess. Mit den zugeschnittenen Halbzeugen beginnt der Handhabungsschritt. Abgeschlossen wird der Prozess mit der fertigen Preform, die durch das sequenzielle Drapieren mehrerer Lagen aufgebaut wird. Nach dem positionsgenauen Ablegen aller Lagen wird die fertige Preform im nachfolgenden Prozessschritt weiterverarbeitet. Der Handhabungsschritt wird aktuell abhängig vom Anwendungsfall manuell oder mit unterschiedlichen Greifsystemen durchgeführt, die nachfolgend näher beschrieben werden (PASSREITER 2013; REINHART ET AL. 2009; WEILAND ET AL. 2015).

2.2.2 Wirkprinzipien zur Handhabung von Textilien

HESSE, MONKMAN ET AL. (2004) definiert Greifsysteme als „Teilsysteme von Handhabungseinrichtungen, die einen zeitweiligen Kontakt zu einem Greifobjekt herstellen“. Damit werden sowohl die Position als auch die Orientierung des Greifobjekts beim Aufnehmen und während des Ablegens gesichert. SEEGRÄBER (1993) bezeichnet den „Greifer als direktes Bindeglied zwischen Handhabungsgerät [...] und dem Werkstück“. Der Greifer stellt den ausführenden Teil eines Greifsystems dar. Der Begriff des Handhabungssystems wird nachfolgend synonym zum Ausdruck Greifsystem verwendet. In einem Handhabungsvorgang stellt der Greifer das zentrale Element für die Sicherstellung von Genauigkeit und Prozesssicherheit dar (SEEGRÄBER 1993). Zu den Aufgaben eines Greifers gehören das Herstellen, Aufrechterhalten und Lösen von Verbindungen zwischen dem zu greifenden Objekt und dem Handhabungsgerät sowie die Lagebestimmung der Greifobjekte (HESSE ET AL. 2004; VDI 1995). Aufgrund vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten und Ausprägungen gibt es zudem keine allgemeine Einteilung von Greifsystemen.

Ein wesentliches Element und mögliches Einteilungskriterium eines Greifsystems ist das zugrunde liegende Greifprinzip, das auf einen physikalischen Effekt zurückzuführen ist. Aus den Effekten können die physikalisch-technischen Grundprinzipien abgeleitet werden, die auch als Wirkprinzipien bezeichnet werden und in Abbildung 2.3 vorgestellt werden (HESSE 1991; STEPHAN 2001; STRASSER 2012). Als weiteres Unterscheidungskriterium dient die Verbindungsart, deren Auswahl einen wesentlichen Einfluss auf die Prozesssicherheit hat.

		Verbindungsart		
		Kraftschluss	Formschluss	Stoffschluss
				
Physikalisches Wirkprinzip	Anhaften	Sauggreifer	Nadelgreifer Kratzengreifer Klettverschluss	
	Kontaktierung	Klemmgreifer Kneifgreifer	Scherengreifer Röhrengreifer Zangengreifer	
	Elektromagnetische Wechselwirkung	(elektrostatischer) Adhäsionsgreifer		
	Sonstiges	Ultraschallgreifer		Gefriergreifer Adhäsionsfoliengreifer

Legende: Greifprinzip

Abbildung 2.3: Einteilung und Priorisierung unterschiedlicher Greifprinzipien für die automatisierte Handhabung

In Sonderfällen kann der Greifeffekt des Scherengreifers auch über die Verbindungsart Kraftschluss erfolgen. In der Luft- und Raumfahrtindustrie werden bevorzugt die Verbindungsarten *Kraftschluss* mittels Sauggreifer und *Formschluss* durch Nadelgreifer eingesetzt (APMANN 2013). Die Verbindungsart kann auf das Greifobjekt je nach Wirkprinzip punktuell, linienartig oder flächig wirken (HASSAN ET AL. 2014; HESSE ET AL. 2004). STRASSER (2012) und BRECHER & EMONTS (2011) leiten die markierten Wirkprinzipien als einsetzbare Prinzipien für die nachfolgend adressierte Handhabung textiler Halbzeuge ab.

2.2.3 Systeme zur Handhabung formlabiler Textilien

Neben dem Wirkprinzip spielt das Handhabungsgut, das sich sowohl durch die vorliegende Struktur als auch anhand der Geometrie charakterisieren lässt, eine wesentliche Rolle für die Entwicklung und Umsetzung eines geeigneten Handhabungssystems. Abbildung 2.4 teilt die Halbzeugarten entsprechend der Verarbeitung in zwei wesentliche Abfolgen (I, II) ein.

Neben den trockenen textilen Halbzeugen weisen thermoplastische Halbzeuge

2 Stand der Technik und Wissenschaft

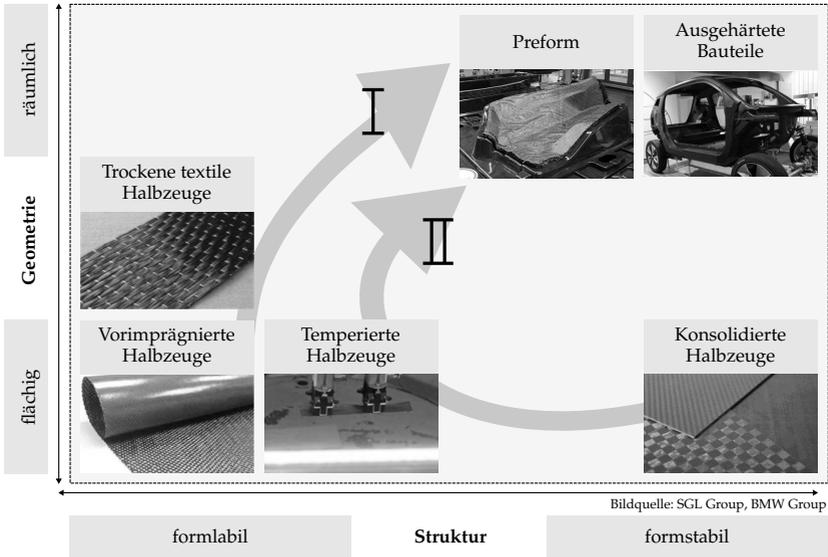


Abbildung 2.4: Charakterisierung der Struktur textiler Halbzeuge mit den möglichen Verarbeitungsabfolgen

durch die Erwärmung und das damit verbundene Aufschmelzen eine formlabile Struktur auf, bevor das Halbzeug nach der Umformung und dem Abkühlen wieder einen formstabilen Zustand annimmt.

Zur Fertigung von **FVV** werden neben textilen Halbzeugen auch indirekte Komponenten wie Folien oder metallische Inserts zur Lasteinleitung eingesetzt, deren Handhabung im weiteren Verlauf nicht betrachtet wird. Zur Handhabung formstabiler Greifobjekte, wie **bspw.** der fertigen Faserverbundbauteile oder der flächigen thermoplastischen Organobleche, werden überwiegend mechanische Klemmgreifer oder Sauggreifer eingesetzt (ASS 2015; HESSE 2011).

Die technische Herausforderung der Handhabung sowie die verschiedenen Zustände des Handhabungsguts erfordern unterschiedliche Lösungen, wozu zahlreiche Ansätze in der Wissenschaft und Technik bestehen. Abbildung 2.5 teilt die aktuellen Lösungen gemäß ihrem Entwicklungsstand sowie entsprechend den wesentlichen in Abbildung 2.3 identifizierten Wirkprinzipien ein. Speziell für den Anwendungsfall der formlabilen Materialien eignen sich vorwiegend Nadelgreifer, Gefriergreifer sowie Sauggreifer (REINHART ET AL. 2010). Für industrielle Anwendungen sind aktuell vorwiegend Sauggreifer

	Forschung	Vorserienanwendung	Industrie
Gefriergreifer 	(WIEDEMANN ET AL. 2008) (GREB ET AL. 2011)		
Sauggreifer 	(DIETRICH ET AL. 2013) (HERRMANN 2011) (STRASSER 2012) (EHINGER 2013) (HARTER ET AL. 2006)	(GRAF ET AL. 2014) (DRÖDER ET AL. 2016) (REINHART ET AL. 2012) (SCHWAKE ET AL. 2014) (RAMIREZ ET AL. 2014) (SCHMITT ET AL. 2014)	(VOLLMUTH 2015) (KÖHLER ET AL. 2011) (MEHRER 2015)
Nadelgreifer 	(GREB ET AL. 2011)		
Adhäsionsgreifer 	(WIEDEMANN ET AL. 2008) Elektrostatischer Greifer (EMONTS ET AL. 2012) (SIEBENPFEIFFER 2014)		

Bildquelle: RS Point, Fraunhofer IGCV, Schmalz Fraunhofer IPT

Abbildung 2.5: Lösungsansätze zur Handhabung textiler Halbzeuge (unterteilt nach dem Entwicklungsstand)

im Einsatz, die bedarfsgerecht für den jeweiligen Anwendungsfall und das Portfolio der zu greifenden Kontur entwickelt und ausgewählt werden (FANTONI ET AL. 2014; TILLI ET AL. 2014). Damit formlabile Objekte für eine positionsgenaue Ablage umfassend gesichert werden können, ist ein flächiges Ansaugen einem punktuellen Saugen vorzuziehen.

Mit Fokus auf den Nachweis der technische Machbarkeit zur Handhabung textiler Halbzeuge existieren zahlreiche Systeme, wohingegen für den prozessicheren Einsatz gemäß Tabelle 2.1 weitere Untersuchungen erforderlich sind.

2.3 Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung

2.3.1 Begriffsdefinition und Einordnung

Durch die steigende Komplexität von Produkten und Dienstleistungen bei sich ändernden Kundenanforderungen sowie die notwendige Erfüllung hoher Qualitätsansprüche rückt die Frage der Qualität immer mehr in den Vordergrund des unternehmerischen Handelns (BÖGE 2011; BRÜGGEMANN ET AL. 2012; DIN 2008E). Die Qualität wandelt sich zu einem wesentlichen Wettbewerbsfaktor, der über den langfristigen Unternehmenserfolg entscheidet (BÖGE 2011).

Der Begriff Qualität leitet sich aus dem Lateinischen „qualis“ (dt. wie beschaffen) bzw. „qualitas“ (dt. Beschaffenheit) ab (ANGERER 2004; BRÜGGEMANN ET AL. 2012; WENDT 1992). Allgemein wird Qualität nach der DIN EN ISO 9000 (2005) als „Grad [bezeichnet], in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“. WENDT (1992) setzt Qualität mit dem Erfüllungsgrad von Forderungen gleich, die an eine Sache gestellt werden. Dabei wird kein absoluter, sondern ein relativer Zustand beschrieben (BRÜGGEMANN ET AL. 2012). In produktionstechnischen Anwendungen definiert sich die Qualität eines technischen Systems gemäß Abbildung 2.6 als das Ausmaß der Übereinstimmung von gestellten Anforderungen mit dem erzielten Ergebnis (BENGLER ET AL. 2011; BRÜGGEMANN ET AL. 2012).

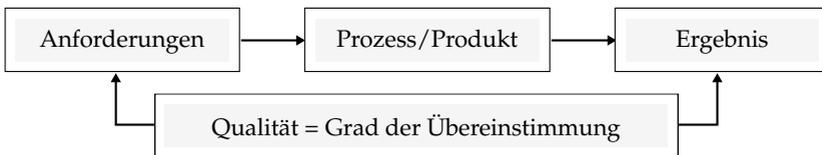


Abbildung 2.6: Einordnung des Qualitätsbegriffs in das produktionstechnische Umfeld (CZICHOS ET AL. 2012; GEIGER ET AL. 2008; VDI 1983)

Qualität ist hierbei für eine Einheit als die Gesamtheit von Merkmalen zu sehen und auf eine ganzheitliche Betrachtung ausgelegt (ANGERER 2004; DIN 2005; ZÄH ET AL. 2012). Eine Einheit kann dabei eine Tätigkeit, einen Prozess, eine Organisation, eine Person oder ein System darstellen (BRÜGGEMANN ET AL. 2012).

Zur Sicherstellung der Qualität in Unternehmen werden definierte Methoden und Abläufe eingesetzt, wozu die DIN EN ISO 9000 ein zentrales Regelwerk bildet, in dem alle wesentlichen Normen und Methoden zusammengefasst

werden (RUDORFER 2001; WENDT 1992). Diese Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation werden als Qualitätsmanagement bezeichnet und sind allgemein anwendbar (BÖGE 2011; DIN 2008E; DIN 2005). Dem Qualitätsmanagement als formeller Unternehmensaufgabe lassen sich gemäß BRUMBI (2003) die in Abbildung 2.7 zusammengestellten Aufgaben zuweisen.



Abbildung 2.7: Übersicht über die Aufgaben des Qualitätsmanagements anhand ausgewählter Ausprägungen (BÖGE 2011; CZICHOS ET AL. 2012; DIN 2005; ZÄH ET AL. 2012)

Mit den Maßnahmen des Qualitätsmanagements soll für ein Unternehmen sichergestellt werden, dass durch eine ausreichend hohe Qualität der inneren Produktions- und Dienstleistungsprozesse das Endprodukt den Ansprüchen des Kunden genügt (BRUMBI 2003; CZICHOS ET AL. 2012). Der Grad und Umfang der Qualitätsprüfung spielt dabei eine entscheidende Rolle. Jegliche Prüfabläufe bewirken einen zusätzlichen finanziellen Aufwand, ohne jedoch einen unmittelbaren Wertschöpfungsschritt zu leisten (REUTER 2014). Da aber auch fehlerhafte Produkte durch einen erhöhten Ausschuss zusätzliche Kosten verursachen, kann durch den richtigen Grad der Prüfung eine erhebliche monetäre Einsparung erzielt werden (ZÄH ET AL. 2012).

Jedoch liegt in Unternehmen trotz der Vorteile aus Kostengründen oftmals eine

mangelnde Bereitschaft vor, eine ausreichende Qualitätssicherung flächendeckend einzusetzen (NUFER 2013; RINGEN ET AL. 2014). Die Erfüllung der Qualitätsanforderungen stellt die wesentliche Aufgabe der Qualitätssicherung dar und bildet somit auch einen wichtigen Teil des Qualitätsmanagements ab (WENDT 1992). Qualitätssicherungsmaßnahmen erstrecken sich sowohl auf die Produkt- als auch auf die Prozessqualität (KOCHAN 2012). Weitergehend definiert NIU (2010) die Überwachung der Prozesse in einem Produktentstehungsprozess (PEP) als Hauptaufgabe der Qualitätssicherung. Außerdem werden ihr planende, bewertende und beratende Aufgaben fachübergreifend entlang des PEP zugewiesen (WENDT 1992; ZÄH ET AL. 2012). VDI (1983) fasst die Aufgaben der Qualitätssicherung als die Gesamtheit aller Tätigkeiten zur Einhaltung von Qualität, Material, Erzeugnissen, Handelswaren, Betriebsmitteln oder Dienstleistungen zusammen.

Die Sicherung läuft für Prozesse sowohl direkt über eine Kontrolle und Korrektur ihrer technischen Parameter (100%-Prüfung) als auch indirekt über die Kontrolle der fertigen Produkte (in Form von Stichproben) ab (CZICHOS ET AL. 2012). Bezogen auf die Montage und Fertigung werden dabei hauptsächlich Anwesenheits- und Lagekontrollen, die Überwachung von Fügeprozessen und Prüfungen der Produktfunktionen durchgeführt (ANGERER 2004).

2.3.2 Ansätze und Möglichkeiten der Qualitätssicherung

SCHMITT & DAMM (2008) assoziieren die Maßnahmen zur Qualitätssicherung mit den Verfahren der Fertigungsmesstechnik, die GEVATTER (2006) anhand der Aufgabe charakterisiert, „Mess- und Prüfverfahren zur Sicherstellung der Qualität der gefertigten Produkte“ bereitzustellen. Dabei werden alle messenden bzw. prüfenden Tätigkeiten mit dem Ziel durchgeführt, dass bestimmte, für die Qualität relevante Eigenschaften des Produktes innerhalb von zulässigen Toleranzbereichen liegen. Übertragen auf die einzelnen Bereiche eines Fertigungsprozesses sind in Abbildung 2.8 allgemein die möglichen Ebenen skizziert, auf denen eine Qualitätsprüfung stattfinden kann.

Mit zunehmendem Integrationsgrad lässt sich die Prüfung fertigungsnah von der Produktions- und der Linienebene (inline) über die Anlagenebene bis auf die Komponentenebene (jeweils online) durchführen (BRÜGGEMANN ET AL. 2012; SCHMITT ET AL. 2008). Im Gegensatz zum Integrationsgrad teilt MOSANDL (2005) die Ansätze für qualitätssichernde Maßnahmen entsprechend dem Zeitpunkt der Prüfung im Prozess ein und unterscheidet zwischen präventiver (Pre-Process-), direkter (In-Process-) und ergebnisorientierter

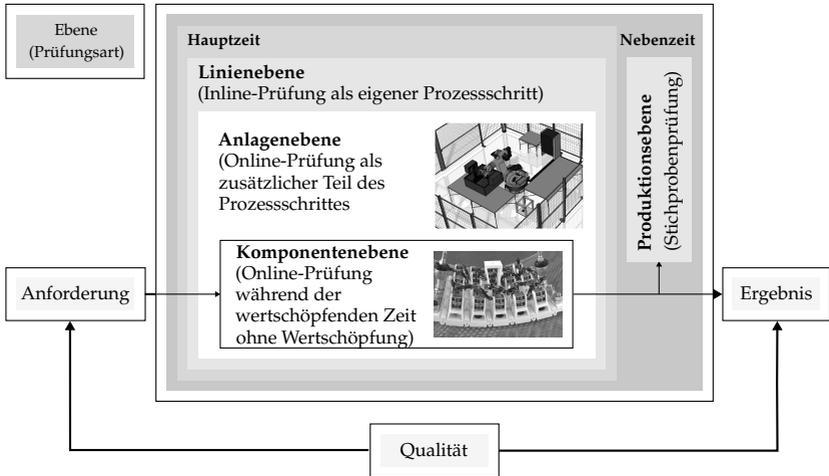


Abbildung 2.8: Wirkebenen der Qualitätssicherung in der Produktion

(Post-Process-) Qualitätssicherung. Dagegen definieren DUFFNER ET AL. (2013) die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung als Prüfung fertiger Bauteile vor der Inbetriebnahme.

Abhängig von der vorliegenden Aufgabe und Branche werden verschiedene Arten der Prüfung unterschieden. In der Luftfahrt erfolgt nach der Produktion eine interne Endabnahme der Bauteile. Dabei wird die Prüfung zu 100 % zur Gewährleistung der höchsten Qualitätsstandards durchgeführt (REINHART 2011B; TORSTRICK ET AL. 2011). Durch die Prüfung am Ende der Prozesskette ist vor allem bei Automated-Tape-Laying-(ATL)-Prozessen eine hohe Nacharbeit notwendig (SCHMITT ET AL. 2010). Somit wird in der Luftfahrt die Prüfung während der Handhabungsschritte vorwiegend manuell auf Linienebene umgesetzt (HINSCH ET AL. 2013). Die Arbeitsschritte werden von den bearbeitenden Mitarbeiter durch Abstempeln von Arbeitskarten abgeschlossen, wobei zur Reduktion möglicher Fehler die Prüfschritte personell entkoppelt und Zweit- oder Eingangskontrollen bei der Übergabe an die nächste Fertigungsstelle durchgeführt werden (MARCIO 2005).

Die Fertigung in der Automobilindustrie erreicht im Idealfall eine annehmbare Prozessstabilität, sodass sich eine Stichprobenprüfung der fertigen Bauteile als ausreichend erweist (NEITZEL ET AL. 2014; TORSTRICK ET AL. 2011). Die Prüfung bedarf dabei im Allgemeinen eines zeitlichen Zusatzaufwands und

bringt keine direkte Wertschöpfung (MEINERS 2011).

Ein Ansatz zur Reduktion des resultierenden Ausschusses ist eine möglichst vollständige Integration der Qualitätssicherung in alle qualitätsbestimmenden Bereiche, vor allem in diejenigen Prozessschritte, in denen die meisten Fehler verursacht werden (WENDT 1992).

Die Online-Qualitätssicherung gewährleistet während der Produktion eine gleichbleibend hohe Qualität, da vor allem im Rahmen eines übergeordneten Qualitätsmanagements Lösungen für die Sicherung von Fehlern abgedeckt werden können, die nicht mit einer Maßnahme umzusetzen sind (HERING 2012; THANNER ET AL. 2010). Zudem werden Fehler sofort am Ort des Auftretens erkannt. Einen weiteren Vorteil der integrierten fertigungsnahen Qualitätssicherung beschreiben SCHMITT & DAMM (2008) durch den Aufbau von Prozessverständnis beim Serienanlauf, wodurch in der späteren Serienphase eine effektivere Prozesssteuerung und Qualitätssicherung der Produkte ermöglicht wird.

Neben dem Integrationsgrad der Prüfung spielt auch der Zeitpunkt der Qualitätsprüfung eine entscheidende Rolle für einen wirtschaftlichen Einsatz. Je früher ein Fehler während der Fertigung detektiert und gegebenenfalls korrigiert werden kann, desto höher ist die Wirtschaftlichkeit des Prozesses (GUBERNATIS ET AL. 2012; MIENE 2011; MIENE ET AL. 2007). Hiermit können eine Weiterverbreitung der Fehler und im Falle eines Ausschusses zusätzliche Kosten vermieden werden. Durch eine möglichst frühe Prüfung und Eliminierung der Fehler direkt nach dem Entstehen wird eine höhere Wertschöpfung im Vergleich zur Endkontrolle erzielt (DUFFE 2011; LANGE ET AL. 2012; SCHMITT ET AL. 2008; ULLMANN ET AL. 2010). Trotz aller Potenziale und Möglichkeiten durch die fertigungsnahe Überwachung sollte die Prüfung jedoch auf das notwendige Minimum reduziert werden, um den Integrations- und Umsetzungsaufwand so gering wie möglich zu halten (BAIER 2009).

Speziell bei der kostenintensiven Fertigung von Faserverbundbauteilen bietet die Umsetzung einer fertigungsnahen Online-Qualitätssicherung wirtschaftliche Vorteile (EHINGER 2013). Zur Verwirklichung der Qualitätssicherungsansätze ist die Fertigungsmesstechnik als Bestandteil der Fertigungskette darauf ausgerichtet, die Vorgänge innerhalb der Fertigung abzusichern, zu optimieren bzw. überhaupt erst zu ermöglichen (SCHMITT ET AL. 2009). Im Rahmen einer weiterführenden Prozessbeherrschung durch überwachende und regelnde Maßnahmen ist der Einsatz von Sensoren unverzichtbar, um Prozessabläufe zu erfassen (NEITZEL ET AL. 2014). Daher wird nachfolgend der Fokus auf die Untersuchung bestehender Sensoransätze und Sensorsysteme gelegt.

2.3.3 Sensorsysteme für die Bauteilprüfung

Ein Werkzeug zur Überprüfung der Funktionalität, Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte bildet die Messtechnik. Die Aufnahme von Messwerten und die Umsetzung der Messgrößen in elektrische Größen erfolgt mithilfe von Sensoren.

Aktoren hingegen setzen die Signale in Aktionen um (CZICHOS 2008; GROTE ET AL. 2007). Sensorik bezeichnet die Anwendung von Sensoren zur Messung und Kontrolle von technischen Systemen (DUDEN 2017). Für CZICHOS (2008) steht die Sensorik „gemäß der Definition der Mechatronik im Vordergrund bei der Erweiterung mechanischer Systeme zu mechatronischen Systemen“.

Abbildung 2.9 zeigt die wesentlichen Kriterien, anhand derer sich die Sensoren, die in der Faserverbundfertigung eingesetzt werden, charakterisieren lassen (BERNSTEIN 2013; CZICHOS 2008; FISCHER 1997; HERING 2012; SZIMMAT 2007).

Neben den aufgeführten Kriterien existieren weitere Kriterien zur Einteilung von Sensoren. HERING (2012) unterteilt Sensoren, je nach Bedarf einer Hilfsspannung, in aktive und passive Sensoren. Außerdem kann abhängig vom Einsatzort und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen zwischen internen und externen Sensoren unterschieden werden (HESSE ET AL. 2011).

Die Umsetzung von Sensoren basiert aktuell auf ca. 100 physikalischen Wirkprinzipien. Daraus abgeleitet ergeben sich aufgrund der Wechselwirkungen etwa 2000 verschiedene grundlegende Sensorverfahren mit sehr vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten (BERNSTEIN 2013; ROSE 2010). Zur Strukturierung der Sensoren dienen Sensorklassen, welche die Wirkprinzipien entsprechend ihrer Wirkungsweise auf das Prüfobjekt detaillieren und somit eine Sammlung von Sensoren dieser Charakteristika darstellen (bspw. punktförmig, linienförmig oder flächig). Bezogen auf die Faserverbundfertigung unterteilt SZIMMAT (2007) die Sensoren nach der Art der eingesetzten Aufnehmer (im Wesentlichen mechanisch, optisch, induktiv, kapazitiv, akustisch, hydraulisch oder pneumatisch) sowie nach dem Messprinzip. Für textile Halbzeuge werden vorwiegend berührungslose Sensoren eingesetzt, sodass keine Rückwirkungen auf das Bauteil resultieren. Für weitergehende Informationen, Vorgaben und Checklisten zur Umsetzung, Funktionsweise und zu auftretenden Messfehlern wird auf BERNSTEIN (2013), CZICHOS (2008) und HESSE & SCHNELL (2011) verwiesen.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

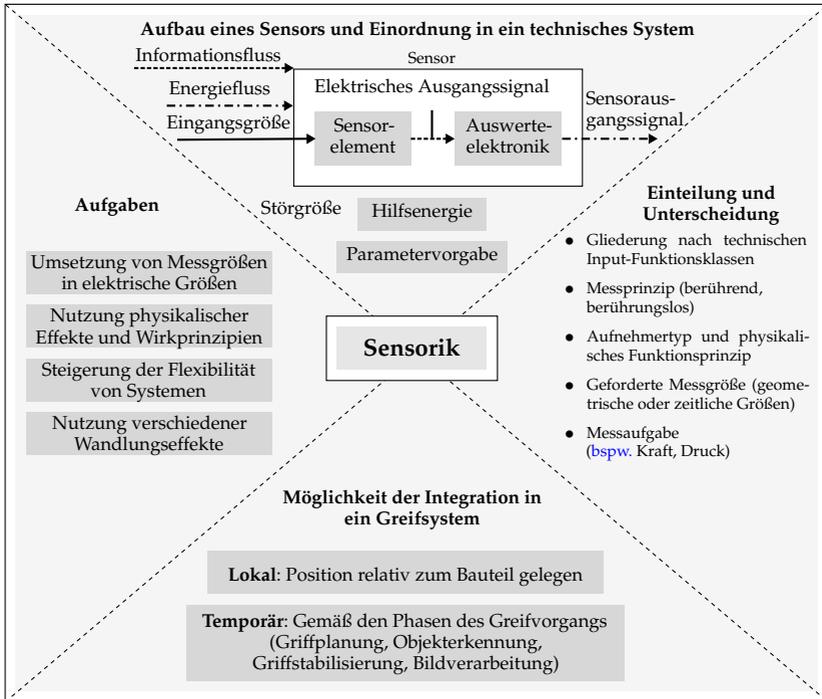


Abbildung 2.9: Kategorisierung der Sensorik in einem mechatronischen System

2.3.4 Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung

Nach diesem Überblick über die Funktionsweise und Einteilungsart von Sensoren werden nachfolgend aktuelle sensorbasierte Ansätze zur Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung vorgestellt. Als Grundlage möglicher Lösungsansätze werden zunächst die Fehler betrachtet, die während der Faserverbundfertigung auftreten können. Analog zur Einteilung von Sensoren lassen sich auch Fehlerarten entlang der Prozesskette sowie anhand verschiedener Kriterien charakterisieren (LANZA ET AL. 2012).

Fehlerarten in duroplastischen Fertigungsverfahren

Abbildung 2.10 stellt in Anlehnung an WEIMER ET AL. (2006), A. MIENE (2009) und REINHART & SCHILP (2011) die wesentlichen Fehlerursachen zum Auftretszeitpunkt mit den daraus resultierenden Fehlerbildern entlang der in Abschnitt 1.5 präsentierten Einteilung vor.

Zusätzlich zur einer Fehlerklassifizierung sortiert KOCHAN (2012) materialtypische Fehler in des gesamten Produktlebenszyklus ein. Dieser beinhaltet neben der Fertigung die Weiterverarbeitung und den Gebrauch der Bauteile. Die hauptsächlich auftretenden Fehler im Betrieb sind Kratzer, Risse, Ermüdungsschädigung und Einschlagschäden.

MIENE (2011) und CZICHOS & HENNECKE (2012) beschränken sich auf die Fehlerbeschreibung am Ende der Fertigung und unterscheiden zwischen Oberflächen- und Volumenfehlern. Bedingt durch die Prozesskette können auch Strukturfehler auftreten, die bereits zu Beginn des Handhabungsprozesses fertigungsbedingt in den Ausgangsmaterialien vorliegen (vgl. Abbildung 2.10 für textile Halbzeuge (KARBHARI ET AL. 2005)).

In den Prozessschritten der Formgebung entstehen Fehler vorwiegend während der Handhabung der textilen Halbzeuge beim Preforming (MIENE ET AL. 2007; MIENE ET AL. 2011; MITSCHANG ET AL. 2014; THUMFART 2012). AHRENS ET AL. (1998) und GÖTTINGER ET AL. (2009) führen Faserwinkelabweichungen als häufigste Fehler beim Preforming auf. SCHMITT, GRIES ET AL. (2008) bezeichnen die fehlende Sicherstellung der Ablagequalität durch eine korrekte Ausrichtung der Faserrichtung als die Hauptfehlerquelle in diesem Prozessschritt. Im Gegensatz dazu beschreibt SZIMMAT (2007) den Faltenwurf als den häufigsten Fehler.

Im weiteren Verlauf des Prozesses treten die Fehler vorwiegend während der Verarbeitung des Matrixmaterials auf. Da diese Fehler prozessbedingt am Ende der Fertigung entstehen, erfolgt die Überprüfung auf Fehler in den fertigen Bauteilen (RHEINFURTH 2013). Eine nähere Beschreibung und Charakterisierung dieser Fehler findet sich bei MARCIO (2005), DUFFNER ET AL. (2013), BAIER (2009) und BULAVINOV ET AL. (2008).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Fehler, die aufgrund der Verarbeitung des Matrixmaterials während der Konsolidierung sowie in der Betriebsphase entstehen, nicht näher betrachtet. Übergeordnet können während der gesamten Fertigung Fehler durch eingebrachte Fremdkörper auftreten (MIENE 2009).

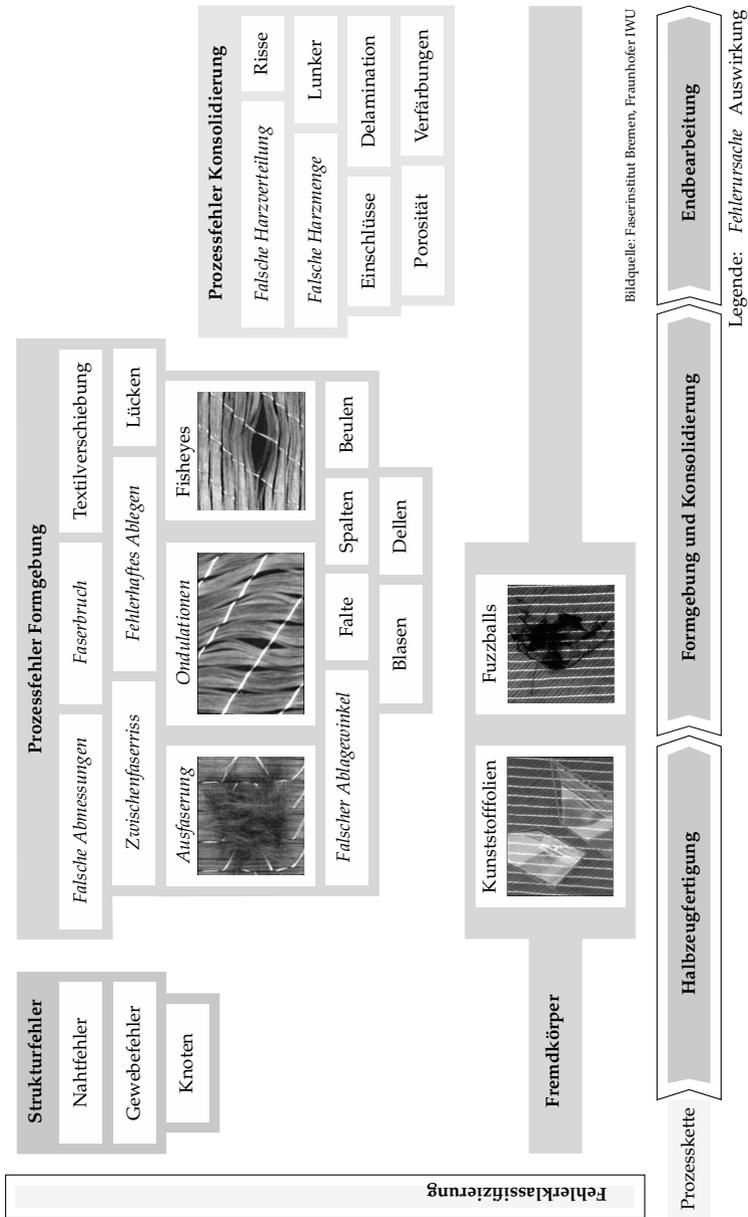


Abbildung 2.10: Fehlerbilder bei der Handhabung textiler Halbzeuge

Einteilung der automatisierten Prüfverfahren

Die Qualitätsprüfung entlang der Prozesskette kann anhand unterschiedlicher Ansätze und Verfahren durchgeführt werden, wozu nachfolgend drei Einteilungskriterien definiert werden:

- *Prüfart*
Prüfverfahren lassen sich für fertige Bauteile in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterteilen (KARBHARI ET AL. 2005; KOLL 2006).
- *Objektkontakt*
Die Unterscheidung erfolgt in berührungslose und berührende Prüfverfahren.
- *Messaufgabe*
Die Fehlertypen der Halbzeuge und Produkte werden unterschiedlichen Messaufgaben zugewiesen, womit die Fehler detektiert werden können (bspw. Geometrieabweichungen, Beschädigungen). Darauf aufbauend wird ein geeignetes Prüfverfahren gewählt (GUBERNATIS ET AL. 2012).

Die zerstörungsfreie Prüfung (*ZfP*), die im Englischen auch als Nondestructive Testing (*NDT*) bezeichnet wird, weist mit die höchste Verbreitung auf und stellt infolgedessen die wichtigsten Methoden und Ansätze bereit (GEVATTER 2006). Eine genaue Definition der *ZfP* gibt die Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V. (*DGZfP*) vor. Gängige Normen zur Einteilung und Beschreibung sind unter der *DIN CEN/TS 15053* zusammengefasst (*DIN 2008B*). Auch RHEINFURTH (2013) und ILSCHNER & SINGER (2005) teilen die gebräuchlichen *ZfP*-Verfahren ein. Detaillierte Ausführungen liefern MOSANDL (2005), KOCHAN (2012), NIU (2010) und BAIER (2009).

Im Gegensatz dazu werden zerstörende Verfahren zur Überprüfung vorwiegend mechanischer Kennwerte, wie bspw. des Fasergehaltes, der Dichte, des Härungsverhaltens und der scheinbaren interlaminaeren Scherfestigkeit, eingesetzt (WITTEN 2013). HUFENBACH (2007) und KOLL (2006) geben eine Übersicht über die wesentlichen zerstörenden Verfahren mit einer Beschreibung der wichtigsten Kennwerte.

Zusammengefasst bestehen zahlreiche Ansätze zur *ZfP*, wobei viele der Verfahren mittlerweile industriellen Standard erreicht haben. Die aktuellen Forschungsarbeiten in diesem Bereich befassen sich mit technischen Herausforderungen wie einer Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit und der Prüfung von Kleb- und Verbindungsstellen sowie spezieller Geometrien (REINHART 2011B;

REINHART ET AL. 2016; REINHART ET AL. 2015).

Für die Handhabung textiler Halbzeuge können nur berührende Verfahren eingesetzt werden, die keine Verschiebung der Faserstruktur bzw. Beeinträchtigung der Oberfläche verursachen. Daher werden zur prozessbegleitenden Prüfung nur zerstörungsfreie Prüfverfahren fokussiert.

Ansätze zur automatisierten Qualitätsprüfung entlang der Prozesskette

Nach der Analyse der verschiedenen Stufen der Qualitätssicherung (vgl. Abschnitt 2.3.2) sowie der Klassifizierung der wesentlichen auftretenden Fehler in Abschnitt 2.3.4 werden im Folgenden aktuelle Ansätze und Prüfverfahren entlang der Prozesskette vorgestellt. Beginnend mit der Zuschnittserstellung stellt Abbildung 2.11 am Beispiel des vorgestellten industriellen RTM-Prozesses unterschiedliche Ansätze zur automatisierten Prüfung der Halbzeuge vor, eingeteilt nach dem vorliegenden Prüfverfahren. Aufgrund der standardisierten Flecht- und Webprozesse wird die Herstellung der flächigen textilen Halbzeuge nicht betrachtet. Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens spielen neben den technischen Vor- und Nachteilen vor allem die Einsetzbarkeit für die geforderten Stückzahlen und die erzielbaren Bauteilkosten eine wesentliche Rolle. Da sich die Struktur des Prüfobjekts entlang der Prozesskette von einem flächigen hin zu einem dreidimensionalen Bauteil wandelt, ändert sich das Prüfverfahren von einer flächigen Überprüfung hin zu einer Volumenprüfung.

Zuschnittserstellung:

Das dominierende Prüfverfahren bei der Zuschnittserstellung bildet die optische Prüfung mittels Bilderfassung. Nach dem Zuschneidprozess werden die Textilien optisch geprüft (HENNING ET AL. 2008). SCHNEIDER ET AL. (2006) und THUMFART ET AL. (2013) stellen Ansätze vor, mit denen nach dem Zuschnittprozess die ebenen Textilien positionsgenau vermessen und mögliche Faserfehler und Verunreinigungen detektiert und bildtechnisch ausgewertet werden können. SCHMITT, SCHÖNBERG ET AL. (2009) zeigen eine mögliche Umsetzung mit einer roboterbasierten Sensorführung. Dabei liegt das Prüfobjekt an einer definierten Position und muss im Falle eines Ausschusses manuell oder mit einer zusätzlichen Handhabungseinheit entfernt werden.

Preformaufbau:

Die entstandene Preform, mit den drapierten Textilien, weist im Regelfall eine formstabile dreidimensionale Struktur auf, weshalb die Preformqualität einen direkten Einfluss auf die Bauteilqualität ausübt (HARPER 2006). GRUNDMANN

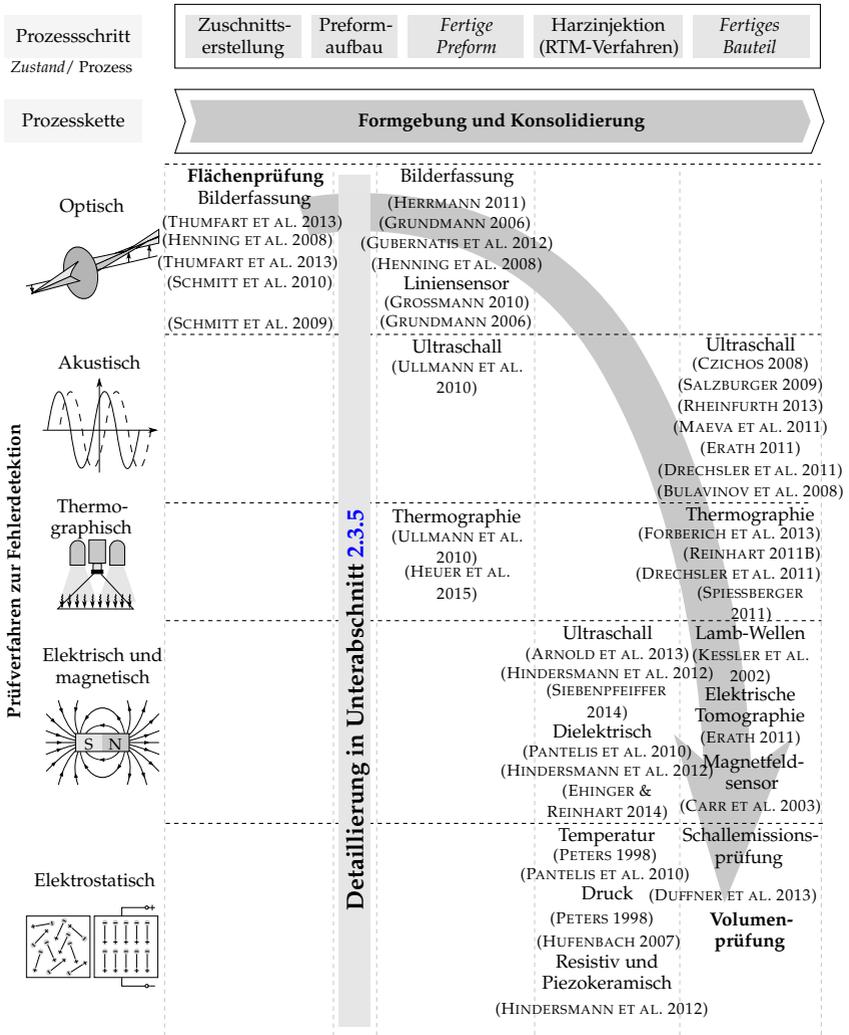


Abbildung 2.11: Ansätze zur Qualitätssicherung textiler Halbzeuge (entlang der Prozesskette)

(2006) stellt einen Ansatz zur Prüfung der Preformoberfläche auf mögliche Fehler mit einem Kamerasystem und einem Laserlichtschnittsensor vor. Bei Verwendung von Liniensensoren ergibt sich für die Prüfung durch das sequenzielle Abfahren der Oberfläche ein höherer Zeitaufwand als bei der Bilderfassung (GROSSMANN 2010).

HENNING ET AL. (2008) legt den Fokus auf die Faltenerkennung auf der Oberfläche. GROSSMANN (2010) beschreibt zudem ein Konzept zur Positionskontrolle der Preform im Werkzeug. Hierzu wird mittels einer Laserlinie und einer Kamera ein 3D-Profil der eingelegten Preform ermittelt und bei einer auftretenden Abweichung der Prozess automatisiert gestoppt. Fehler, die während des Preformprozesses aufgetreten sind, können mit den vorgestellten Ansätzen detektiert werden, sodass eine fehlerhafte Preform nicht weiter verarbeitet wird. Jedoch werden im Falle einer fehlerhaften Textillage auch die weiteren, richtig abgelegten Textilien als Ausschuss deklariert. Eine schichtweise Prüfung findet somit nicht statt.

Der Handhabungsvorgang zum Aufbau der Preform stellt den wesentlichen Bestandteil der vorliegenden Arbeit dar und wird daher detailliert in Abbildung 2.13 vorgestellt.

Fertige Preform:

Im nachfolgenden Prozessschritt wird das Matrixmaterial in die Preform eingebracht (HUFENBACH 2007). Das Fließverhalten, die Aushärtungsrate und der Aushärtungszustand stellen die wichtigsten Überwachungsgrößen in diesem Prozess dar (GRINDLING 2006). Während HINDERSMANN ET AL. (2012) eine Online-Überwachung mittels Ultraschall, kapazitiver und resistiver Sensoren sowie Piezokeramiken einsetzen, fokussieren sich ARNOLD ET AL. (2013) und SIEBENPFEIFFER (2014) auf den Einsatz kapazitiver Sensoren für die Fließfrontprüfung im Formwerkzeug. Dagegen verwenden HUFENBACH (2007) und PETERS (1998) hierfür Temperatur- und Drucksensoren. PANTELIS ET AL. (2010) untersuchen die Einsatzfähigkeit von dielektrischen Sensoren, womit eine schnelle und zerstörungsfreie Charakterisierung des Aushärtungszustands beschrieben werden kann. Neben der Fehlerdetektion und der Reduktion des nachgeschalteten Prüfaufwands erfolgt die Prüfung auch zum Einfahren der Prozesse. Die Qualitätsprüfung in der Endbearbeitung als finalem Schritt der Prozesskette unterscheidet sich prozesstechnisch wesentlich von der Formgebung und wird nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Die Prüfung fertiger Bauteile wird mittels der **ZfP** vorwiegend anhand einer Volumenprüfung durchgeführt. Die dominierenden Verfahren sind akustisch, thermographisch sowie magnetisch (CZICHOS 2008; ERATH 2011; YASHAN 2008).

REINHART & ZÄH (2010) und KARBHARI ET AL. (2005) bezeichnen die Thermographie als ein sehr wirtschaftliches Prüfverfahren mit einem hohen Potenzial für die Integration in einen automatisierten Produktions- und Prüfprozess. Im Zuge der **ZfP** werden die Verfahren oftmals gemeinsam untersucht, jedoch unterschiedliche Anwendungsfälle betrachtet (MARCIO 2005). Während DRECHSLER ET AL. (2011) und RHEINFURTH (2013) metallische Faserverbundmischbauweisen fokussieren, legen MAEVA ET AL. (2011) den Schwerpunkt auf Klebverbindungen und FORBERICH & REGNET (2013) auf fertige thermoplastische Bauteile.

BULAVINOV ET AL. (2008) verwenden die Ultraschallprüfung mit einer phasengesteuerten Gruppenantenne zur Bewertung der Schadensakkumulation, wohingegen SALZBURGER (2009) hiermit Tailored Blanks untersucht. Des Weiteren wird die **ZfP** auch für Bauteile im Betrieb und für Wartungszwecke eingesetzt (SPIESSBERGER 2011). DUFFNER ET AL. (2013) nutzen die Schallemissionsprüfung für Druckbehälter während der Fertigung und im Betrieb, um ein möglichst hohes Sicherheitsniveau zu gewährleisten. Weitere Anwendungen beschreiben CARR ET AL. (2003) und KESSLER ET AL. (2002).

Neben den vorgestellten Ansätzen existieren weitere Konzepte für Teilschritte alternativer Fertigungsverfahren. BAETZ (2013) beschreibt einen Ansatz zur Temperaturüberwachung in einem Autoklav. Für das prozesssichere thermoplastische Tapelegen setzen SCHMITT, MERSMANN ET AL. (2010) einen Laserschnittsensor ein. Dagegen untersuchen SCHRÖDER ET AL. (2011) die Integration einer Kamera in den Preformprozess beim Radialumflechtverfahren zur Detektion der Faserorientierung. Einen weiteren Ansatz verfolgen HOROSCHENKOFF ET AL. (2006), welche die Belastung im Bauteil an verschiedenen Stellen durch die manuelle Integration von Dehnungsmessstreifen (**DMS**) während des Lagenaufbaus bewerten.

Prozessübergreifende Ansätze beschreiben HENNING ET AL. (2008), GUBERNATIS ET AL. (2012) und R. SCHMITT & MERSMANN (2010), welche die Einsatzfähigkeit von Bildverarbeitungssystemen entlang der gesamten Prozesskette zur Prüfung der Faserorientierung und Oberfläche untersuchen.

Eine Gemeinsamkeit aller Verfahren ist die Prüfung in einem eigenen Prozessschritt, woraus eine Erhöhung der Prüf- und Durchlaufzeit resultiert.

2.3.5 Ansätze zur Qualitätssicherung bei der Handhabung textiler Halbzeuge

Der maßgebliche Einfluss der Preformqualität auf das spätere Bauteil erfordert eine detailliertere Betrachtung der aktuellen Ansätze zur Qualitätssicherung während des Handhabungsvorgangs zum Preformaufbau (LEOHOLD 2011). Dabei werden ausschließlich automatisierte Ansätze und Lösungen vorgestellt, wohingegen aktuell eine Vielzahl von Anwendungen im manuellen Verfahren durch Sichtprüfung nach dem Ablegen der Halbzeuge existiert (vgl. BAIER (2009), EHINGER & REINHART (2014) und WEILAND ET AL. (2015)).

Analog zu den vor- und nachgelagerten Prozessschritten wird für den fokussierten Handhabungsvorgang vorwiegend auf optische Verfahren und die daraus abgeleiteten Sensortypen zur Flächenprüfung zurückgegriffen. Daher werden zur besseren Nachvollziehbarkeit die nachfolgend beschriebenen Systeme mit Symbolen versehen, womit das zugrunde liegende Prüfverfahren charakterisiert wird (vgl. Abbildung 2.12).

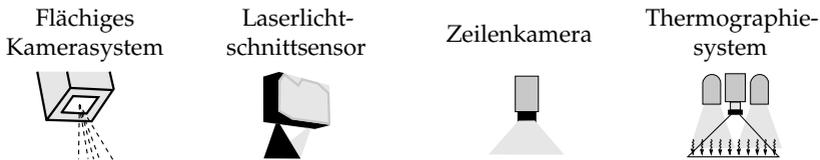


Abbildung 2.12: Optische Verfahren zur Qualitätsprüfung textiler Halbzeuge

Analog zur Einteilung des Handhabungsschrittes in Abbildung 2.2 lassen sich auch die Qualitätssicherungsansätze den einzelnen Teilschritten zuweisen. Ergänzt um den Industrialisierungsgrad werden in Abbildung 2.13 die wesentlichen Ansätze entlang der Teilfunktionen eingruppiert. Zwischen dem theoretischen Konzept und der industriell einsetzbaren Lösung wird mit dem *Forschungsprototyp* eine Zwischenstufe definiert.

HENNING ET AL. (2008) und GROSSMANN (2010) beschreiben verschiedene Konzepte zur optischen Überwachung des Rollenmaterials u. a. mittels einer Zeilenkamera zur Detektion von Fehlstellen (bspw. Webfehlern, Faserbruch und Halbzeugverzug). Im Gegensatz dazu zeigt SZIMMAT (2007) einen Ansatz zur Detektion der Textilpositionen mithilfe von Bildsensoren vor dem Aufnehmen. Diese Konzepte fokussieren den Zeitraum vor der Aufnahme des Textils durch den Greifer.

Eine Lösung zur autonomen Erkennung der Position ohne eine feste Anschlagkante beschreibt GERNGROSS (2013), in der ein Greifsystem mit integrierter

die Detektion der verschiedenen Fehlerarten an.

Nach der Textilaufnahme identifizieren HENNING ET AL. (2008) den Bedarf für den Einsatz einer Bilderkennung, womit mögliche Lagekorrekturdaten an den weiteren Prozessschritt weitergegeben werden und woraus gegebenenfalls Hinweise für die nächste Lage abgeleitet werden können.

Für den Prozessschritt nach dem Ablegen des Textils im Formwerkzeug kann eine Vielzahl möglicher Ansätze und Lösungen recherchiert werden. HENNING ET AL. (2008) und GROSSMANN (2010) beschreiben Konzepte, in denen anhand eines Bildes die Qualität des abgelegten Textils in der Form bewertet wird. Dabei liegt der Fokus auf der Einhaltung der Textilposition und des Faserwinkels. GRUNDMANN (2009) prüft die Pose der Textillage nach jedem Ablegen mit einer Kamera und einem Laserlichtschnittsensor, der in der Verlängerung des Greifers angebracht ist. Prototypische Umsetzungen finden sich bei DUFFE (2011), der ein Kamerasystem einsetzt, sowie bei SCHMIDT & DUTTA (2013), der neben einem Laserlichtschnittsensor auch ein Thermographiesystem verwendet.

HERRMANN (2011) stellt eine Lösung vor, bei der die Lage und Orientierung des Textils mit einer bildoptischen Prüfung auf einem Drehkopf nach dem Ablegen geprüft werden. Spezielle industrielle Lösungen zur Textilprüfung in der Form bieten GUBERNATIS ET AL. (2012), BOGNER (2015) sowie SÖHNCHEN & GUTTENGER (2016) an.

Alternative Ansätze zur Qualitätsprüfung während des Preformaufbaus präsentieren RHEINFURTH (2013) und GILLESPIE (2006). Durch den Einbau von Sensoren in die Struktur des Bauteils wird während des gesamten Lebenszyklus eine Bauteilprüfung durchgeführt. Die Einbringung der Sensoren kann auch im Laufe des Preformaufbaus erfolgen.

Die vorgestellten Ansätze verdeutlichen, dass vorwiegend vor und nach dem Handhabungsvorgang eine Prüfung des textilen Halbzeugs stattfindet. Entstandene Fehler während des Preformings können mit den bestehenden Ansätzen nur nach dem Ablegen in der Form detektiert werden. Bei einem aufgetretenen Fehler ist eine manuelle Korrektur notwendig, wozu [bspw.](#) die Textilposition in der Form verändert werden muss. Im Falle einer nicht möglichen Korrektur muss der Prozess unterbrochen und das abgelegte Textil manuell ausgesondert werden. Die erforderliche Korrekturzeit an einem separaten Einzelplatz steht im Widerspruch zur geforderten Minimierung der Durchlaufzeit.

Einen Ansatz zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bietet die Überprüfung des textilen Halbzeugs fertigungsnah während des Handhabungsvorgangs, wozu aktuell jedoch weder in der Forschung noch in der Industrie Lösungen vorhanden sind.

2.4 Methoden zur Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung

Neben den präsentierten Ansätzen in den verschiedenen Prozessschritten existieren unterschiedliche Konzepte und Methoden auf Prozesskettenebene, mit denen sich zum einen die Fertigung analysieren lässt und aus denen zum anderen Lösungsansätze zur Optimierung des Prozesses ableiten lassen.

Am Beispiel des Flechtprozesses stellen SCHRÖDER ET AL. (2011) eine Methodik zur Qualitätssicherung während des gesamten Produktionsprozesses vor, in der nach der Aufteilung des Gesamtprozesses eine Anforderungsdefinition erarbeitet wird. Auf die Ableitung des gewählten Prinzips sowie auf Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Lösung wird nicht explizit eingegangen.

GUBERNATIS ET AL. (2012) beschreiben eine Methodik zur Erkennung verschiedener Fehler entlang der gesamten Fertigungskette. Dabei werden optische Prüfverfahren, wie *bspw.* eine Bildanalyse oder eine Lasertriangulation, betrachtet und einbezogen. Die Einteilung der Fehler erfolgt ausschließlich abstrakt nach dem definierten Qualitätskriterium. Darauf aufbauend wird eine geeignete Messmethode gewählt.

Im Gegensatz dazu ist das Ziel der Forschungsprojekte MAI ZfP und FORCIM3A die Erarbeitung einer Methodik zur Auswahl eines geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahrens für fertige Bauteile. Es werden zwölf zerstörungsfreie Prüfmethode anhand Vergleichsmessungen miteinander verglichen. Um ein tieferes Verständnis der Prüfmethode zu bekommen, werden Berechnungen der gesamten Messkette, von der mikroskopischen Skala des Defekts bis zur makroskopischen Skala der Signaldetektion, durchgeführt (KALAFAT ET AL. 2015; KÖNIGSREUTHER 2013; KUHL ET AL. 2013; SCHORER ET AL. 2015). Im Forschungsprojekt FORCIM3A wird ebenfalls eine Methodik für den Einsatz der zerstörungsfreien Prüfung erarbeitet. Hierbei liegt der Fokus auf Mischbauweisen aus einem Faserverbundmaterial, wozu ausgewählte Referenzbauteile *u. a.* hinsichtlich ihrer Geometriemerkmale, ihres Aufbaus sowie ihrer Einsatzrandbedingungen untersucht und anschließend übertragbare Gemeinsamkeiten identifiziert werden (DRECHSLER ET AL. 2011; OBLINGER ET AL. 2016).

Mit dem Fokus auf die Integration von Sensorlösungen in einen Fertigungsprozess wird im Projekt Falcon eine Vorgehensweise entwickelt, bei der für optische Prüfverfahren nach der Analyse des Handhabungsprozesses und der Auswahl einer Bildaufnahmestrategie die Entwicklung eines optischen Inline-Prüfsystems durchgeführt wird (SCHMITT ET AL. 2008).

TREJO (2005) beschreibt ein Programm zur Prüfung von Glasfaserbauteilen anhand unterschiedlicher Verfahren. Dabei werden auch mechanische Tests durchgeführt. Auf der Basis einer manuellen Qualitätssicherung beschreibt

MARCIO (2005) ein Vorgehen zur Einhaltung aller benötigten Schritte in der Faserverbundfertigung. Losgelöst von der Faserverbundfertigung erarbeitet WELLING (1994) im Rahmen seiner Dissertation eine Methodik zur Sensorintegration in die flexible Handhabung.

2.5 Zusammenfassung und Detaillierung der Zielsetzung

2.5.1 Diskussion der vorgestellten Ansätze und Lösungen zur qualitätskonformen Handhabung

Der vorgestellte Stand der Technik und Wissenschaft gibt einen Überblick über die bestehenden Ansätze zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge. Ausgehend von den vorherrschenden Wirkprinzipien beim Greifen zeigen die fokussierten Bereiche, dass durch die Erfüllung der Teilfunktionen *Kontrollieren* und *Sichern* eine wirtschaftlich sinnvolle Automatisierung eines Handhabungsprozesses erreicht werden kann. Dazu wurden am Beispiel des automatisierten Preformaufbaus innerhalb den definierten Systemgrenzen (vgl. Abbildung 2.2) aktuelle Ansätze zur Qualitätssicherung beschrieben, bei denen an verschiedenen Stellen des Handhabungsschrittes eine Prüfung der textilen Halbzeuge stattfindet (vgl. Abbildung 2.11). Der Einsatz von Sensoren bietet dabei ein geeignetes Mittel zur Prozessüberwachung.

Den sensorbasierten Ansätzen entlang der Prozesskette liegen unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien und Sensorklassen zugrunde, mit denen verschiedene Fehler detektiert werden können. Da die Gesamtheit aller Fehler nicht mit einem einzigen Sensor abgedeckt werden kann, bietet der kombinierte Einsatz von Sensoren die einzig wirtschaftliche Option für die Fehlerdetektion (THANNER ET AL. 2010). Bezüglich des Zeitpunktes der Qualitätsprüfung werden die unmittelbare Detektion und die nachfolgende Eliminierung eines Fehlers als eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung erachtet, um Materialausschuss und Folgefehler zu vermeiden. Speziell für kostenintensive Fertigungsverfahren, wie die Faserverbundfertigung, lässt sich hiermit ein hohes Einsparpotenzial erzielen. Trotz der Vielzahl an bestehenden automatisierten Ansätzen und Lösungen gibt es aktuell kein methodisches Vorgehen, mit dem auf der Basis der auftretenden Fehler und Schwachstellen im Prozess geeignete Sensoren ausgewählt und in den Handhabungsprozess integriert werden kann.

2.5.2 Detaillierung der Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung während des automatisierten Handhabungsprozesses. Hiermit soll die anforderungsgerechte Sensorintegration zur Einhaltung der geforderten Bauteilqualität realisiert werden, womit ein Beitrag zur Durchsetzung der Kostenreduktionspotenziale von **FVW** und zur Reduktion der beschriebenen Ausschussraten geleistet werden soll. Aufgrund der speziellen Herausforderungen soll am Beispiel der Handhabung textiler Halbzeuge zum Aufbau einer Preform eine Vorgehensweise erarbeitet werden, mit der eine fertigungsnahe Online-Qualitätssicherung erreicht wird.

Neben einer Auswahlmethodik sollen Empfehlungen für die konstruktive Umsetzung des Handhabungssystems formuliert werden. Speziell für technisch anspruchsvolle Handhabungsschritte ist ein Monitoring zur Rückverfolgung und Dokumentation der Fertigung nicht ausreichend, was ein aktives Eingreifen erforderlich macht. Die erarbeiteten Ergebnisse sollen anschließend in einer Versuchsanlage prototypisch umgesetzt und einer technischen und wirtschaftlichen Validierung unterzogen werden.

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Im Anschluss an die Recherche und Einteilung bestehender Lösungsansätze zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge sowie der damit verbundenen Identifikation eines wirtschaftlichen Potenzials in Kapitel 2 wird im Folgenden die Vorgehensweise dargelegt, anhand welcher technische und sensorbasierte Maßnahmen zur Qualitätssicherung abgeleitet und damit eine Steigerung der Prozesssicherheit bei der Handhabung textiler Halbzeuge erzielt werden soll.

3.1 Anforderungen an die Vorgehensweise und Definition des Gültigkeitsbereichs

Zur Einhaltung der Allgemeingültigkeit und um eine eindeutige schrittweise Lösung sowie eine zielgerichtete Anwendung durch den Bediener zu finden, werden bestimmte Anforderungen an die Vorgehensweise definiert und nachfolgend in Anlehnung an GRUNWALD (2002) und EHINGER (2013) beschrieben. Unterteilt in allgemeine und technische Anforderungen wird daraus zur Erreichung der beschriebenen Zielstellung die Struktur der Vorgehensweise abgeleitet.

- *Allgemeine Anforderungen*
 - Ableitung standardisierter oder individueller Lösungen durch die Anwendung dynamischer und iterativer Schritte
 - Möglichkeit der Adaption auf andere Handhabungsschritte in der Faserverbundfertigung
 - Branchenübergreifender Gültigkeitsbereich in der Faserverbundproduktion für verschiedene Stückzahlen und Qualitätsanforderungen
 - Realisierung breiter Detaillierungsgrade für situations- und anwenderspezifische Lösungen

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

- *Technische Anforderungen*
 - Aufbau von Prozessverständnis mit Aufnahme der auftretenden Schwachstellen und maßgeblichen Fehlereinflüsse
 - Erarbeitung, Priorisierung und Bewertung der auftretenden Fehlergrößen
 - Anforderungsorientierte Lösungssuche unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen
 - Ableitung von Handlungsempfehlungen durch Nutzung von Standardkomponenten und Einsatz bekannter Systeme

Beispielsweise erweist sich in bestimmten Fertigungsprozessen eine 100%-Prüfung wirtschaftlich als nicht sinnvoll. Aus diesen Anforderungen wird in Abschnitt 3.2 ein detailliertes Gesamtkonzept entwickelt und zunächst allgemein beschrieben, bevor das Vorgehen in Abschnitt 3.3 detailliert für einen definierten Handhabungsschritt angewendet wird. Durch Anwendung der Methodik soll somit erreicht werden, mit einer geeigneten Sensorik an ausgewählten Positionen im Handhabungssystem die zu eliminierenden Fehler zu detektieren bzw. Aus diesem Grund muss die Methodik trotz der Erarbeitung einzelner Teillösungen ein iteratives und situationsspezifisches Vorgehen ermöglichen.

Basierend auf der Zielsetzung aus Abschnitt 2.5 sowie den definierten Anforderungen lassen sich für die Vorgehensweise folgende Fragestellungen formulieren:

1. Welche Prozessgrößen besitzen Einfluss auf die gestellten Qualitätsanforderungen?
2. Welche Schwachstellen und damit verbundenen Auswirkungen treten im Prozess auf?
3. Mit welchen sensorbasierten und technischen Teillösungen können die identifizierten Schwachstellen eliminiert werden?
4. Wie müssen die Teillösungen in den Handhabungsprozess angeordnet und integriert werden?

Zum einen gilt es, die resultierenden Fehler abhängig vom Einfluss auf den Prozess und vom Auftreten im Handhabungsvorgang zu erfassen und einzuordnen. Zum anderen ist eine Charakterisierung der Fehler notwendig, um im nächsten Schritt geeignete Maßnahmen unter Nutzung von Sensoren zu

erarbeiten. Schließlich ist eine sinnvolle Anordnung der Sensorik im Handhabungssystem zu wählen, um die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

Der Aufbau der Methodik erfordert somit ein mehrstufiges Vorgehen, um die verschiedenen Fragestellungen zu lösen. Zudem wird in Bezugnahme auf die Definition eines textilen Halbzeugs aus Abschnitt 1.5 in Tabelle 3.1 der Gültigkeitsbereich für die Handhabung textiler Halbzeuge definiert. Demnach ist das Vorgehen nicht auf die Faserverbundfertigung beschränkt, sondern lässt sich auch auf andere Anwendungen übertragen, in denen textile Halbzeuge eingesetzt werden.

Kriterium	Gültigkeitsbereich
Systemeingang	Das textile Halbzeug liegt in einer unbestimmten Position und Orientierung vor. Mögliche Strukturfehler können bereits vor dem Handhabungsschritt vorhanden sein.
Handhabungsgut	Es existieren keine Einschränkungen bezüglich der Struktur, Matrix, Geometrie und Faserart.
Systemausgang	Das textile Halbzeug wird in einer geforderten Position und Orientierung in eine mehrdimensionale Form abgelegt.

Tabelle 3.1: Festlegung des Gültigkeitsbereichs der methodischen Vorgehensweise

3.2 Methodisches Vorgehen zur qualitätskonformen Handhabung

3.2.1 Einteilung und Auswahl verschiedener Vorgehensmodelle

Ausgehend von einer Zusammenstellung und Einordnung verschiedener Vorgehensmodelle wird deren Anwendbarkeit und Adaptierbarkeit auf die beschriebene Problemstellung geprüft (vgl. Abbildung 3.1). Aufgrund des übergreifenden Aufbaus soll mit Hilfe des Modells der grundsätzliche Rahmen für die einzelnen Methodenbausteine geschaffen werden. Zudem ist die Eignung der Integration, Kompatibilität und Kombinationsfähigkeit der Modelle untereinander zu prüfen. Ein Vorgehensmodell legt den Handlungsablauf von wichtigen Elementen fest, welche die Planung und Kontrolle von Entwicklungsprozessen

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

unterstützen. Für eine umfassende Übersicht über die gängigen Navigationsmodelle wird auf die Arbeiten von LINDEMANN (2009) sowie PONN & LINDEMANN (2011) verwiesen. Vorgehensmodelle lassen sich entsprechend ihrem Auf-

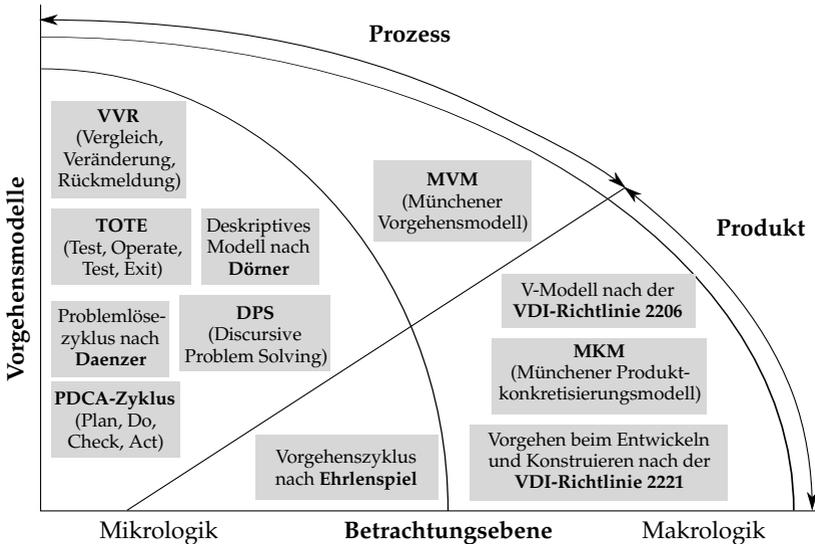


Abbildung 3.1: Einteilung von Vorgehensmodellen nach LINDEMANN (2009)

lösungsgrad unterscheiden, wodurch Vorgänge entweder auf elementarer Denk- und Handlungsebene (Mikrologik) oder auf operativer Betrachtungsebene mit größeren Arbeitsschritten (Makrologik) ablaufen können (LINDEMANN 2009). Diese Einteilung wird um die Einordnung auf das vorwiegend anzutreffende Anwendungsfeld erweitert, das je nach Szenario einen allgemeinen Prozess definiert oder die Entwicklung und Umsetzung eines Produkts beschreibt. Die Zusammenführung des *Münchener Produktkonkretisierungsmodells* (MKM) mit dem Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel bietet eine geeignete Kombination für die angewendete Vorgehensweise, da sich der Vorgehenszyklus in das **MKM** eingliedern und für die einzelnen Zielstellungen aufbauen lässt (vgl. Abbildung 1.6). Eine detaillierte Beschreibung der ausgewählten Vorgehensmodelle findet sich im Anhang unter A.2.

- Auf das *Münchener Produktkonkretisierungsmodell* wird zurückgegriffen, da es vom Abstrakten zum Konkreten hin auf vier Ebenen Freiräume zur Anwendung verschiedener Methoden ermöglicht und den Rahmen für

die einzelnen Schritte der Methodik bildet, aber dennoch einen Leitfaden für ein situationspezifisches Vorgehen bietet. Zudem lassen sich die vier Fragestellungen aus Abschnitt 3.1 auf die vier Ebenen des Modells projizieren, wodurch in jeder Ebene eine Lösung für ein Teilproblem erarbeitet wird. Die Flexibilität und der Abstraktionsgrad erlauben eine Adaption von der im Allgemeinen vorliegenden „Produktkonkretisierung“ hin zu einer „Prozesskonkretisierung“, die sich durch die Fokussierung auf einen Handhabungsvorgang ergibt.

- Der *Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel* wird angesichts der Möglichkeit gewählt, auf der Ebene der Mikrologik ein Grundmuster zur Problemlösung in drei Arbeitsschritten darzustellen. Durch den wissenschaftlichen Ansatz soll die geforderte Erzeugung der Lösungsvielfalt innerhalb der ersten zwei Arbeitsschritte und die Einschränkung im dritten Arbeitsschritt hin zu einer Lösungsauswahl unterstützt werden (EHRLENSPIEL & MEERKAM; RAGAN 2007).

3.2.2 Einführung der Methodik

Abbildung 3.2 zeigt den grundsätzlichen Rahmen und Zusammenhang der adaptierten verwendeten Vorgehensmodelle, womit der sequenzielle Ablauf der unterschiedlichen Arbeitsschritte dargestellt wird. Die chronologische

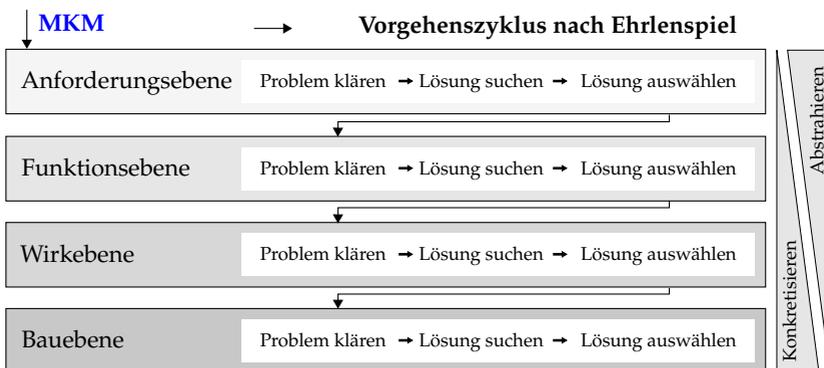


Abbildung 3.2: Kombiniertes Vorgehensmodell, zusammengesetzt aus dem Münchener Produktkonkretisierungsmodell und dem Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Reihenfolge führt ausgehend vom Abstrakten hin zum Konkreten. Der Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel ermöglicht eine durchgängige Strukturierung jeder Ebene des MKM und gewährleistet ein übersichtliches Vorgehen. Außerdem dient die Problemlösung zur konkreten Abgrenzung und Formulierung der Arbeitsschritte (EHRENSPIEL ET AL. 2005). Das Arbeitspaket *Lösung auswählen* am Ende der einzelnen Ebenen stellt jeweils die Verbindung zur nächsten Ebene her und bietet die Grundlage der weiteren Bearbeitung.

Neben der Festlegung des Rahmens für das Vorgehensmodell durch die vier Ebenen des MKM sowie durch die Kombination der Modelle auf abstrakter Ebene erfolgt die schrittweise Konkretisierung der einzelnen Methodenbausteine und eingesetzten Werkzeuge, die der Anwender für das betrachtete Handhabungsszenario durchzulaufen hat (EHRENSPIEL ET AL. 2005; PAHL ET AL. 2006). Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht über das detaillierte Vorgehen zur vollständigen Analyse des Fertigungsprozesses mit der anschließenden Identifikation und Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Einhaltung der geforderten Qualität. Zusätzlich werden die Beziehungen und Verknüpfungen untereinander visualisiert.

Die Vorgehensweise erlaubt eine flexible Anwendung auch für andere Aufgaben- sowie Problemstellungen im Rahmen des definierten Geltungsbereichs (vgl. Abschnitt 3.1). Nachfolgend werden die auf den entsprechenden Ebenen verwendeten Methoden beschrieben und zur Verdeutlichung im Fließtext in kursiver Schreibweise hervorgehoben.

3.2.3 Überblick über die einzelnen Schritte der Methodik

Anforderungsebene

Die Definition und Analyse der qualitätsrelevanten Anforderungen und Einflussgrößen bilden den Schwerpunkt der Anforderungsebene. Anforderungen gelten als die zu erreichenden qualitativen sowie quantitativen Eigenschaften des Entwicklungsobjekts und werden generell als die geforderten Ausprägungen eines Merkmals bezeichnet (vgl. Abbildung 3.4) (LINDEMANN 2009).

Eine übersichtliche Darstellung erfolgt in einer *Anforderungsliste*, in der die Anforderungen durchnummeriert und anhand von Zahlenwerten und möglichen Toleranzen quantitativ charakterisiert werden, wodurch anhand der Zahlenwerte ein Abgleich mit den äußeren Qualitätsanforderungen durchgeführt wird (EHRENSPIEL ET AL. 2005).

Anforderungen werden direkt aus der Erfüllung von geforderten Funktionen abgeleitet, wohingegen Einflussgrößen als Auswirkung auf ein System oder

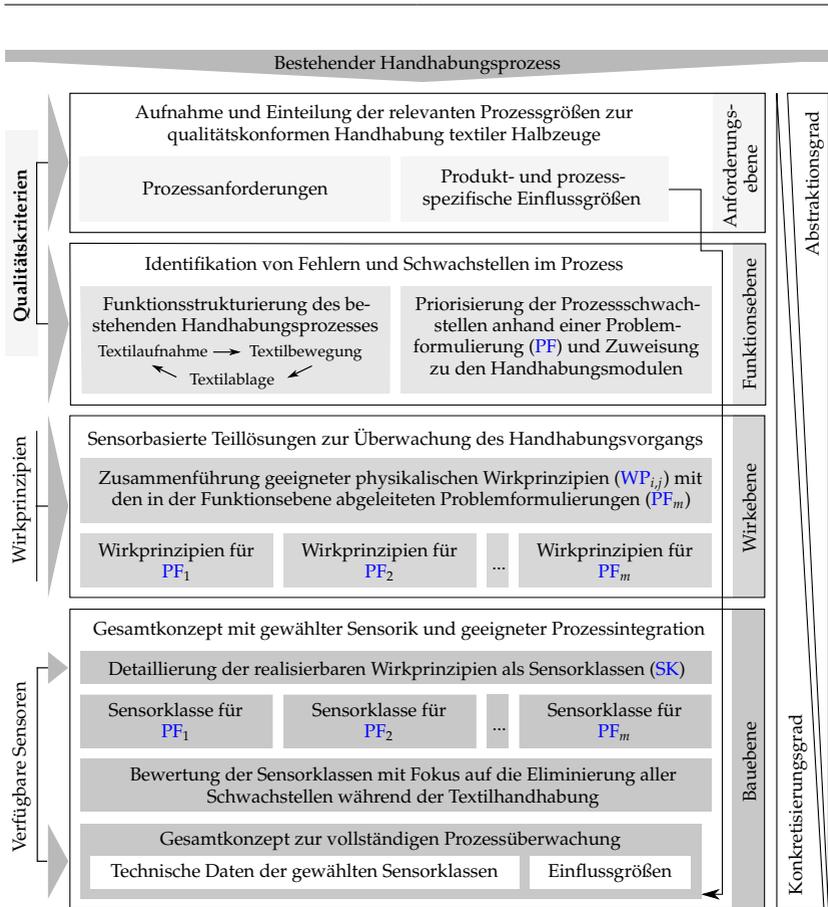


Abbildung 3.3: Methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung eines qualitätskonformen Handhabungsvorgangs (GRAF ET AL. 2016)

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

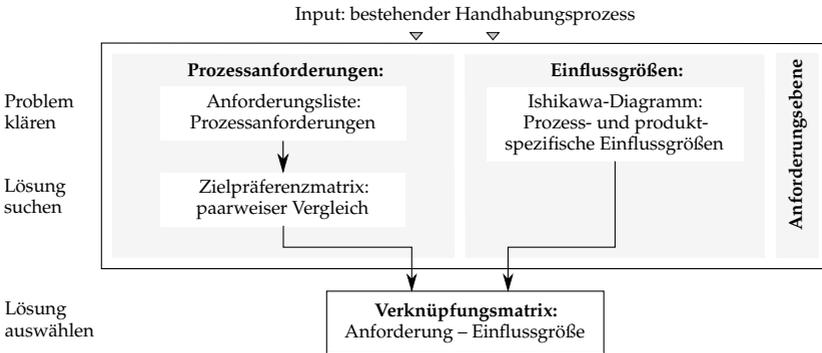


Abbildung 3.4: Aufbau und Zusammensetzung der Anforderungsebene

auf ein einzelnes Merkmal des Systems entstehen (LINDEMANN 2009). Die Bestimmung von Einflussgrößen mit ihren vielfältigen Abhängigkeiten stellt eine Herausforderung für den Entwickler dar. Mit der Konkretisierung und Detaillierung des Produktes nimmt die Anzahl der Informationen zu, was den Überblick über die wesentlichen Zusammenhänge erschwert (PONN ET AL. 2011). Anhand eines *Ishikawa-Diagramms*, das eine transparente Darstellung der Kausalzusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen ermöglicht, werden die Einflussgrößen gemäß den identifizierten Ursachen aus Produkt- und Prozesssicht eingeteilt (LINDEMANN 2009). Mit einem *Paarweisen Vergleich* zur Priorisierung der wichtigsten Anforderungen in einer *Zielpräferenzmatrix* werden die Prozessanforderungen und Einflussgrößen zu einer *Verknüpfungsmatrix* zusammengefasst und anhand der Hauptkriterien strukturiert (PONN ET AL. 2011).

Als Ergebnis der Anforderungsebene werden die allgemeinen Qualitätsanforderungen an den Handhabungsprozess in der Verknüpfungsmatrix anhand einer quantitativen Beschreibung formalisiert und für die nachfolgenden Identifikation von Prozessschwachstellen eingesetzt.

Funktionsebene

Den Aufbau der Funktionsebene zeigt Abbildung 3.5. Das Hauptziel dieser Ebene ist die umfassende Analyse des betrachteten Prozesses mit einer anschließenden Identifizierung und Ableitung von Schwachstellen im Prozessablauf.

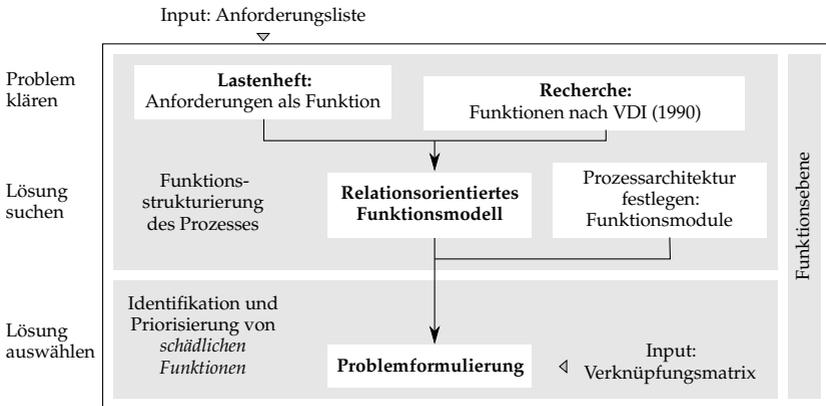


Abbildung 3.5: Aufbau und Zusammensetzung der Funktionsebene

Innerhalb der Systemgrenzen des Handhabungsprozesses existieren Strukturen und Zusammenhänge zwischen den Funktionen, die im Rahmen einer Analyse verändert werden können (LINDEMANN 2009). Die Funktionen werden aus den in Abschnitt 3.2.3 erarbeiteten Anforderungen in priorisierter Reihenfolge in einem Lastenheft zusammengefasst. Zur Einschränkung auf Anforderungen, die speziell die Handhabung betreffen, werden die relevanten Anforderungen und Funktionen herausgefiltert. „Eine Funktion ist [dabei] eine zweckorientierte, lösungsneutrale, als Operation beschriebene Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Die zu erfüllenden Hauptfunktionen werden durch Kombination eines Substantivs und eines Verbs beschrieben“ (LINDEMANN 2009).

Zur Formalisierung des vorliegenden Handhabungsprozesses wird der Gesamtprozess basierend auf den bestehenden Standardfunktionen nach VDI 2740-1 (1995) und nach VDI 2860 (1990) sowie anhand von Teilfunktionen formalisiert (GUBERNATIS ET AL. 2012; PAHL ET AL. 2006). Hierzu wird eine modifizierte relationsorientierte Funktionsmodellierung eingesetzt, die im Gegensatz zu alternativen Verfahren auf einem abstrakten Niveau verstärkt die Beziehungen der Prozessschritte untereinander beschreibt. Im Fokus stehen die Identifikation der wesentlichen Systemzusammenhänge und die Formulierung der *technischen Problemstellungen*. Innerhalb der Modellierung wird der Prozess anhand von *schädlichen Funktionen* sowie *nützlichen Funktionen* strukturiert.

Als *schädliche Funktionen* werden dabei die auftretenden unerwünschten Funktionen im Prozess bezeichnet, die im Rahmen der Modellierung formuliert

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

werden. Zusätzlich wird die Relation zu den weiteren nützlichen Funktionen mit einer graphischen Verknüpfung abgebildet (LINDEMANN 2009; TERNINKO ET AL. 2010).

Im nächsten Schritt wird das Funktionsmodell hinsichtlich der Systemzusammenhänge analysiert. Bei einer Produktarchitektur werden Beziehungsschemas zwischen der Funktionsstruktur und der physikalischen Struktur (Baustruktur) hergestellt. Übertragen auf einen Handhabungsprozess lässt sich die „Produktarchitektur“ in eine „Prozessarchitektur“ transformieren, indem Module des Fertigungsprozesses bestimmt werden, welche die unterschiedlichen Funktionen erfüllen. Ein „Prozessmodul“ ist dabei eine funktional sowie physisch beschreibbare Einheit, die von den weiteren Modulen nicht beeinflusst wird (PAHL ET AL. 2006).

Mit den Ergebnissen der *Verknüpfungsmatrix* werden die schädlichen Funktionen den einzelnen Prozessanforderungen und Modulen in Form einer *Problemformulierung* zugeordnet. Problemformulierungen lassen sich durch Sätze charakterisieren, welche „handlungsorientierten Charakter besitzen und damit die Suche nach Lösungen für das betrachtete technische Problem zielgerichtet initiieren“ (PONN ET AL. 2011).

Wirkebene

Das Ziel der Wirkebene ist die Generierung unabhängiger Lösungsansätze aus den in Abschnitt 3.2.3 definierten Problemformulierungen. Im Gegensatz zu den lösungsneutralen vorangegangenen Ebenen besteht auf der Wirkebene eine Abhängigkeit zwischen dem verwendeten textilen Halbzeug und der Teillösung. Dazu werden Wirkprinzipien basierend auf ihren physikalischen Effekten ausgewählt, nachdem sie den zu erfüllenden Messaufgaben gegenübergestellt worden sind. Die Messaufgaben ergeben sich aus den schädlichen Funktionen (PAHL ET AL. 2006). Den Aufbau der Wirkebene zeigt Abbildung 3.6.

Die Analyse berücksichtigt die schädlichen Funktionen der Funktionsebene und orientiert sich an der vierstufigen Methode der *Lösungssuche mit physikalischen Effekten*, da hiermit von der allgemeinen Basis unterschiedlicher Wirkprinzipien und einem breiten Betrachtungshorizont ausgehend Sensorlösungen erarbeitet werden. Diese Methode wird wie folgt eingesetzt (vgl. Abbildung 3.7).

1. Technische Problemstellung

Als Inputgröße werden die erarbeiteten Problemformulierungen mit den

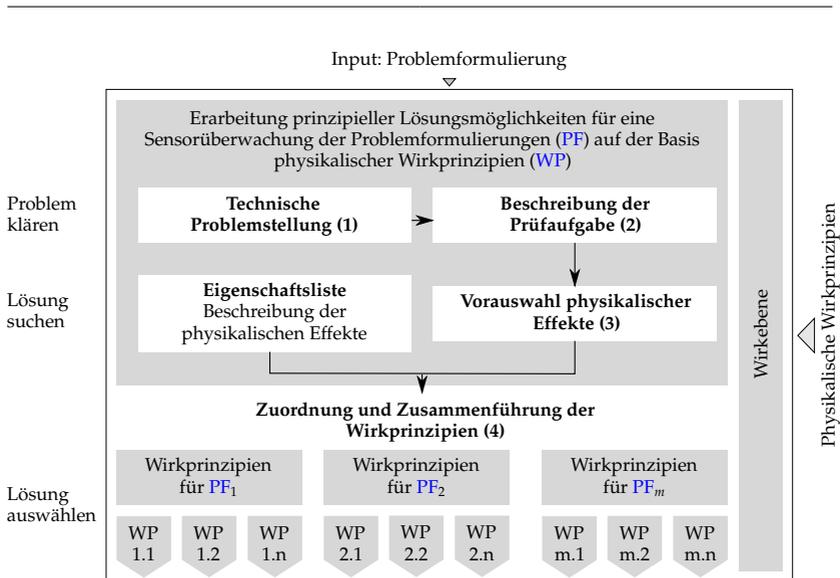


Abbildung 3.6: Aufbau und Zusammensetzung der Wirkebene

schädlichen Funktionen für jede Prozessanforderung übernommen. Zudem werden die Problemformulierungen in Abschnitte unterteilt, wofür eine Sensorlösung geeignet ist. Weitere schädliche Funktionen, wofür eine konstruktive Lösung im Handhabungssystem zur Eliminierung der Funktion notwendig ist, werden erst wieder auf der Bauebene bei der Beschreibung des Gesamtkonzepts aufgegriffen. Die Unterscheidung ist erforderlich, da die übergeordnete Vorgehensweise nicht ausschließlich Sensorlösungen fokussiert, sondern auch konstruktive Lösungen beinhaltet.

2. Beschreibung der Prüfaufgabe

Die Problemformulierungen mit den schädlichen Funktionen werden zunächst den Messaufgaben zugeordnet. Zu deren Ableitung dienen die spezifischen Messgrößen, mit denen die schädlichen Funktionen detektiert sowie kontrolliert werden können. Messgrößen sind formelmäßig bestimmbare Kennwerte, die aus physikalischen Effekten berechenbar sind, wie [bspw.](#) Temperatur oder Druck (DIN 1995). Für die jeweilige Messaufgabe erfolgt eine abstrakte Beschreibung der Problemstellung anhand eines einfachen Modells, um für die nachfolgende Gegenüber-

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

stellung der schädlichen Funktionen zu den Wirkprinzipien geeignete Bewertungskriterien zu definieren. Dadurch lassen sich die einzelnen schädlichen Funktionen auf die übergeordnete Messaufgabe zurückführen und beschreiben.

3. Vorauswahl physikalischer Effekte

Anhand einer Recherche und Beschreibung möglicher physikalischer Effekte wird deren grundsätzliche Eignung anhand der einschlägigen Literatur begründet. Potenziell geeignete Wirkprinzipien werden weiterverfolgt (PONN ET AL. 2011). Parallel dazu wird eine *Eigenschaftsliste* der geeigneten Effekte erstellt, wodurch eine Beschreibung der Funktion sowie der vorliegenden Eigenschaften erfolgt. Außerdem werden jedem Wirkprinzip nach der erfüllbaren Messaufgabe Sensorklassen zugeordnet.

4. Zuordnung und Zusammenführung der Wirkprinzipien

Abschließend werden die Voruntersuchungen der Wirkprinzipien mit den Ergebnissen der *Eigenschaftsliste* in einem *Morphologischen Kasten* zusammengeführt (vgl. Abbildung 3.7). Der *Morphologische Kasten* ist schrittweise auszufüllen, dient als Zusammenführung der ermittelten Lösungsideen und ordnet jeder schädlichen Funktion ein geeignetes Wirkprinzip zu (LINDEMANN 2009). Gesamtkonzepte lassen sich durch die Kombination verschiedener disjunkter Teillösungen generieren (PONN ET AL. 2011).

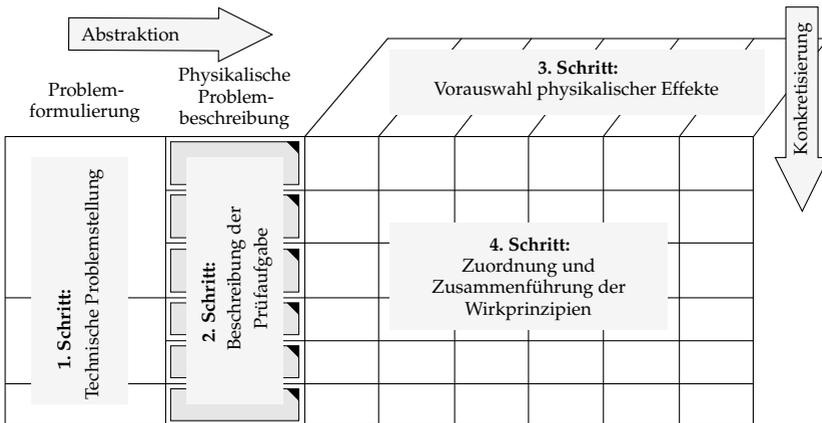


Abbildung 3.7: Aufbau des Morphologischen Kastens als Zusammenfassung der Wirkebene

Bauebene

Nach der Zuordnung geeigneter Sensorklassen unter Berücksichtigung einzelner schädlicher Funktionen wird in der finalen Bauebene ein Gesamtkonzept erarbeitet, mit dem die ausgewählten Qualitätsanforderungen übergreifend erfüllt werden können (vgl. Abbildung 3.8). Zudem werden Handlungsempfehlungen zur Integration der identifizierten Sensoren in den Prozess sowie zur Modifizierung des Handhabungssystems abgeleitet (PONN ET AL. 2011). Hiermit wird der Transfer zwischen dem theoretischen Vorgehensmodell und der anschließenden praktischen Umsetzung geschaffen.

Basierend auf den zugeordneten Wirkprinzipien aus der Wirkebene werden den schädlichen Funktionen im ersten Schritt die geeigneten Sensorklassen zugeordnet, womit für jede formulierte Problemstellung die möglichen Einzelösungen abgebildet werden.

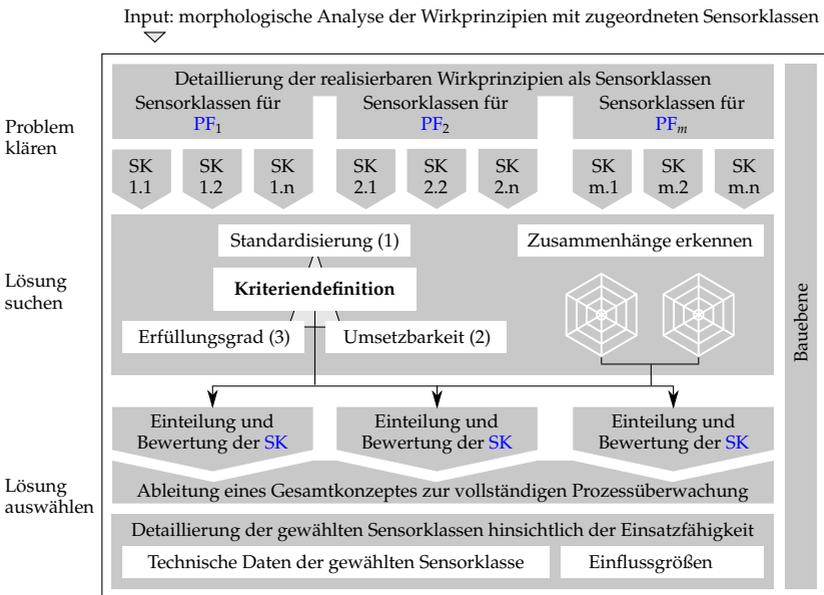


Abbildung 3.8: Aufbau und Zusammensetzung der Bauebene

Zur Auswahl und Zusammenführung der Teillösungen wird jede Sensorklasse anhand der drei Kriterien Standardisierung, technische Umsetzbarkeit und

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Erfüllungsgrad bewertet. Hiermit sollen die Sensorlösungen hinsichtlich der industriellen Reife und des Aufwands zum Einsatz, zur Integration sowie zur quantitativen Abschätzung der erfüllbaren Aufgaben untersucht werden. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung erfolgt die technische Bewertung mittels eines Netzdiagramms, wodurch auch eine qualitative Abschätzung des finanziellen Aufwands durch den Vergleich des Entwicklungsaufwands getroffen wird. Die finale Konzeptauswahl erfolgt über eine graphische Auswertung in einem Diagramm mit vier Quadranten und in Abhängigkeit von den vorliegenden Randbedingungen. Dabei werden die Ergebnisse des *Morphologischen Kastens* berücksichtigt, sodass Zielkonflikte hinsichtlich der konstruktiven Umsetzung frühzeitig erkannt werden.

Zur Detaillierung des erhaltenen Gesamtkonzepts werden die gewählten Sensor-
klassen anhand eines Kriterienkatalogs näher beschrieben und Empfehlungen für die Wahl des geeigneten Sensors gegeben. Neben den allgemeinen Kriterien werden auch spezielle Informationen berücksichtigt, die sich abhängig von den schädlichen Funktionen ergeben. Zudem werden die qualitätsrelevanten Einflussgrößen aus Abschnitt 3.2.3 wieder aufgenommen, die die Anforderungen direkt beeinflussen. Auf dieser Basis erarbeitet der Anwender für den betrachteten Handhabungsprozess nach Durchlauf der Methodik eine Gesamtlösung zur Einhaltung der in Abschnitt 3.2.3 definierten Anforderungen an die Prozessqualität, deren Umsetzung im nachfolgenden Schritt durchgeführt wird.

3.3 Detaillierte Beschreibung und Anwendung der Methodik

In diesem Abschnitt wird die entworfene Vorgehensweise anhand des Handhabungsvorgangs textiler Halbzeuge zum Preformaufbau angewendet. Die detaillierte Beschreibung des Szenarios anhand des Prozessablaufs und der Spezifikation des Handhabungsguts wird in Abschnitt 3.3.1 durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse der vier Ebenen beschrieben.

3.3.1 Beschreibung des Handhabungsszenarios

Gemäß der festgelegten Systemgrenzen aus Abschnitt 2.2.1 erstreckt sich das betrachtete Szenario aktuell über die gesonderten Vorgänge des Absortierens der Textilien nach dem Zuschnittprozess bis hin zum Drapieren der textilen Halbzeuge in die Ablageform, die im anschließenden Prozessschritt mit Harz

infiltriert wird (vgl. Abbildung 3.9). Bei der Textilaufnahme werden die benötigten konturvarianten Textilien zweidimensional selektiv aufgenommen. Nach einer definierten Verweilzeit zur Ausübung der Saugkraft auf das Textil und dem anschließenden geschwindigkeitsreduzierten Anfahren des Aufnahmetisches wird das Textil zur Zwischenablage transportiert, auf der die Halbzeuge vereinzelt für den nachfolgenden Drapierprozess positioniert werden. An die

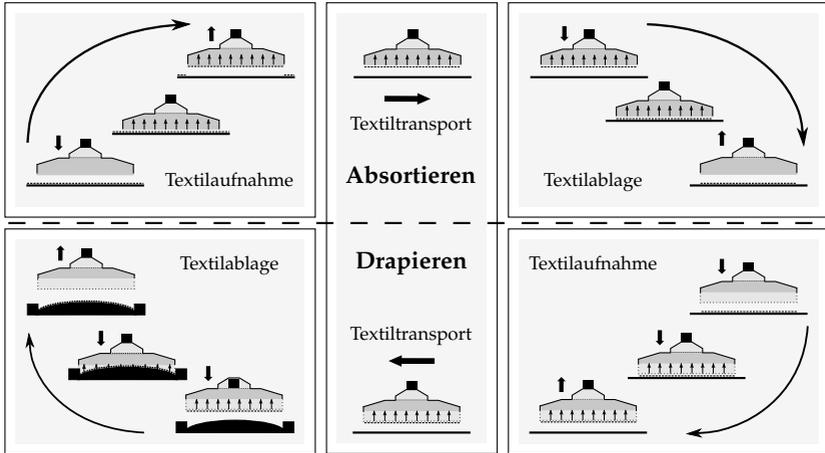


Abbildung 3.9: Sequenzieller Ablauf des Handhabungsvorgangs mit den Teilschritten Absortieren und Drapieren

Textilablage schließt sich das Drapieren an. In diesem Teilschritt wird das Textil in die dreidimensionale Form abgelegt und umgeformt.

Dem Handhabungssystem liegt als Greifprinzip das Prinzip des Niederdruckflächensaugens zugrunde, das sich als ein sehr geeignetes Verfahren für formlabile technische Textilien erwiesen hat (GRAF ET AL. 2013; STRASSER 2012). Das Greifprinzip wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht variiert, jedoch bedingt die Funktionsintegration eine Adaption.

Aufgrund der divergent erfüllbaren Teilaufgaben werden die beiden Teilschritte aktuell separat mit verschiedenen Handhabungssystemen realisiert. Im bestehenden Szenario erfolgt keine Prüfung und Überwachung der Prozesse.

Tabelle 3.2 zeigt das verwendete unidirektionale Gewebe, dessen Struktur einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse, vorwiegend auf der Wirkebene, ausübt.

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Kennzeichnung des textilen Halbzeugs:		Prinzipskizze:
Halbzeugtyp:	Gewebe	
Faserorientierung:	Unidirektional (UD)	
Flächengewicht:	200 g/m ²	
Faserlänge:	Endlofaser (> 50 mm)	
Kennzeichnung der Carbonfaser T700S C - 12000 50 C:		
Garnfeinheit [tex]	Fadenzahl: 5 x 5	
Kette: 200 Schuss: 10		
Titeranzahl: 200 tex	Verdrillung: Twisted yarn	
Filamentanzahl: 3 k	Fasertyp: CF	

Tabelle 3.2: Charakterisierung des verwendeten textilen Halbzeugs

3.3.2 Aufnahme und Detaillierung der relevanten Prozessgrößen

Nach der Identifikation der wirkenden Einflussgrößen werden im Anschluss die gestellten Anforderungen an den Handhabungsprozess definiert. In Abbildung 3.10 werden zunächst als übergeordnete Struktur die Hauptkriterien zur Einteilung der Einflussgrößen eines Handhabungsvorgangs aufgeführt, die für eine weitere Betrachtung konkretisiert werden (BÖCK 2013).

Die Einflussgrößen resultieren aus einer Analyse des Handhabungsprozesses, wobei eine Checkliste nach PONN & LINDEMANN (2011) eingesetzt wird. Hiermit wird die Zusammenstellung der wesentlichen Hauptmerkmale technischer Produkte sichergestellt. Außerdem ist die Betrachtung des zu fertigenden Produktes, das im vorliegenden Fall die Preform der abgelegten Textilien darstellt, die Grundvoraussetzung für die Prozessanalyse sowie für die Prozessplanung. Zur Einteilung und Clusterung der Einflussgrößen existieren verschiedene Ansätze (WITTEN 2013). STRASSER (2012) unterteilt die Einflussgrößen in produkt-, prozess- sowie materialspezifische Größen. Da in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf dem Handhabungsprozess und den durch das Produkt gestellten Anforderungen liegt, werden die Hauptkriterien in prozessspezifische und produktspezifische Kriterien unterteilt. Die materialspezifischen Größen werden als Unterkategorie der produktspezifischen Größen geführt.

Prozessspezifische Einflussgrößen

Abbildung 3.11 veranschaulicht anhand eines Ishikawa-Diagramms einen Ausschnitt der prozessspezifischen Einflussgrößen (vollständige Zusammenstel-

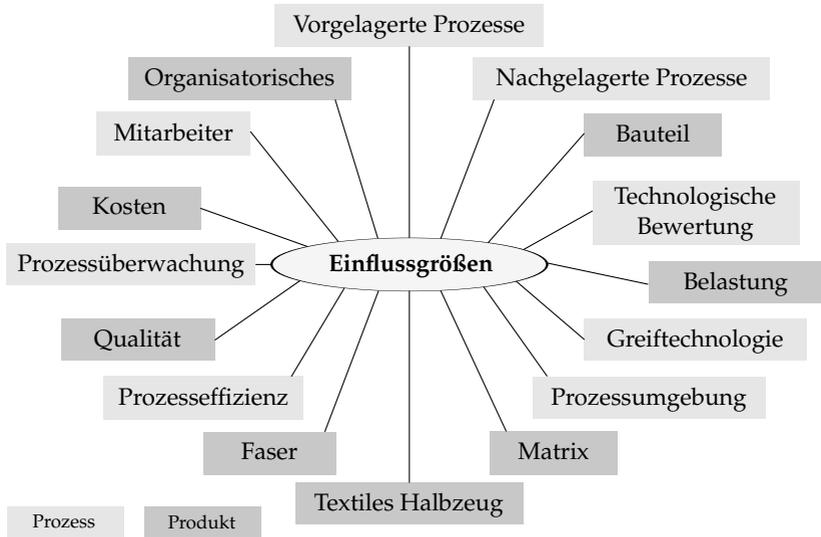


Abbildung 3.10: Hauptkriterien zur Einordnung der Einflussgrößen bei der Handhabung textiler Halbzeuge

lung siehe Abbildung A.6 im Anhang). Abhängig von der Prozesskette können unterschiedliche vor- und nachgelagerte Prozessschritte Auswirkungen auf das betrachtete Szenario aufweisen. Somit konkretisieren die aufgeführten Größen gleichzeitig die Randbedingungen und die Systemabgrenzung und dienen als Kriterien zur Beschreibung der Leistungsmerkmale eines Produktionsprozesses (bspw. die Taktzeit und Verfügbarkeit als Größen zur Charakterisierung der Prozesseffizienz). Neben der direkten Zugehörigkeit der Unterkriterien zu den Übergrößen existieren auch Querverbindungen untereinander. So ist die notwendige Leistungsfähigkeit des Greifers bspw. abhängig von den Zykluszeiten der unterschiedlichen Prozesspfade.

Nach der Zusammenstellung werden die wesentlichen Größen, die Einfluss auf die geforderte Aufgabenstellung haben, in einer Vorauswahl farblich abgesetzt. So besitzt bspw. die mechanische Nachbearbeitung als Einflussgröße im nachgelagerten Prozess keinen Einfluss auf die Prozesssicherheit des Handhabungsvorgangs.

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

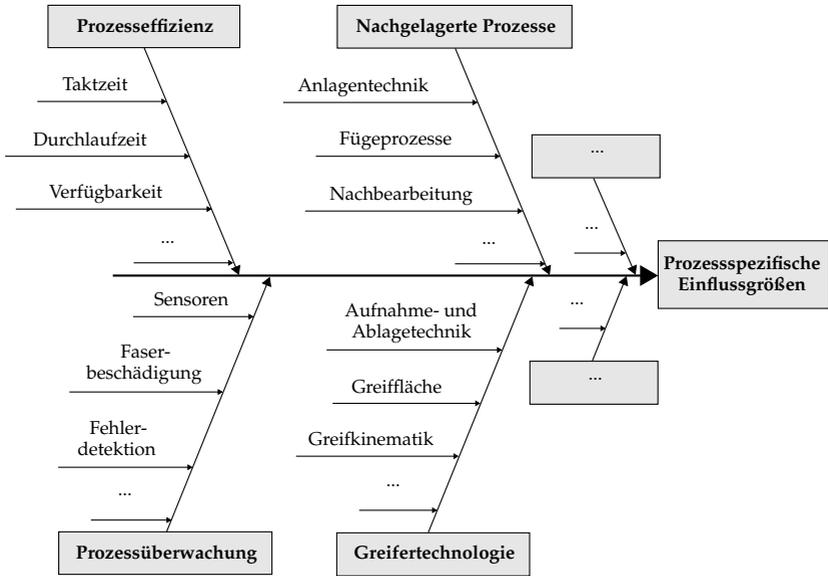


Abbildung 3.11: Auswahl und Strukturierung prozessspezifischer Einflussgrößen

Produktspezifische Einflussgrößen

Analog zu den prozessspezifischen Größen stellen die produktspezifischen Merkmale für die Prozessanalyse essenzielle Größen dar, die auf den Handhabungsprozess sowohl einwirken als auch von diesem beeinflusst werden (vollständige Abbildung siehe Anhang A.5). Als Recherchequellen für die Unterkriterien dienen die Sammlungen produktionsumfeldbezogener Eigenschaften von BÖCK (2013), MATTMANN ET AL. (2015) sowie STRASSER (2012), in denen die Reihenfolge des Produktionsablaufes, der Vorbereitungsaufwand der Produktion, die räumliche Anordnung, die Flexibilität sowie der Automatisierungsgrad festgelegt werden. Ergänzt werden diese Eigenschaften um primäre, sekundäre sowie organisatorische Einheiten (BÖCK 2013). STRASSER (2012) betont besonders die geforderte Produktqualität, welche maßgebend für den weiteren Verarbeitungsprozess ist. Neben den aus den Produkteigenschaften abgeleiteten Größen, wie den geometrischen Abmessungen, stellt die Übersicht über die materialspezifischen Größen, wie Faser- und Matrixmaterial, sowie der Aufbau des textilen Halbzeugs eine wichtige Basis für die folgenden Schritt-

te dar. Da im Gegensatz zu STRASSER (2012) in der vorliegenden Arbeit der Hauptfokus nicht auf den mechanischen Kennwerten und Eigenschaften des zu handhabenden Materials liegt, erfolgt keine separate Klassifizierung. Für eine ausführliche Abhandlung der materialspezifischen Einflussgrößen wird auf WITTEN (2013) verwiesen.

Prozessanforderungen

Die Anforderungsklä rung als weiterer wesentlicher Teil der Prozessanalyse findet auf der Basis des vorliegenden Handhabungsprozesses und der gestellten Anforderungen an die Fertigung des Bauteils statt. Zur Einordnung und Clusterung wird die Einteilung in die Kategorien Funktionalität, Leistungsfähigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit von STRASSER (2012) übernommen. In der vorliegenden Arbeit werden die folgenden Prozessanforderungen festgelegt, die im Rahmen eines Projektes mit Partnern aus unterschiedlichen industriellen Bereichen gemeinsam als zielführend identifiziert werden. Eine vertiefte Darstellung aller wesentlichen Anforderungen und der zugehörigen Kategorien, findet sich, mit Zahlenwerten hinterlegt, in Tabelle A.1 im Anhang.

Nr.	Prozessanforderung	Kategorie	Anteil
1	Sicheres Halten	Funktionalität	11,94 %
2	Positioniergenauigkeit	Qualität	10,36 %
3	Definierte Aufnahme des Textils	Qualität	9,32 %
4	Definierte Verformung der Wirkfläche	Qualität	8,77 %
5	Zuverlässige Kontrolle	Funktionalität	6,42 %
6	Fehlerausregelung	Funktionalität	5,39 %
7	Geringer Ausschuss	Wirtschaftlichkeit	5,20 %
8	Unversehrtheit des Textils	Qualität	4,68 %
9	Integrierbarkeit	Funktionalität	4,39 %

Tabelle 3.3: Rangfolge der gewichteten Prozessanforderungen, ermittelt durch eine Zielpräferenzmatrix

Die Priorisierung der wichtigsten Anforderungen erfolgt durch einen Paarweisen Vergleich in der *Zielpräferenzmatrix* aus Sicht des Anwenders (vgl. Tabelle 3.3). Die *Verknüpfungsmatrix* führt die identifizierten Einflussgrößen sowie Prozessanforderungen anhand einer gewichteten Bewertung zusammen. Dabei ist die Frage zu beantworten, mit welcher Intensität sich die Einflussgrößen

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

a und die Prozessanforderung b gegenseitig beeinflussen. Die einzelnen Zellen werden entweder mit „0“ (keine gegenseitige Beeinflussung), „1“ (geringe gegenseitige Beeinflussung) oder „2“ (hohe gegenseitige Beeinflussung) ausgefüllt. Die vollständige Matrix, in der die quantitativen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen und Prozessanforderungen identifiziert werden, wird in den Tabellen A.2 und A.3 im Anhang vorgestellt. Nach Ableitung der Sensorlösungen für die jeweiligen Anforderungen werden die Wechselwirkungen auf der Bauebene wieder aufgenommen und zur Detaillierung des Gesamtkonzepts eingesetzt.

3.3.3 Identifikation von Fehlern und Schwachstellen im Prozess

Auf der Funktionsebene werden die möglichen Schwachstellen und Fehler aus der Funktionsstrukturierung des Handhabungsprozesses abgeleitet. Zunächst erfolgt die abstrakte Formulierung einer Gesamtfunktion als Zielstellung. Für das vorliegende Handhabungsszenario wird in Abbildung 3.12 die Erhöhung der Prozesssicherheit und Einhaltung der Qualitätsanforderungen als wesentliches Ziel formuliert, das mithilfe der Hauptaufgabe Sensorintegration erreicht werden soll.

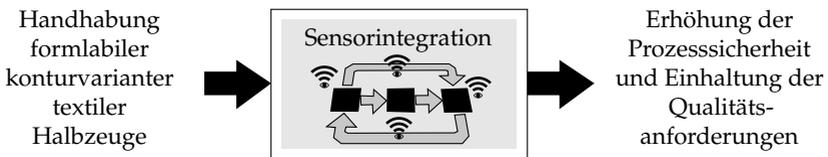


Abbildung 3.12: Abstrakte Beschreibung der Gesamtaufgabe

Mit der in Tabelle A.1 erarbeiteten *Anforderungsliste* im Anhang werden für jede Anforderung die abhängigen Funktionen formuliert und in einem *Lastenheft* gesammelt. Einen Ausschnitt der nach Priorisierung angeordneten Funktionen zeigt Tabelle 3.4, die gesamte Funktionsformulierung ist im Anhang in Tabelle A.4 beschrieben (DIN 2009).

Nr.	Prozessanforderung	Abgeleitete Funktion	K1	K2
1	Sicheres Halten	Unabhängig von Luftdurchlässigkeit und Flächengewicht das textile Halbzeug sicher halten	X	X
2	Positioniergenauigkeit	Das textile Halbzeug positionsgenau in die Form ablegen	X	X
3	Definierte Aufnahme des Textils	Das textile Halbzeug gleichmäßig und mit flächiger Krafteinleitung greifen	X	X
4	Definierte Verformung der Wirkfläche	Die Wirkfläche im benötigten minimalen Umformgrad definiert an die Form anpassen	X	X
5	Zuverlässige Kontrolle	Die eingesetzten Prüfmittel zur Kontrolle der Qualität zuverlässig verwenden	X	X

Tabelle 3.4: Ausschnitt des Lastenhefts zur Beschreibung und Charakterisierung der Prozessanforderungen

Zusätzlich erfolgt die Bewertung anhand von zwei Kriterien, womit die speziellen für die Handhabung erforderlichen Anforderungen herausgefiltert werden:

- *Kriterium 1 (K1):* hinreichende Anforderung
- *Kriterium 2 (K2):* notwendige Anforderung

Nachfolgend werden nur solche Anforderungen verfolgt, die beide Kriterien erfüllen. Parallel zur Funktionsformulierung erfolgt die Prozessanalyse. Hierzu werden die einzelnen Teilschritte des Prozesses in zeitlich richtiger Abfolge funktionalisiert, wobei alle Funktionen innerhalb der Systemgrenzen aus dem *Lastenheft* berücksichtigt werden und gleichzeitig die einzelnen Prozessabschnitte aus den standardisierten Funktionen der VDI-Richtlinien 2860 und 2740 gebildet werden (DIN 2002; VDI 1990).

Da eine Vielzahl der Teilfunktionen direkt dem Handhabungsprozess entnommen werden kann, werden zunächst mögliche Teilfunktionen durch die Funktionsstrukturierung den einzelnen Komponenten des Systems zugeordnet, um die Kausalitätsbeziehungen zwischen den einzelnen Funktionen zu definieren (vgl. Abbildung A.8 im Anhang). Mit diesen Vorarbeiten wird das *Relationsorientierte Funktionsmodell* des Handhabungsprozesses erstellt. Dabei werden die singulären Prozessschritte mit *nützlichen* sowie *schädlichen Funktionen* beschrieben. Die *schädlichen Funktionen* stellen Schwachstellen dar, welche detektiert und eliminiert bzw. vermieden werden sollen. Die Verknüpfung erfolgt dabei mit den Teilbefehlen „wird benötigt für“, „verursacht“ sowie „wurde eingeführt,

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

um zu vermeiden“ (PONN ET AL. 2011). Die Hauptfunktion *Faserverbundtextilien handhaben* beinhaltet folgende drei Funktionen:

- Faserverbundtextil aufnehmen
- Faserverbundtextil bewegen
- Faserverbundtextil ablegen

Das vollständige Funktionsmodell zeigt Abbildung A.7 im Anhang. Im Anschluss an die Funktionsmodellierung wird die Prozessarchitektur bestimmt. Dabei erfolgt die inhaltliche Zuordnung der Funktionen zu ihren entsprechenden Funktionsträgern, den Modulen. Bei der Einteilung ist darauf zu achten, dass eine Funktion auch zwei Module betreffen kann. Abbildung 3.13 zeigt den Zusammenhang zwischen den identifizierten schädlichen Funktionen und den Modulen, in denen sie auftreten.

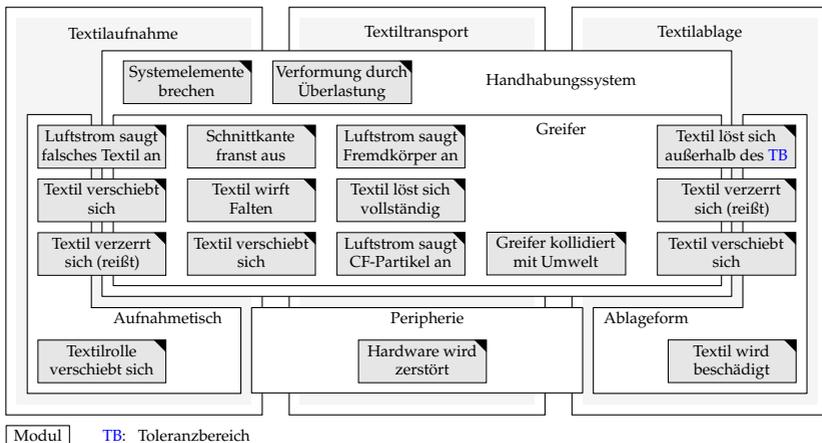


Abbildung 3.13: Auftreten der schädlichen Funktionen in den Modulen des Handhabungsszenarios

Der Greifer als Teil des Handhabungssystems tangiert eine Vielzahl schädlicher Funktionen. So können das vollständige Lösen des Textils sowie Kollisionen auf den Greifer zurückgeführt werden. Im abschließenden Schritt der Funktionsebene werden die schädlichen Funktionen mit ihren Modulen den jeweiligen

Prozessanforderungen zugeordnet. Zur Fokussierung auf die wichtigsten Anforderungen werden nur die wesentlichen Anforderungen aus der *Zielpräferenzmatrix* betrachtet (vgl. Tabelle 3.3). Die Problemformulierungen als Ergebnis der Ebene fassen die priorisierten Anforderungen, beteiligten Module und Fehler zusammen, wobei die schädlichen Funktionen voneinander unabhängige Elemente darstellen (vgl. Tabelle 3.5). Sowohl die Module als auch die schädlichen Funktionen lassen sich gleichzeitig mehreren Anforderungen zuordnen.

Prozessanforderung	Funktionalität Sicheres Halten	Qualität Positioniergenauigkeit	Qualität Definierte Aufnahme des Textils	Qualität Definierte Verformung der WF	Funktionalität Zuverlässige Kontrolle
Modul	Greifer	Aufnahmetisch Ablageform	Aufnahmetisch Greifer	Greifer Ablageform	Handhabungssystem Peripherie
Schädliche Funktion	Textil löst sich vollständig	Textil verschiebt sich	Luftstrom saugt falsches Textil an	Textil verzerrt sich (reißt)	Systemelemente brechen
	Textil wirft Falten	Textilrolle verschiebt sich	Schnittkante franst aus	Textil wirft Falten	Verformung durch Überlastung
		Textil löst sich außerhalb des TB	Luftstrom saugt CF-Partikel an	Textil wird beschädigt	Hardware wird zerstört
					Greifer kollidiert mit Umwelt
Problemformulierung (PF)	Kontrolle, ob das Halbzeug sicher am Greifer gehalten wird	Kontrolle, ob das Halbzeug positionsgenau in die Ablageform abgelegt wird	Kontrolle, ob das Halbzeug definiert aufgenommen wird	Kontrolle, ob das Halbzeug definiert auf der (WF) des Greifers verformt werden kann	Kontrolle, ob die einwandfreie Funktionalität des Greifsystems sichergestellt werden kann

Tabelle 3.5: Problemformulierung als Zusammenfassung der Prozessanforderungen und der schädlichen Funktionen

Im nächsten Schritt ist es notwendig, geeignete Sensorlösungen zur Kontrolle der schädlichen Funktionen zu bestimmen. Die Beschreibung hierzu erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

3.3.4 Erarbeitung sensorbasierter Teillösungen

Das Ziel der Wirkebene ist die Erarbeitung einzelner Lösungen für jede Problemformulierung. Im Gegensatz zur allgemein durchführbaren Anforderungsanalyse und Funktionsstrukturierung findet auf der Wirkebene ein Übergang von einer lösungsneutralen zu einer anwendungsspezifischen Ergebnisfindung

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

statt, die abhängig von den Eigenschaften des textilen Halbzeugs ist. Die Ebene wird gemäß den beschriebenen Schritten aus Abbildung 3.6 durchlaufen.

Technische Problemstellung

Ein Teil der Problemformulierungen aus der Funktionsebene, mit denen konstruktive und mechanische Verbesserungen des Handhabungssystems adressiert werden, kann nicht durch eine Sensorlösung gelöst werden und wird auf der Bauebene durch die Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des Handhabungssystems wieder aufgegriffen (vgl. Problemformulierung 5 – *Zuverlässige Kontrolle*). Für das vorliegende Szenario zeigt Tabelle 3.5 die Aufstellung lediglich der schädlichen Funktionen, die über eine Sensorlösung eliminiert werden können. Die Entscheidungsfindung wurde durch die Zuordnung der schädlichen Funktionen zu den Modulen unterstützt.

Beschreibung der Prüfaufgabe

Als vorgelagerter Schritt zur Auswahl einer Sensorlösung werden in Tabelle 3.6 die Messaufgaben definiert, in welche sich die schädlichen Funktionen einordnen lassen.

PF	Schädliche Funktionen			Messaufgabe des Sensors			
				Kontur	Beschädigung	Fremdkörper	Prozess
1	Textil löst sich vollständig	Textil wirft Falten		X			X
2	Textil verschiebt sich	Textilrolle verschiebt sich	Textil löst sich außerhalb des TB	X			X
3	Luftstrom saugt falsches Textil an	Schnittkante franst aus	Luftstrom saugt CF-Partikel an	X	X	X	X
4	Textil verzerrt sich (reißt)	Textil wirft Falten	Textil wird beschädigt	X	X		
5	Für PF 5 existiert keine Sensorlösung, sondern sie spielt eine wesentliche Rolle bei der Greiferumsetzung.						

Tabelle 3.6: Identifizierung und Klassifizierung der Messaufgaben

Neben den möglichen Fehlern spielt die Wahl des in Abschnitt 3.3.1 definierten Materials eine maßgebliche Rolle. Zu dessen Auswahl wird jede schädliche Funktion auf eine Messaufgabe zurückgeführt, die abhängig von der

Problemformulierung ausgewählt wird. Im vorliegenden Szenario werden alle Messaufgaben adressiert, wobei die Prüfung der Kontur in allen Problemformulierungen notwendig ist. Unter der Messaufgabe *Prozess* werden alle Schritte zur Aufrechterhaltung des Handhabungsprozesses zusammengefasst, womit *bspw.* die Überwachung der Anwesenheit des Handhabungsguts am Greifsystem gewährleistet wird. Nach Auswahl und Zuordnung der Messaufgaben ist für die nachfolgende Auswahl geeigneter Systeme eine physikalische Beschreibung der Aufgaben notwendig. In Anlehnung an PONN & LINDEMANN (2011) zeigt Tabelle 3.7 für das Beispiel der Messaufgabe *Prozess* die Formulierung der technischen Problemstellung und die daraus abgeleitete Beschreibung des Problems (vollständige Liste siehe A.5 im Anhang).

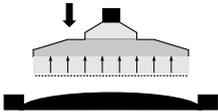
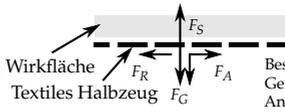
Messaufgabe	Einhaltung der Prozessfähigkeit
<p>Technische Problemstellung</p>  <p>Prozessbedingte Unterbrechungen an der Wirkfläche des Greifers</p>	<p>Physikalische Beschreibung des Problems</p>  <p>Wirkfläche Textiles Halbzeug</p> <p> F_R F_G F_A F_S </p> <p> Beschleunigungskraft F_A Gewichtskraft F_G Ansaugkraft F_S Reibungskraft F_R </p> <p>Detektion prozessbedingter Unterbrechungen an der Wirkfläche des Greifers</p>

Tabelle 3.7: Technische und physikalische Beschreibung der Messaufgabe am Beispiel der Einhaltung der Prozessfähigkeit

Als Messaufgabe sollen prozessbedingte Unterbrechungen vermieden werden, die sich auf der Wirkfläche des Greifers äußern. Bezogen auf die physikalische Beschreibung des Problems leitet sich daraus eine Untersuchung der Kräfteverhältnisse auf der Wirkfläche ab.

Vorauswahl physikalischer Effekte

Aufgrund der Vielzahl möglicher physikalischer Effekte (vgl. Abschnitt 2.3.3) werden nur die auf den Handhabungsprozess übertragbaren Effekte in den nachfolgenden Untersuchungen weiterverfolgt (EHRENSPIEL ET AL. 2005; HERING 2012; HESSE ET AL. 2011; KOLLER ET AL. 1994). Als Voraussetzung für die Eignung eines Effekts müssen die beiden Hauptkriterien Nutzbarkeit und Anwendbarkeit erfüllt werden. Außerdem muss mindestens ein Nebenkriterium eingehalten werden, das sich direkt aus den Messaufgaben aus Tabelle 3.6 ergibt. Während sich aus dem Kriterium der *Nutzbarkeit* die Eignung des

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Effekte für das gewählte textile Halbzeug ergibt, werden unter der *Anwendbarkeit* Aspekte wie die realisierbare Prüfzeit zusammengefasst. Tabelle 3.8 zeigt einen Ausschnitt des bewerteten Ergebnisses mit den geeigneten Effekten. Eine vollständige Bewertung aller betrachteten Effekte mit Begründung und Verweis auf weitergehende Literatur findet sich im Anhang in Tabelle A.6 (REINHART ET AL. 2015).

Physikalischer Effekt	Auswahlkriterien						
	Kontur	Beschädigung	Fremdkörper	Prozess	Nutzbarkeit	Anwendbarkeit	Entscheidung
Wirbelstrom	-	+	-	+	+	+	✓
Kapazitiv	-	-	-	+	+	+	✓
Induktiv	-	-	-	+	+	+	✓
Piezoelektrisch	-	+	-	+	+	+	✓
Pyroelektrisch	+	-	-	+	+	+	✓
Fotoelektrisch	+	+	+	+	+	+	✓
Elektrooptisch	+	+	+	+	+	+	✓
Spezifischer Widerstand	+	+	+	+	+	+	✓
Magneto-resistiv	-	-	-	+	+	+	✓
Thermoelektrisch	-	+	+	-	+	+	✓
Thermowiderstand	+	+	+	+	+	+	✓

Legende: + geeignet - nicht geeignet ✓ positive Entscheidung

Tabelle 3.8: Analyse und Bewertung physikalischer Effekte hinsichtlich der Qualitätssicherung textiler Halbzeuge (HERING 2012)

Die Übersicht über die einsetzbaren physikalischen Wirkprinzipien bildet ein wesentliches Element für die weitere Vorgehensweise. Zur Detaillierung werden die ausgewählten Effekte anhand unterschiedlicher Kriterien in einer *Eigenschaftsliste* beschrieben (vgl. HESSE & SCHNELL (2011) und HERING (2012)). Tabelle 3.9 zeigt am Beispiel des fotoelektrischen Effekts einen Auszug aus der *Eigenschaftsliste*. Neben der Funktionsweise und der Messaufgabe lassen sich unterschiedliche Prüfmechanismen (punktförmig, linienförmig und flächig) definieren, die durch die Funktionsweise des Effekts bedingt sind. Je nach existierendem Prüfmodus werden die Sensorklassen zugeordnet, die nachfolgend für die weitere Detaillierung und Zuordnung verwendet werden. Für den fotoelektrischen Effekt liegen bspw. drei Sensorklassen vor. Ergänzt werden die Sensorklassen um industriell verfügbare und einsetzbare Sensoren sowie um das Anwendungsgebiet, damit ein ausreichender Informationsbestand für die spätere Auswahl der Sensoren und ein Bezug auf die physikalischen Effekten geschaffen werden kann.

Die vollständige Eigenschaftsliste aller geeigneten Effekte befindet sich im Anhang in den Tabellen A.7 bis A.9.

Fotoelektrischer Effekt	Funktionsweise: Beim fotoelektrischen Effekt wird Lichtenergie bzw. ein Photon von einem Elektron absorbiert wodurch das Elektron aus seiner Bindung gelöst wird. Es wird zwischen dem äußeren und dem inneren Fotoeffekt, sowie der Fotoionisation unterschieden.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Objekterkennung Abstandserfassung Farbmessung	⊗ Punktförmig (P)	Resultierende Spannung bei Bestrahlung des Elements, optional mit Hilfsspannung bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke (bspw. Fotomultiplier, Lichtschranke)
	Temperaturerkennung Lichtmessung Werkzeugkontrolle Anwesenheitsprüfung	↔ Linienförmig (L)	Messung von Entfernungen nach dem Prinzip der Triangulation mit einer positionsempfindlichen Fotodiode (bspw. Lichttaster)
		↕ Flächig (F)	Erweiterung der Lichtschranken für den Einsatz in Sicherheitsanwendungen (bspw. Lichtvorhang, Lichtgitter)
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Breite Anwendung in den Bereichen des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik, der Robotik sowie in der Sicherheitstechnik			

Tabelle 3.9: Charakterisierung des fotoelektrischen Effekts in Form einer Eigenschaftsliste

Die Eigenschaftsliste kann abhängig von den vorliegenden Anforderungen unterschiedliche Detaillierungsgrade einnehmen. Neben der Zuordnung der Sensoren zum Prüfmodus werden für die Effekte beispielhafte Umsetzungslösungen in der industriellen Praxis vorgestellt.

Zuordnung und Zusammenführung der Wirkprinzipien

Der letzte Schritt der *Lösungssuche mit physikalischen Effekten* führt die Teilergebnisse in einem *Morphologischen Kasten* zusammen. Tabelle 3.10 zeigt einen Ausschnitt des Morphologischen Kastens, in dem jede schädliche Funktion basierend auf den zugrunde liegenden physikalischen Effekten einzelnen Sensorklassen zugeordnet wird (vollständiger Morphologischer Kasten siehe A.9 im Anhang). Die Zuordnungsvorschrift erfolgt auf Basis der beschriebenen Sensorklassen aus der *Eigenschaftsliste*.

Nach der Sammlung der Wirkprinzipien und der booleschen Überprüfung unabhängiger Lösungsideen für schädliche Funktionen stehen Lösungskonzepte für die Problemstellungen zur Verfügung. So lässt sich die Anwesenheitskontrolle des Textils am Greifsystem, die mit der schädlichen Funktion *Textil löst*

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Physikalisches Wirkprinzip		Wirbelstrom	Kapazität	Induktion	...	Fotoelektrisch	Elektrooptisch
Problemformulierung	Schädliche Funktion						
Kontrolle, ob das Halbzeug sicher am Greifer gehalten wird	Textil löst sich vollständig				...		
	Textil wirft Falten				...		
Kontrolle, ob das Halbzeug positionsgenau in die Ablageform abgelegt wird	Textil verschiebt sich				...		
	Textilrolle verschiebt sich				...		
	Textil löst sich außerhalb des TB				...		
Kontrolle, ob das Halbzeug definiert aufgenommen wird	Luftstrom saugt falsches Textil an				...		
	Schnittkante frant aus				...		
	Luftstrom saugt CF-Partikel an				...		
...
Legende:		Geometrie:		Beschädigung:			
Punktförmig (P)		Linienförmig (L)		Prozess:		Fremdkörper:	
		Flächig (F)					

Tabelle 3.10: Ausschnitt des Morphologischen Kastens für die Zuordnung der schädlichen Funktionen zu den Sensorklassen

sich vollständig formuliert und unter der Messaufgabe *Prozess* zusammengefasst wird, vorwiegend mithilfe eines punktförmigen Sensors umsetzen, wohingegen Funktionen, die auf die Geometrieerkennung zurückzuführen sind, bevorzugt durch flächige und linienförmig wirkende Sensoren erfüllt werden. Aus dem Morphologischen Kasten können zudem noch weitere Informationen abgeleitet werden:

- *Zeilen*

Zur Kontrolle jeder schädlichen Funktion werden die Anzahl und Art der möglichen Sensorklassen bestimmt. Beispielsweise eignen sich für die Detektion der schädlichen Funktion *Schnittkante frant aus*, die auf der Messaufgabe *Geometrieerkennung* basiert, insgesamt fünf unterschiedliche Sensorklassen aus drei verschiedenen physikalischen Effekten.

- *Spalten*

Über die Spalten lassen sich die Zusammenhänge zwischen den schädlichen Funktionen erkennen, wenn Sensorklassen mehrfach einsetzbar sind. Hierzu visualisiert Tabelle 3.10, welche Anzahl schädlicher Funktionen mit einer einzigen Sensorklasse abgedeckt bzw. auf welchen physikalischen Effekt die Funktion zurückgeführt werden kann.

Für die vorgegebenen Funktionen stellen der fotoelektrische und elektrooptische Effekt sowie der Effekt des spezifischen Widerstandes eine Vielzahl von Einzellösungen bereit, wohingegen mit dem Effekt der Kapazität und der Induktion nur ein Lösen des Textils bemerkt werden kann. Bevor eine finale Aussage über die Kombination verschiedener Sensorklassen hin zu einem Gesamtkonzept getroffen werden kann, ist es erforderlich, die Einzellösungen einander gegenüberzustellen und hinsichtlich der Kompatibilität zu bewerten (PONNET AL. 2011). Hierzu müssen umsetzungsnahe Kriterien für die Sensorklassen definiert und berücksichtigt werden, um eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Gesamtlösung zu erhalten. Zu diesem Zweck ist ein situativ angepasstes Vorgehen zielführend, das in der anschließenden und letzten Phase, auf der Bauebene, durchgeführt wird.

3.3.5 Gesamtkonzept mit gewählter Sensorik und geeigneter Prozessintegration

In der Bauebene wird ein Gesamtkonzept erstellt, womit der Übergang von den abstrakten Einzellösungen der Wirkebene hin zu konkreten Handlungsempfehlungen erreicht wird. Anhand der Handlungsempfehlungen wird detailliert beschrieben, wie die identifizierten Maßnahmen in den Handhabungsprozess integriert werden können.

Detaillierung der realisierbaren Wirkprinzipien als Sensorklassen

Nach der Zuordnung der physikalischen Effekte ist im finalen Detaillierungsschritt die Zuweisung der Sensorklassen zu den schädlichen Funktionen erforderlich. Unter Berücksichtigung der Funktionsweise aus der Eigenschaftsliste sowie des zugehörigen Moduls, in dem die Sensorik verbaut werden soll, wird in Tabelle 3.11 ein Ausschnitt der Verknüpfung zwischen den Sensorklassen und den schädlichen Funktionen dargestellt, der sich maßgeblich aus Tabelle 3.10 ableiten lässt (vollständige Übersicht siehe Tabelle A.10 im Anhang).

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Modul	Aufnahmetisch		Peripherie	Ablageform	
	Handhabungssystem/Greifer				
Schädliche Funktion	Luftstrom saugt falsches Textil an	Textil verzerrt sich (reißt)	Textil verschiebt sich	...	Textil wird beschädigt
Sensorklassen					
Wirbelstromprüfung (L)		✓		...	✓
Kapazitiver Sensor (P)				...	
Induktiver Sensor (P)				...	
Piezoelektrischer Sensor (P)		✓		...	✓
Pyroelektrischer Sensor (P)				...	
Pyroelektrischer Sensor (F)	✓		✓	...	
Fotoelektrischer Sensor (P)				...	
Fotoelektrischer Sensor (L)				...	
Fotoelektrischer Sensor (F)	✓	✓	✓	...	✓
Elektrooptischer Sensor (P)				...	
Elektrooptischer Sensor (L)				...	
Elektrooptischer Sensor (F)	✓	✓	✓	...	✓
Elektr. Widerstandssensor (F)	✓	✓	✓	...	✓
Magnetoresistiver Sensor (L)				...	
Thermoelektrischer Sensor (L)		✓		...	✓
Thermowiderstandssensor (F)	✓	✓	✓	...	✓
Legende: (P): punktförmig (L): linienförmig (F): flächig					

Tabelle 3.11: Ausschnitt der verknüpften schädlichen Funktionen mit den Sensorklassen

Die Tabelle bildet von links nach rechts die zeitlich richtige Abfolge des Prozesses. Ein Fehler muss sich nicht auf ein Modul beschränken, kann also auch in mehreren Modulen auftreten **bzw.** durch die Integration in unterschiedlichen Modulen behoben werden.

Der elektrooptische Effekt beinhaltet drei Sensorklassen, wobei die Sensoren entsprechend dem Wirkbereich der Prüfung in eine eindimensionale, punktförmige Klasse (**bspw.** Lichtschranke) sowie in eine linienartige (**bspw.** Laserlichtschnittsensor) und eine flächige Klasse (**bspw.** Kamera) unterteilt werden. Je nach Sensorklasse unterscheiden sich die erfüllbaren Messaufgaben, deren Einteilung auf der Basis der Beschreibung aus Tabelle 3.9 durchgeführt wird.

Zudem zeigt Tabelle 3.11 die Zuordnungsmöglichkeiten, wie sich aus den Sensorklassen unterschiedliche Gesamtkonzepte generieren lassen. Zur Erfüllung aller definierten Anforderungen ist die Eliminierung aller schädlichen

Funktionen notwendig. Als Beispiel hierfür ermöglicht ein kapazitiver Sensor mit punktförmiger Prüfung eine Anwesenheitsprüfung am Greifer, wodurch die Funktionen *Textil löst sich vollständig* und *Textil löst sich außerhalb des Toleranzbereichs (TB)* behoben werden können. Im Vergleich dazu ermöglicht ein elektrooptischer Sensor, je nach gewählter Klasse, eine Erfüllung einer größeren Anzahl schädlicher Funktionen.

Gegenüberstellung und Bewertung der Sensorklassen

Die Ableitung eines wirtschaftlichen Gesamtkonzepts aus den einzelnen Teillösungen erfordert die Berücksichtigung zahlreicher Kriterien. Um eine belastbare, fundierte und nachvollziehbare Entscheidungsvorlage für den Anwender bereitzustellen, werden drei Hauptkriterien definiert, anhand derer die möglichen Sensorklassen untersucht werden:

- *Standardisierung*

Zur Abschätzung des aktuellen Standes der Einsatzfähigkeit werden die Sensorklassen durch einen Paarweisen Vergleich nach der industriellen Verfügbarkeit von Standardlösungen eingeteilt, wodurch je nach vorliegender Anforderung die Wahl eines Standardproduktes oder einer Lösung mit hohem technischen Potenzial, jedoch auch mit höherem Entwicklungsaufwand vorgestellt wird.

- *Technische Umsetzbarkeit*

Neben der industriellen Verfügbarkeit werden die Einzellösungen anhand technischer Kriterien für die spätere Umsetzung des gewählten Gesamtkonzepts bewertet. Dazu werden weitere Unterkriterien definiert, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Implementierung der Sensorklasse ausüben. Die Bewertung erfolgt bezogen auf das vorliegende Referenzszenario. Aufgrund der Zusatzinvestitionen, die sich bei Berücksichtigung dieser Unterkriterien ergeben, liefert das vorliegende Hauptkriterium eine qualitative Aussage zum finanziellen Aufwand der Sensorlösung. Die Unterkriterien setzen sich wie folgt zusammen:

- Konstruktive Integrierbarkeit in eine Handhabungseinheit
- Montierbarkeit und Wartungsmöglichkeit
- Erforderliche Peripherieeinrichtungen zum Betrieb der Sensorklasse
- Schnittstelle zur Anbindung der Signalauswertung

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

- Komplexität des Aufbaus der Sensorklasse
- Sicherheitsaspekte beim Einsatz der Sensorklasse

Zur Visualisierung erfolgt die Einteilung dieser Unterkriterien sowie deren Bewertung in einem Netzdiagramm (vgl. Abbildung 3.14). Eine vollständige Beschreibung stellt im Anhang in Abbildung A.10 die Sensorklassen einander gegenüber.

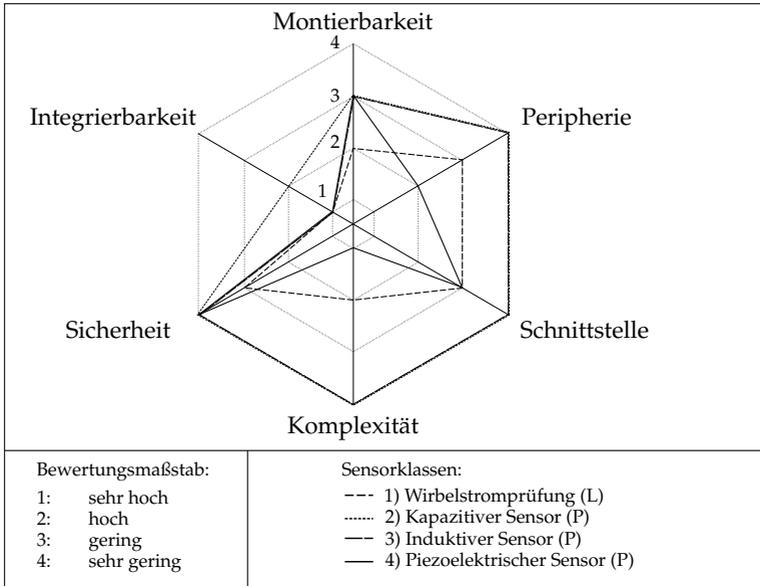


Abbildung 3.14: Bewertung des Aufwands der Sensorklasse zur technischen Umsetzbarkeit

Die Bewertung wird exemplarisch an vier Sensorklassen durchgeführt. Als Datengrundlage für die Entscheidungsfindung wird auf die *Eigenchaftsliste* aus der Wirkebene sowie weitergehend auf HESSE & SCHNELL (2011) und HERING (2012) verwiesen. Durch eine direkte Summierung der Beträge der einzelnen Kriterien lässt sich qualitativ der finanzielle Aufwand der Sensorintegration abschätzen, wobei ein kleiner Wert einen hohen Aufwand darstellt. Im vorgestellten Beispiel wird der Einsatz eines kapazitiven Sensors (Summe der Beträge: 21) einer Wirbelstromprüfung (14) sowie einem induktiven (20) und einem piezoelektrischen Sensor (13) vorgezogen.

Ein punktförmiger kapazitiver Sensor besitzt eine hohe technische Einsatzfähigkeit, die aus einem geringen Umsetzungsaufwand der meisten Kriterien resultiert. Aufgrund einer zylindrischen Bauweise mit standardisierten Schnittstellen lässt sich der Sensor einfach einbauen.

Einzig die Integration in das Handhabungssystem stellt einen erhöhten Aufwand dar, da durch die punktförmige Wirkungsweise eine Anordnung gewählt werden muss, die die Prüfung im Wirkungsbereich des Sensors sicherstellt (HESSE ET AL. 2011). Im Gegensatz dazu zeigt die Wirbelstromprüfung, die in anderen Bereichen der Produktionstechnik standardmäßig eingesetzt wird, einen erhöhten Qualifizierungsaufwand für den Einsatz bei der Handhabung textiler Halbzeuge.

- *Erfüllungsgrad zur Eliminierung der schädlichen Funktionen*

Zur Berücksichtigung der Sensoren, die eine höhere Anzahl schädlicher Funktionen bedienen, werden die Sensorklassen entsprechend der Anzahl der Messaufgaben, mit denen die schädlichen Funktionen geprüft werden können, eingeteilt. Je nach Anwendungsfall kann der Erfüllungsgrad differenziert betrachtet und definiert werden. Mit der Zuordnung der Messaufgaben zu den einzelnen Sensorklassen aus Tabelle 3.6 werden diese Vorarbeiten wieder aufgegriffen und beeinflussen das Gesamtkonzept.

Für die Auswahl eines wirtschaftlich sinnvollen Gesamtkonzepts erlaubt erst die übergreifende Betrachtung aller Hauptkriterien eine zuverlässige Aussage, da die separate Bewertung der Sensorklassen nach den Hauptkriterien nur die Messaufgabe adressiert. Auch kann eine Sensorklasse, die eine hohe Standardisierung aufweist und durch die Abdeckung einer Vielzahl schädlicher Funktionen potenziell verwendbar ist, eine geringe Eignung bezüglich der technischen Umsetzbarkeit aufweisen. Aus diesem Grund werden die Sensorklassen in Abbildung 3.15 einander graphisch gegenübergestellt.

Für jede Sensorklasse lässt sich nach der Auswertung der Netzdiagramme der Einsatzaufwand zur Integration in den Prozess abschätzen und in einem Bereich von 6 bis 24 auftragen. Die untere Grenze resultiert aus der minimalen Summe der sechs Kriterien. Die Ordinate ergibt sich aus der Auswertung des zweiten Hauptkriteriums. Dazu wird der Entwicklungsaufwand, der den Fokus auf den Sensor als Produkt legt, als Ergebnis des Paarweisen Vergleichs in einem Bereich von -5 bis $+5$ aufgetragen. Das dritte Hauptkriterium wird berücksichtigt, indem die erfüllbare Messaufgabe in jede aufgetragene Sensorklasse graphisch ergänzt wird. Dadurch lassen sich mit den Sensorklassen, die zusammengesetzt eine vollständige Kreisform bilden, alle schädlichen Funktionen erfüllen. Mithilfe eines kapazitiven Sensors (2) können schädliche Funktionen eliminiert

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

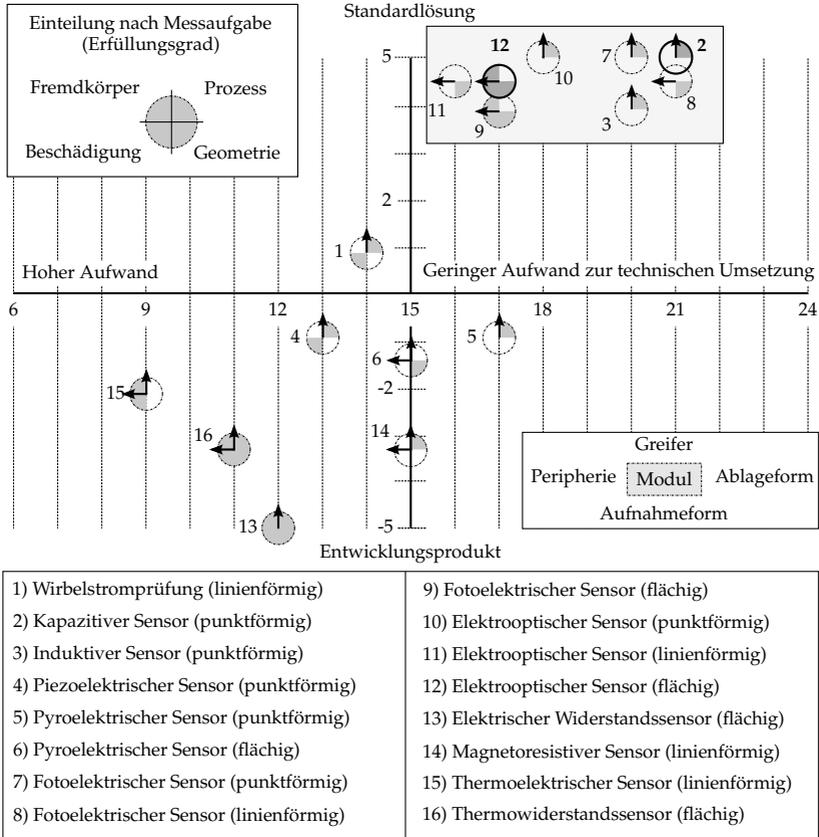


Abbildung 3.15: Gegenüberstellung und Einordnung der gewählten Sensorklassen

werden, die die Prozessfähigkeit betreffen. Somit liegt für diese Sensorklasse nur eine beschränkte Erfüllung vor (visualisiert durch einen Viertelkreis). Mit den Ergebnissen der Wirkebene kann für einen flächigen Widerstandssensor (13), der im Greifer verbaut wird, eine Erfüllung aller Messaufgaben gezeigt werden. Anhand der prozess- und produktseitigen Abschätzung des Implementierungsaufwands wird jedoch ein erheblicher Entwicklungsaufwand offensichtlich. Ergänzt wird die Klassifizierung um die Bezeichnung des Moduls, in dem der später ausgewählte Sensor verbaut werden soll. Dies wird durch die Orientierung des Pfeils durchgeführt, wodurch mögliche Zielkonflikte bezüglich des Einbauortes frühzeitig vermieden werden.

Für die Entscheidungsgrundlage werden vier Quadranten definiert, die dem Anwender eine Unterstützung bei der Wahl der Sensorklassen ermöglichen. Aus dem zeitlichen Entwicklungsaufwand lassen sich Sensorklassen ableiten, die entweder einer grundlegenden Sensorentwicklung bedürfen, bei gleichzeitig erhöhtem Aufwand bis zur technischen Einsatzfähigkeit (linker unterer Quadrant), oder basierend auf Standardlösungen für Sensoren eine einfachere Einsatzfähigkeit erreichen (rechter oberer Quadrant).

Die Einteilung der Sensorklassen erlaubt im Bedarfsfall Erweiterungsmöglichkeiten für zusätzliche Kriterien, sodass durch die Stärke und Länge des Pfeils weitere Freiheitsgrade definiert werden können.

Zur Beschreibung des Gesamtkonzepts sollen, unter Berücksichtigung des Anwendungsszenarios einer Serienfertigung, Lösungen aus dem rechten oberen Quadranten eingesetzt werden, sodass für die finale Entscheidung nur der markierte Bereich berücksichtigt wird. Die Analyse der aufgetragenen Sensorlösungen für ein nachvollziehbares Gesamtkonzept erfolgt nach dem folgenden Vorgehen:

1. Auswahl des Quadranten
2. Auswahl möglicher Sensorklassen zur Erfüllung aller schädlichen Funktionen (bzw. Messaufgaben)
3. Einschränkung auf die Sensorklassen mit einer hohen Einsatzfähigkeit sowie auf eine Standardlösung
4. Vermeidung von Zielkonflikten bei der Montage und Integration der Sensorklassen durch Auswahl unterschiedlicher Module (durch die Pfeilorientierung)

Nach Durchlaufen und Anwendung der Regeln lassen sich für den vorliegenden Anwendungsfall aus Abbildung 3.15 (bzw. aus Tabelle A.10) im Anhang mit den markierten Sensorklassen (2 und 12) alle definierten Anforderungen erfüllen und die berechnete Lösung bestätigen. Eine detaillierte Beschreibung des zu wählenden Gesamtkonzepts folgt im nächsten Abschnitt.

Detaillierung der gewählten Sensorklassen

Die Kombination der Sensorklassen 12 (flächiger elektrooptischer Sensor) und 2 (punktförmiger kapazitiver Sensor) erfüllt alle definierten Anforderungen und stellt die geeignetste Sensorkombination zur Funktionserfüllung dar. Gemäß der beschriebenen Vorgehensweise werden jeweils die Klassen mit dem

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

günstigsten Einsatzaufwand sowie der höchsten Standardisierung gewählt. Für diese Kombination bestehen weiterhin keine Konflikte hinsichtlich der Montage in die bestehenden Module. Während ein kapazitiver Sensor aufgrund der zugehörigen schädlichen Funktionen, die auf dem Greifer auftreten, in das Handhabungssystem integriert werden soll, wird der elektrooptische Sensor in der Peripherie montiert, um im Laufe des Handhabungsprozesses die Kontur sowie mögliche Beschädigungen und Fremdkörper zu überwachen.

Für die nachfolgende Umsetzung in Kapitel 4 werden die gewählten Sensorklassen aus Abschnitt 3.3.5 anhand der bereits definierten Hauptkriterien in Form konkreter Sensoren detailliert. Am Beispiel des kapazitiven Sensors zeigt Tabelle 3.12 die Kriterien, die sich in einen allgemeinen und einen vom Anwendungsfall sowie von den schädlichen Funktionen abhängigen Bereich unterteilen. Basierend auf den Ergebnissen der verschiedenen Ebenen wird das Template ausgefüllt. Die allgemeinen Informationen beschreiben Empfehlungen, die in Anlehnung an die Hauptkriterien vorwiegend die technische Umsetzbarkeit bezüglich der physischen Möglichkeiten (geometrische Abmessungen, Wirkungsbereich des Sensors) betreffen. Übertragen auf das Handhabungssystem bietet die Wirkfläche an der Oberfläche des Greifsystems eine geeignete Position, in die ein kapazitiver Sensor integriert werden kann. Hiermit lässt sich die Funktionalität direkt auf das Handhabungsgut ausüben und die Anwesenheit während des gesamten Prozesses kontinuierlich überprüfen. Eine externe Station könnte hingegen nur zu einem bestimmten Zeitpunkt die Anwesenheit prüfen. Erweitert wird die Spezifikation durch eine Prinzipskizze, mit der der Anwender in Anlehnung an HESSE (2006), HERING (2012) und EHINGER (2013) die benötigten Informationen über die Wirkungsweise des notwendigen Sensors erhält. Zudem arbeitet der Sensor berührungslos in einem bestimmten Wirkungsbereich, der sich je nach Ausführung auf bis zu 10 mm erstreckt. Unter den speziellen Informationen werden basierend auf den schädlichen Funktionen weitere Aspekte beschrieben, die abhängig vom Anwendungsfall auftreten können.

Hinsichtlich der zweiten Lösung wird die genaue Spezifikation des elektrooptischen Sensors im Anhang in Abbildung A.11 beschrieben. Für die Auswahl eines Sensorsystems eignet sich eine Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor-CMOS-Kamera, mit der die Geometrie, Fremdkörper sowie mögliche Beschädigungen erfasst werden können. Der Fokus liegt hierbei auch auf der Gewährleistung einer standardisierten Schnittstelle zur Übertragung und anschließenden Auswertung der Bilddaten. Die Kamera wird in der Peripherie des Handhabungssystems montiert, wodurch während des Prozesses ohne einen zusätzlichen Zwischenschritt die Kontur auf der Wirkfläche ermit-

Allgemeine Informationen			
Sensorklasse:	Kapazitiver Sensor	Modul:	Greifsystem
Aufgabe: Anwesenheitsprüfung des textilen Halbzeugs während des Handhabungsprozesses			
Schnittstelle		Montierbarkeit	
Elektrische Anbindung:	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichspannung im Niedervoltbereich • Analoges Ausgangssignal zur Werkstofferkennung 	Abmessungen (ca.): (L x B x H)	70 mm x 10 mm x 10 mm
Peripherie:	<ul style="list-style-type: none"> • Definierte Anbindung • Schonende Sensoroberfläche 	Montageort:	Wirkfläche Greifsystem
Beschreibung des Sensors:	<ul style="list-style-type: none"> • Längliches rotations-symmetrisches Gehäuse 	Wirkweise:	Zerstörungsfreie Detektion des Textils
		Montagerestriktion:	Keine Kontaktierung an das textile Halbzeug
Sicherheit		Integrierbarkeit	
Schutzart (mindestens):	IP66 (DIN 1993)		
Spezifische Informationen			
Schädliche Funktion	Detaillierte Aufgabe		
Textil löst sich vollständig	Sobald sich das textile Halbzeug aufgrund der dynamischen Bewegung des Roboters abschält und den Kontakt zur Wirkfläche verliert, wird der Prozessfehler detektiert.		
Textil löst sich außerhalb des TB	Im Falle einer ungewollten Verschiebung des Textils nach dem Ablegen durch das Greifsystem stellt der Sensor sicher, dass ein unkontrolliertes Abfallen in die Ablageform unterbunden wird.		

Tabelle 3.12: Detaillierung der gewählten kapazitiven Sensorlösung anhand unterschiedlicher Kriterien

telt werden kann. Es bestehen keine Restriktionen und Vorgaben bezüglich der Abmessungen der Kamera. Um eine definierte Ablage des Textils sicherzustellen, ist auf eine angepasste Konstruktion der Wirkfläche zu achten.

Zur Berücksichtigung der spezifischen Einflussgrößen werden die Ergebnisse aus der *Verknüpfungsmatrix* (vgl. Tabellen A.2 und A.3) wieder aufgegriffen. Für die fünf ausgewählten und priorisierten Prozessanforderungen werden die korrelierenden Einflussgrößen mit einer hohen gegenseitigen Beeinflussung betrachtet; durch die Korrelation der Prozessanforderungen und schädlichen Funktionen wird die vollständige Aufnahme der Einflussgrößen ermöglicht (vgl. Tabelle 3.13).

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

Ergänzt wird die Zusammenstellung um eine übergreifende Beschreibung, die als Vorlage für die Umsetzung des Systems dient.

		Prozessanforderungen						Beschreibung	
		Positioniergenauigkeit			Verformung der Wirkfläche				
		Zuverlässige Kontrolle			Definiertes Greifen				
		Sicheres Halten							
Einflussgrößen	Prozesspezifisch	Ablageform	1	2	2	2	1	Sicherstellung der störungsfreien Aufnahme des textilen Halbzeugs (kein Verhaken)	
		Aufnahmetisch	2	2	1	2	2		
		Sensoren	1	2	1	0	0		
		Faserbeschädigung	1	2	1	1	0		
		Fehlerdetektion	2	2	1	0	1		
	Aufnahme Prozessdaten	2	2	1	1	1	Aufnahme der Prozessdaten für eine mögliche Rückverfolgbarkeit		
	Produktspezifisch	Prozessspezifisch	Aufnahme- und Ablagetechnik	2	1	2	2	2	Entwicklung einer geeigneten Ablagestrategie der textilen Halbzeuge
			Greiffläche	2	2	2	2	2	
			Greifkinematik	2	1	2	1	2	
			Handhabungsprinzip	2	2	2	2	2	
Halte- und Lösetechnik			2	1	2	2	2		
Zuverlässigkeit		0	2	2	0	2	Einfluss auf das Prozessverhalten		
Produktspezifisch		Prozessspezifisch	Faserart	0	0	0	1	2	Für das vorliegende Referenzszenario ist das textile Halbzeug definiert und wird nicht variiert. Je nach textilem Halbzeug erfolgt die Auslegung des Greifsystems.
			Fasermaterial	1	2	0	1	0	
			Toleranz	0	0	2	1	1	
			Flächengewicht	1	0	0	1	2	
	Formvarianz		0	0	2	2	1		
Produktspezifisch	Prozessspezifisch	Zykluszeit	1	2	1	0	0	Eine höhere Flexibilität und Variantenvielfalt der textilen Halbzeuge (Kontur und Verformungsgrad) muss bei der Greiferentwicklung berücksichtigt werden.	
		Varianten	0	0	0	2	0		
		Kontur	0	0	2	1	1		
		Krümmungen	0	0	2	2	1		
		Gesamtabmessung	0	0	2	1	1		

Tabelle 3.13: Wiederaufnahme der bewerteten Einflussgrößen für die Konzeption der nachfolgenden Umsetzung

Gesamtkonzept zur vollständigen Prozessüberwachung

Für das vorgestellte Referenzszenario bietet der Einsatz eines eindimensionalen **kapazitiven Sensors** sowie eines flächigen **elektrooptischen Sensors** die geeignetste Lösung. Der kapazitive Sensor muss dabei zur kontinuierlichen Anwesenheitsprüfung des textilen Halbzeugs in die Wirkfläche integriert werden. Das Kamerasystem übernimmt vor dem Drapierprozess die Positionskontrolle und detektiert mögliche auftretende Fehler im Textil.

Die Auswahl der Sensoren erfolgt basierend auf einer Herstellerrecherche,

wozu die Spezifikation aus Tabelle 3.12 herangezogen wird. Unter der Aufgabe der Anwesenheitsprüfung werden alle eliminierten schädlichen Funktionen zusammengefasst, die auf Prozessursachen zurückzuführen sind (bspw. *Textil löst sich vollständig*). Die Positionskontrolle vereint schädliche Funktionen, die durch eine Prüfung der Kontur sowie über daraus resultierende Abweichungen der Randkurve und der Struktur ausgesondert werden können (bspw. *Schnittkante franst aus*). Neben den Sensorlösungen werden an dieser Stelle die in Abschnitt 3.3.3 identifizierten schädlichen Funktionen wieder aufgegriffen und zusammengefasst, die nicht durch eine Sensorlösung vermieden werden können (vgl. Abbildung 3.16). Hiermit handelt es sich um Funktionen, die auf konstruktiven Anforderungen basieren (bspw. *Hardware wird zerstört* und *Verformung durch Überlastung*).

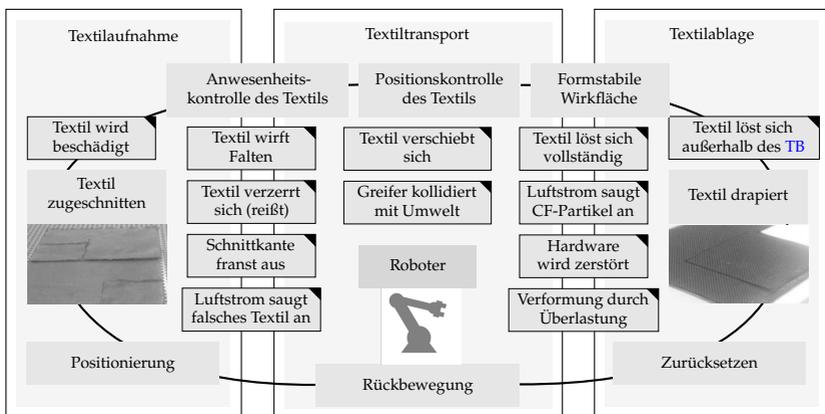


Abbildung 3.16: Zusammenfassung des Gesamtkonzepts anhand einer Einteilung in die übergeordnete Prozesskette

Zur Vermeidung dieser schädlichen Funktionen werden weitere Handlungsempfehlungen formuliert, die vor allem die prozesstechnische Führung und die konstruktive Umsetzung des Handhabungssystems betreffen:

- Zur Einhaltung der geforderten Positioniergenauigkeit bietet nur eine stabile Wirkfläche des Greifers in Verbindung mit der sensortechnischen Prüfung der Kontur eine geeignete Lösung. Zudem muss hierbei auch die Ablegestrategie angepasst werden.

3 Methodik zur qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge

- Als eine weitere wesentliche konstruktive Maßnahme ist unter Berücksichtigung der Einflussgröße *Bewegung des Textils* eine Reduktion der notwendigen Handhabungsschritte anzustreben, wofür die Zusammenführung des Absortier- und des Drapierprozesses in einen einzigen Handhabungsvorgang eine geeignete Lösung darstellt. Damit übernehme ein neu zu entwickelnder Greifer die Aufgaben der aktuell zwei separat eingesetzten Greifsysteme und kombiniert deren Eigenschaften.

3.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde eine Methodik zur Identifikation und Detaillierung von Lösungen zur Einhaltung der geforderten Anforderungen hinsichtlich der Qualitätssicherung und der Prozesssicherheit für die automatisierte Handhabung textiler Halbzeuge entwickelt.

Hierbei lag der Fokus auf sensorbasierten Lösungen und weitergehenden Empfehlungen, die bei der konstruktiven Umsetzung und Konzeption eines Greifers berücksichtigt werden müssen. Am Beispiel des Preformaufbaus kleinstruktureller Textilien wurde gezeigt, dass mit einem eindimensionalen kapazitiven Näherungssensor sowie einem elektrooptischen Kamerasystem alle durch Sensorik erfüllbaren schädlichen Funktionen eliminiert werden. Gleichzeitig stellt die Lösung ein geeignetes Umsetzungsbeispiel zur Berücksichtigung allgemeiner technischer Randbedingungen (bspw. Montierbarkeit, Integrationsfähigkeit sowie Ansteuerbarkeit für die technische Umsetzbarkeit). Während der Näherungssensor kontinuierlich den ganzen Prozessschritt überwacht, wird mit der Kamera nur an einer Stelle die Textilposition gemessen.

Die erarbeiteten Maßnahmen und Empfehlungen werden im nachfolgenden Kapitel 4 konstruktiv anhand eines innovativen Greifsystems umgesetzt.

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

4.1 Definition einer Vorgehensweise zur Umsetzung des Handhabungsszenarios

An die Identifikation geeigneter Sensorlösungen mit der weiterführenden Ableitung eines Gesamtkonzepts knüpft der vorliegende Abschnitt mit der prototypischen Umsetzung an, anhand welcher der gewählte Preformprozess im Technikum des Instituts in den nächsten Schritten technisch validiert (Kapitel 5) sowie wirtschaftlich bewertet (Kapitel 6) wird. Zur Evaluierung einer geeigneten Vorgehensweise für die Umsetzung werden folgende Hauptaufgaben definiert:

1. Konzeption, Detaillierung und Umsetzung des Greifsystems auf der Basis der Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.5
2. Anbindung und Integration der abgeleiteten Sensorlösungen in den Handhabungsvorgang unter Berücksichtigung der Handlungsempfehlungen der Bauebene aus Kapitel 3
3. Umsetzung der notwendigen peripheren Komponenten mit Fokus auf einen flexiblen Einsatz der Sensoren
4. Bereitstellung von Schnittstellen zur elektrischen Anbindung und Integration aller technischen Komponenten im Rahmen einer industrienahen Lösung
5. Informationstechnische Zusammenführung aller Messdaten in eine übergeordnete Steuerungsarchitektur
6. Verarbeitung, Auswertung und Visualisierung der Sensordaten

Neben den interdisziplinären Aufgaben werden auch Fragestellungen, die auf die mechanische Konstruktion abzielen, sowie Aspekte der Elektrotechnik und Datenverarbeitung fokussiert. Für dessen Umsetzung ist eine übergreifende Vorgehensweise unter Berücksichtigung aller Teilbereiche erforderlich (HESSE 2011). Hierzu wird mit der Definition von Sensorik aus Abschnitt 2.3 sowie

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

unter Berücksichtigung der Einteilung verschiedener Vorgehensmodelle aus Abbildung 3.1 ein Vorgehen definiert, das an die Entwicklung mechatronischer Systeme nach der VDI-Richtlinie 2206 angelehnt ist (VDI 2004) (vgl. Abbildung 4.1).

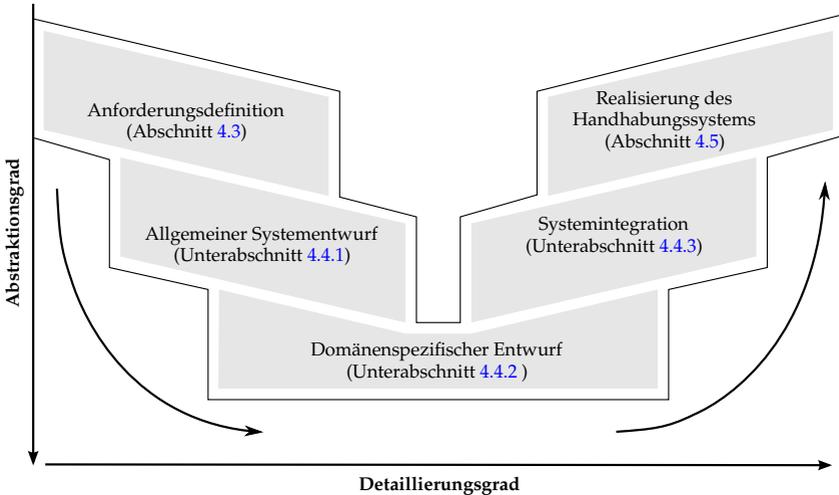


Abbildung 4.1: Vorgehensweise zur Umsetzung der Versuchsanlage in Anlehnung an VDI 2206 (2004)

In Anlehnung an das Vorgehen nach der VDI-Richtlinie 2206, die auch als V-Modell bezeichnet wird, bietet der Problemlösungszyklus mehrere Ebenen unterschiedlicher Arbeitsschritte und größerer Arbeitsphasen mit einem höheren, makrologischen Auflösungsgrad, in welche die notwendigen Bereiche übernommen werden (LINDEMANN 2009). Aufgrund der begrenzten und größtenteils vorgegebenen Teilkomponenten des Handhabungssystems werden die im Entwicklungsvorgehen nach der VDI-Richtlinie 2206 durchgeführte Modellbildung sowie Eigenschaftsabsicherung nicht implementiert. Der Greifer soll ohne eine zusätzliche Kinematik angebracht werden, sodass sich der Umsetzungsaufwand reduziert (BORCHERT ET AL. 2016). Die einzelnen Schritte spiegeln sich im Aufbau des vorliegenden Kapitels wider. Beginnend mit der Anforderungsdefinition erfolgt zunächst die Konzeption anhand des Systementwurfs mit der anschließenden Beschreibung der umgesetzten Lösung in Abschnitt 4.5.

4.2 Beschreibung des Referenzszenarios

Die Auslegung und Umsetzung des Handhabungssystems werden anhand der Preformfertigung eines Strukturbauteils in der automatisierten Serienproduktion durchgeführt. Nachfolgend wird zunächst das Bauteil beschrieben, bevor die Preformfertigung in den Kontext der gesamten Prozesskette eingeordnet wird.

4.2.1 Hinterradschwinge als Anwendungsszenario

Das Strukturbauteil stellt eine dynamisch belastete Schwinge dar, die in einem Motorrad für die Lastaufnahme des Hinterrads dient. Hiermit sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der Faserverbundbauweise und deren Fertigung für die automatisierte Serienfertigung untersucht werden (siehe Abbildung 4.2). Als geforderte Stückzahlen wird eine jährliche Fertigung von 100 000 Bauteilen definiert. Nach der Ermittlung der Belastungen (I) erfolgt die synchron verlaufende Auslegung der Lastpfade (IIa) mit der davon abhängigen Auswahl der Prozesskette (IIb) für alle Teilkomponenten, mit denen das Bauteil schließlich gefertigt wird (III).

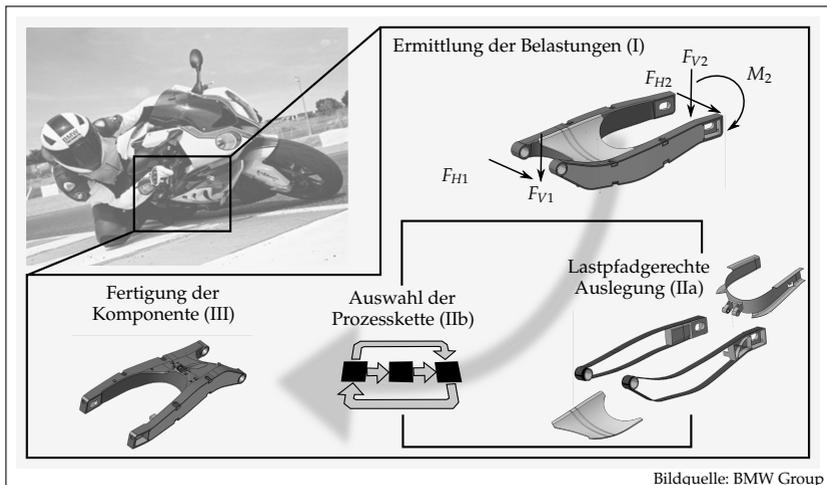


Abbildung 4.2: Schritte zur Serienfertigung einer Hinterradschwinge eines Motorrads

4.2.2 Auswahl und Detaillierung der Prozesskette für das Referenzbauteil

Beim Einsatz einer duroplastischen Matrix bietet das Injektionsverfahren eine wirtschaftliche Lösung zur Herstellung der Hinterradschwinge. Im Gegensatz dazu stellt für thermoplastische Kunststoffe die separate Konsolidierung des Deckels und der Trägerstrukturen mit anschließendem Verschweißen ein geeignetes Verfahren für die Serienfertigung dar (GILIARD ET AL. 2013). Abbildung 4.3 visualisiert die Prozesskette der einzelnen Teilkomponenten, die entweder bei der Harzinjektion, der Konsolidierung oder beim Verschweißen der Komponenten gefertigt werden (GRAF & REINHART 2014).

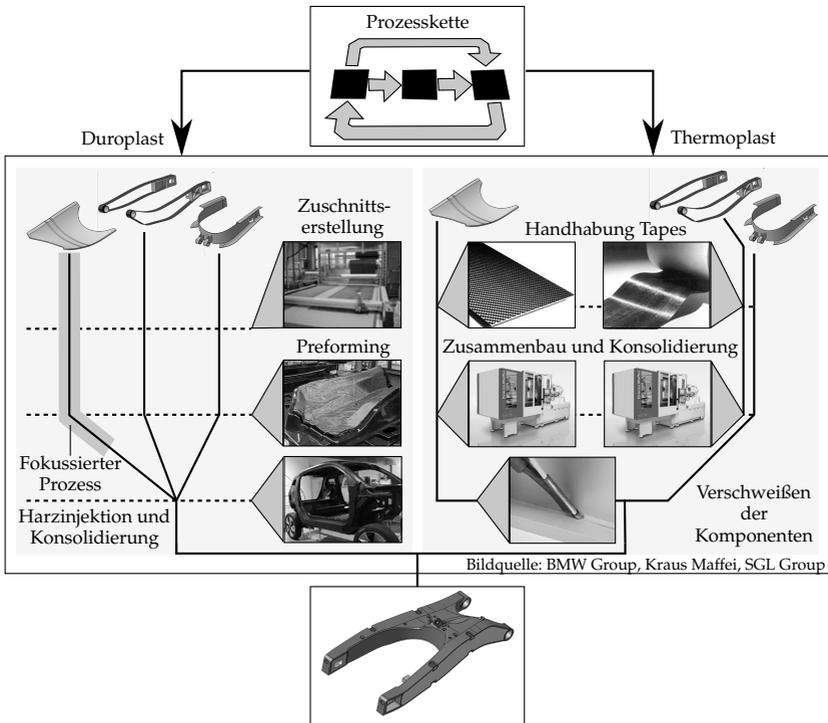


Abbildung 4.3: Referenzbauteil mit der zugehörigen Prozesskette

Der betrachtete Handhabungsschritt stellt einen Teil der Fertigung des Deckels dar, der nach dem separaten Preformaufbau in der **RTM**-Presse gemeinsam mit den anderen Preforms mit Harz infiltriert und unter Druck und Temperatur konsolidiert wird. Neben dem skizzierten Thermoformprozess lässt sich der **RTM**-Prozess bei Verwendung einer monomeren Kunststoffschmelze in Form des Thermoplastic-Resin-Transfer-Moulding (**TRTM**)-Prozesses auch auf Thermoplaste übertragen. Zum Aufbau der Preform ist die beschriebene Fixierung der Textilien zur Einhaltung der Formstabilität notwendig. EHINGER (2013) untersucht die Integration von Heizelementen für die thermische Aktivierung eines Bindermaterials, wodurch eine Formstabilität der Preform erreicht wird. Aufgrund dieser umfangreichen Vorarbeiten erfolgt im Rahmen der Arbeit keine Umsetzung einer Fixierlösung, sie wird jedoch bei der technischen Validierung als eine mögliche Option berücksichtigt (REINHART ET AL. 2012). Bei der Aufnahme der textilen Halbzeuge lassen sich zwei Szenarien unterscheiden:

1. *Direkte Aufnahme vom Zuschneidetisch*

Die Position des textilen Halbzeugs lässt sich über die **CAD-CAM**-Kopplung für das Greifsystem bestimmen. Die erreichbaren Genauigkeiten unterliegen der Spezifikation der Zuschnittanlage.

2. *Entnahme aus einem Speichersystem*

Die Position des Textils ist in einem Toleranzbereich von $\Delta X \pm 10$ mm bekannt.

4.2.3 Fertigungsspezifikation der Schwinge

Die gesamte Schwinge setzt sich aus unterschiedlichen Halbzeugen zusammen, um das Leichtbaupotenzial ausnutzen zu können. Dadurch sollen die kostenintensiven Fasern effizient eingesetzt werden, ohne lediglich homogene Werkstoffe (**bspw.** Metall) durch multidirektionale Halbzeuge zu substituieren, deren Fasern keinen Beitrag zur Lastübertragung leisten. Die gewählte Konstruktion ermöglicht die Aufnahme von hochdynamischen Biege- und Torsionsbelastungen. Die Struktur berücksichtigt mit Fokus auf die hochgenaue Auslegung der Faserstruktur das positionsgenaue Ablegen der textilen Halbzeuge innerhalb enger Grenzen. Bereiche der Schwinge, die Zug- und Druckbelastungen aufnehmen, werden vorwiegend mittels unidirektionaler Halbzeuge gefertigt. Im Gegensatz dazu wird für den betrachteten Deckel, der mittig eingesetzt wird, zur Stabilitäts- und Steifigkeitserhöhung eine Preform verwendet, die sich aus unterschiedlich orientierten, unidirektionalen Lagen zusammensetzt

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

(vgl. Abschnitt 3.3.1). Der Deckel weist in der Form eine konvexe Krümmung auf. Abbildung 4.4 fasst die Anforderungen zusammen, aus dem Blickwinkel der Prozessführung und des späteren Bauteils. Die Auflösung der Wirkfläche bezeichnet die erforderliche Mindestanzahl an separaten Saugstellen, um die Kontur des Deckels nach dem Zuschnittprozess absortieren zu können. Die Auslegung erfolgt in Anlehnung an die Untersuchungen von STRASSER (2012).

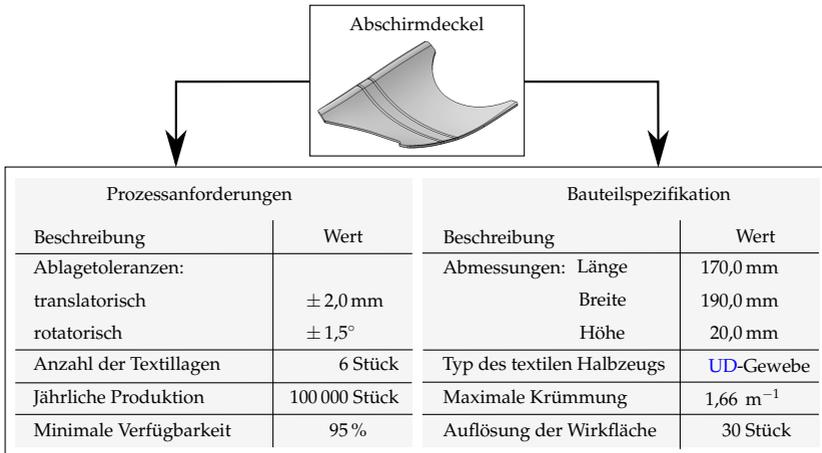


Abbildung 4.4: Referenzbauteil mit einer Übersicht über die wesentlichen Anforderungen

4.3 Anforderungen an die Integration und Umsetzung des Systems

Die Umsetzung der Qualitätssicherungsmaßnahmen basiert auf Anforderungen, die im Wesentlichen aus den Hauptaufgaben aus Abschnitt 3.3.2 abgeleitet werden und in Tabelle 4.1 in die Kategorien Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik eingeteilt werden. Zudem werden die schädlichen Funktionen aus Abschnitt 3.3.3, die durch konstruktive Lösungen eliminiert werden, wieder aufgenommen. Neben der Vermeidung des Ansaugens von schädlichen CF-Partikeln soll durch das Greiferkonzept auch eine Zerstörung bei einem ungeplanten Kontakt mit der Peripherie verhindert werden.

Greifer kollidiert mit Umwelt	Verformung durch Überlastung	Hardware wird zerstört	Luftstrom saugt CF-Partikel an
-------------------------------	------------------------------	------------------------	--------------------------------

	Mechanik	Elektrotechnik	Informationstechnik
Montage	Montagegerechte Auslegung Anbindung der weiteren Komponenten	Kompakte Bauweise	
Peripherie	Greiferkonstruktion mit Fokus auf konstruktiven Leichtbau	Anbindung aller elektrischen Komponenten und Sensoren Dezentrale Peripherie	
Schnittstelle	Integration der Sensorik in die Wirkfläche Flexible Verformung der Wirkfläche	Bereitstellung der benötigten Schnittstellen Kommunikation zu anderen Steuerungen Dezentrale Energieversorgung	Kompatibilität zu allen benötigten Programmen Einhaltung der gängigen Normen
Komplexität	Kompakte Bauweise	Einfache Bedienung und Wartung des Systems Einfache Fehlersuche	Kompatibilität zu anderen Programmiersprachen Einfache Visualisierung der Prozessparameter
Sicherheit	Endanschläge als Überlastschutz Filtersystem gegen CF-Partikel	Schutz vor leitfähigen Stäuben Einhaltung der gängigen Normen	Redundante Sicherheitskreise Dokumentation aller aufgenommenen Daten
Integration	Erweiterbarkeit des Greifsystems		Feinprogrammierbare Schnittstellen

Tabelle 4.1: Übersicht über die wesentlichen Anforderungen an das Handhabungssystem

Zur Kategorisierung werden die Bereiche der Bauebene aus Abschnitt 3.3.5 übernommen. Während unter mechanischen Gesichtspunkten vorwiegend konstruktive Aspekte (bspw. Integrierbarkeit und Montierbarkeit) einen Schwerpunkt bilden, erfordert die elektrotechnische Anbindung aufgrund der eingesetzten Sensoren vorwiegend eine geeignete Projektierung der Steuerung. Zur Datenverarbeitung und Visualisierung der Ergebnisse für den Anwender müssen aus Sicht der Informationstechnik passende Prüfstrategien berücksichtigt werden.

4.4 Konzeption der Versuchsanlage

Durch die Reduktion realer Strukturen auf ein abstrahiertes Abbild bildet der Systementwurf einen Prozess zur Problemlösung (LINDEMANN ET AL. 2015). Um das System domänenübergreifend entwickeln und umsetzen zu können, stehen Modelle mit unterschiedlichen Modellierungstiefen zur Verfügung, in denen jeweils relevante Bereiche für die spätere Anlage abgeleitet werden. Hiermit wird unter Berücksichtigung aller notwendigen Aspekte und Teilkomponenten eine vollständige Systembeschreibung zur Einteilung sinnvoller Abschnitte gewährleistet (VDI 2004). Die Bereiche werden dabei modellspezifisch konzipiert und beschrieben.

4.4.1 Allgemeiner Systementwurf

Der Systementwurf stellt die Konzeption eines technischen bzw. mechatronischen Systems unter Nutzung ingenieurwissenschaftlicher Ansätze dar, um die vorgegebenen Anforderungen an das System für das gesamte System möglichst gut erfüllen zu können (JANSCHKE 2010). Hierzu existieren die folgenden Modelle zur Strukturierung und Funktionsbeschreibung, mit denen das System je nach erforderlichem Detaillierungsgrad beschrieben werden kann:

- Qualitatives Systemmodell
- Domänenspezifisches Modell
- Mathematisch-physikalische Verhaltens- und Zustandsmodelle

Im Gegensatz zur Beschreibung auf einer abstrakten Ebene mit dem qualitativen Systemmodell bietet das domänenspezifische Modell eine Beschreibung anhand ingenieurtechnischer Ersatzanordnungen (bspw. Konstruktionszeichnungen oder Schaltpläne). In einer weiteren Konkretisierungsstufe beschreiben mathematisch-physikalische Verhaltens- und Zustandsmodelle Zusammenhänge mittels differenzialalgebraischer und linearisierter Systemmodelle (JANSCHKE 2010).

Auf dieser physikalischen Ebene lassen sich die Funktionen verschiedenen Modellen zuweisen, wodurch keine Eindeutigkeit gewährleistet ist. So lässt sich bspw. die Bewegung der Roboterbahn mit einer linearen Differenzialgleichung beschreiben, wodurch sowohl der Greifer als auch die Peripherie berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu dieser tiefgehenden Untersuchung sieht das qualitative Systemmodell keine ausreichend detaillierte Beschreibung des Greifsystems

vor. Somit bietet die domänenspezifische Modellierung eine ausreichende Granularitätsebene für die nachfolgende Systembeschreibung.

Zur Detaillierung der wesentlichen Domänen wird der vorliegende Handhabungsprozess anhand eines Aktivitätsdiagramms modelliert und es werden die wesentlichen Funktionen unter Berücksichtigung der formulierten Handlungsempfehlungen aus Abschnitt 3.3.5 beschrieben (vgl. Abbildung 4.5).

Ausgehend vom Aufnahmetisch erfolgen sequenziell die Aufnahme, Bewegung und Umformung des Textils mit anschließendem Ablegen in die Form.

Die prozessbegleitende Prüfung der Textilposition erfolgt an der Greiferoberfläche. Dabei wird die Pose des Textils mit einer Kamera im aufgenommenen Zustand vor dem Ablegeprozess geprüft. Mit der Prüfung während des wertschöpfenden Handhabungsprozesses wird keine aufwendige Prüfzeit durch einen weiteren zusätzlichen Prüfschritt veranschlagt. Die Anwesenheitsprüfung des Textils erfolgt ab der Textilaufnahme durchgängig bis zum Ablegevorgang, sodass ein ungeplantes Anhaften oder Verscheren des Textils während des Ablegens detektiert würde. Aufgrund der konvexen Geometrie der Ablageform wird das Textil, ausgehend vom Erstkontakt in der Mitte, kontrolliert in die Form abgelegt.

Neben der Funktionserfüllung müssen sich die Domänen auch in das Grundsystem eines mechatronischen Systems integrieren lassen. Hierzu zeigt Abbildung 4.6 in Anlehnung an VDI 2206 (2004) den grundsätzlichen Aufbau eines mechatronischen Systems, der sich auf den vorliegenden Prozess übertragen lässt. Im Gegensatz zum relationsorientierten Funktionsmodell aus Abschnitt 3.2.3 liegt der Fokus auf der Abfolge des umzusetzenden Handhabungsvorgangs mit den bereits berücksichtigten Lösungen. Das Grundsystem weist in der Regel eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur auf und steht in Wechselwirkung mit den Komponenten aus der Sensorik und Aktorik. Sensoren übermitteln die Zustandsgrößen des Grundsystems an die Informationsverarbeitung weiter, währenddessen Aktoren die Zustandsgrößen am Grundsystem umsetzen. Zusätzlich lässt sich über die Kommunikation der Mensch-Maschine-Schnittstelle Einfluss auf das Grundsystem ausüben. Zur Vernetzung und Verbindung der einzelnen Strukturen lassen sich drei Arten von Flüssen unterscheiden (VDI 2004):

- *Stoffflüsse* sind feste Körper, Prüfgegenstände, Gase oder Flüssigkeiten.
- *Energieflüsse* sind zumeist mechanische oder elektrische Energieformen.
- *Informationsflüsse* bilden Mess- und Steuergrößen sowie allgemeine Daten.

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

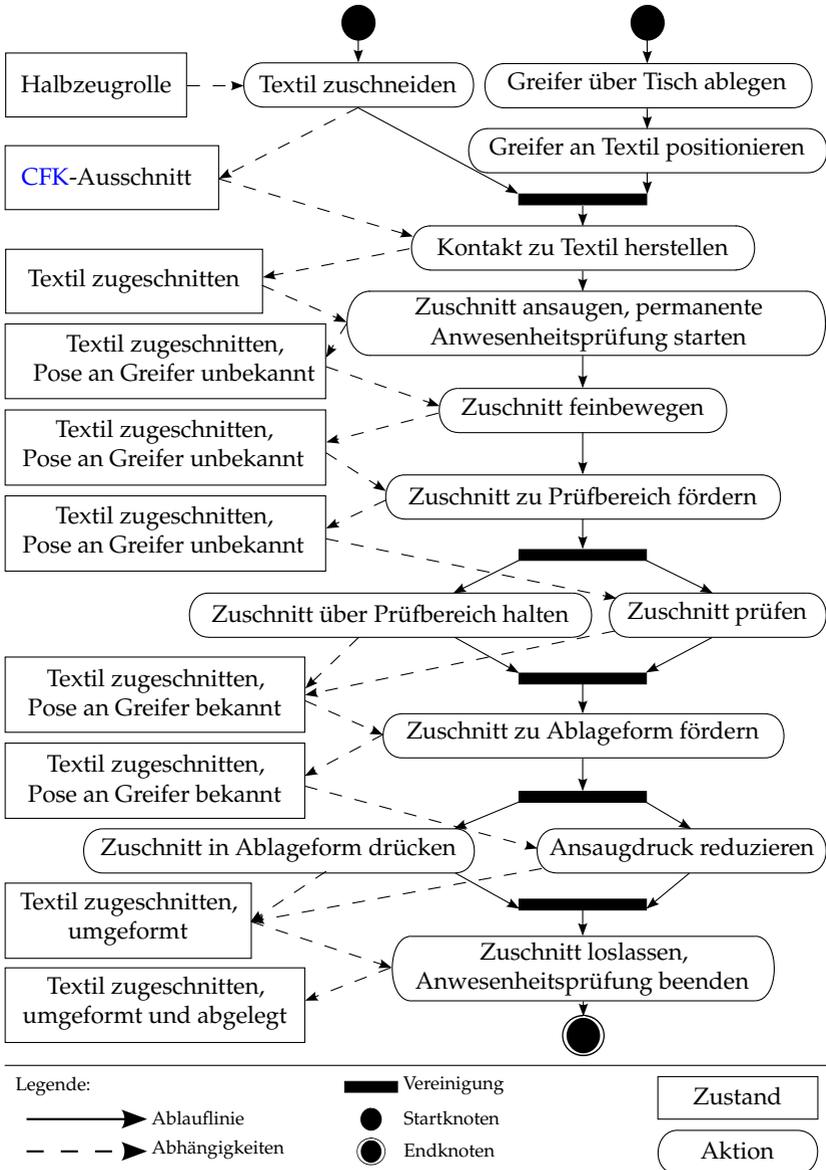


Abbildung 4.5: Modellierung des Handhabungsvorgangs anhand eines Aktivitätsdiagramms

4.4.2 Domänenspezifischer Systementwurf

Greifer

Der Greifer stellt durch die Realisierung der Handhabungsbewegung und der Umformung der textilen Halbzeuge die zentrale Domäne des Handhabungsvorgangs dar. Abschnitt 3.3.5 lieferte Handlungsempfehlungen für die Gestaltung und Umsetzung des Greifers. Daraus lassen sich die folgenden vier wesentlichen notwendigen Hauptanforderungen ableiten, die im weiteren Verlauf dieses Abschnitts behandelt werden:

- Auswahl eines geeigneten Greifkonzepts unter Berücksichtigung des Wirkprinzips des Niederdruckflächensaugens
- Konturvariante Wirkfläche mit definierter Verformung für ein dreidimensionales Ablegen der Halbzeuge
- Integration eines Sensors in die Wirkfläche zur berührungslosen Anwesenheitsprüfung
- Konstruktiver Leichtbau zur Reduktion bewegter Massen für eine wirtschaftliche Auslegung der weiteren mechanischen Komponenten

Auswahl eines geeigneten Greifkonzepts

Das gewählte Wirkprinzip basiert aufgrund der Notwendigkeit einer angepassten qualitätskonformen Handhabung der textilen Halbzeuge auf dem Prinzip des Niederdruckflächensaugens (REINHART ET AL. 2009). Für abweichende Halbzeuge, die eines alternativen Wirkprinzips bedürfen, wird zur Identifikation eines geeigneten Prinzips auf die Arbeit von STRASSER (2012) verwiesen. Daneben stellen unterschiedliche Entwicklungsverfahren Vorgehensweisen zur Neuentwicklung von Greifern und technischen Produkten bereit (HESSE 2006; VDI 2002; VDI 1997).

Unter Berücksichtigung der Hauptanforderungen aus Tabelle 4.1 zeigt Abbildung 4.7 Teilfunktionen mit verschiedenen Teillösungen, die in ihrer Gesamtheit eine Konzeptbahn bilden. Diese Konzeptbahn mit verschiedenen Alternativen zur Erfüllung der erforderlichen Funktionen wird aus einem Morphologischen Kasten abgeleitet, aus der sich unterschiedliche Konzepte generieren lassen. Zur Strukturierung des vorliegenden Handhabungssystems und zur Ableitung der einzelnen Komponenten des Greifers werden die Teillösungen unter

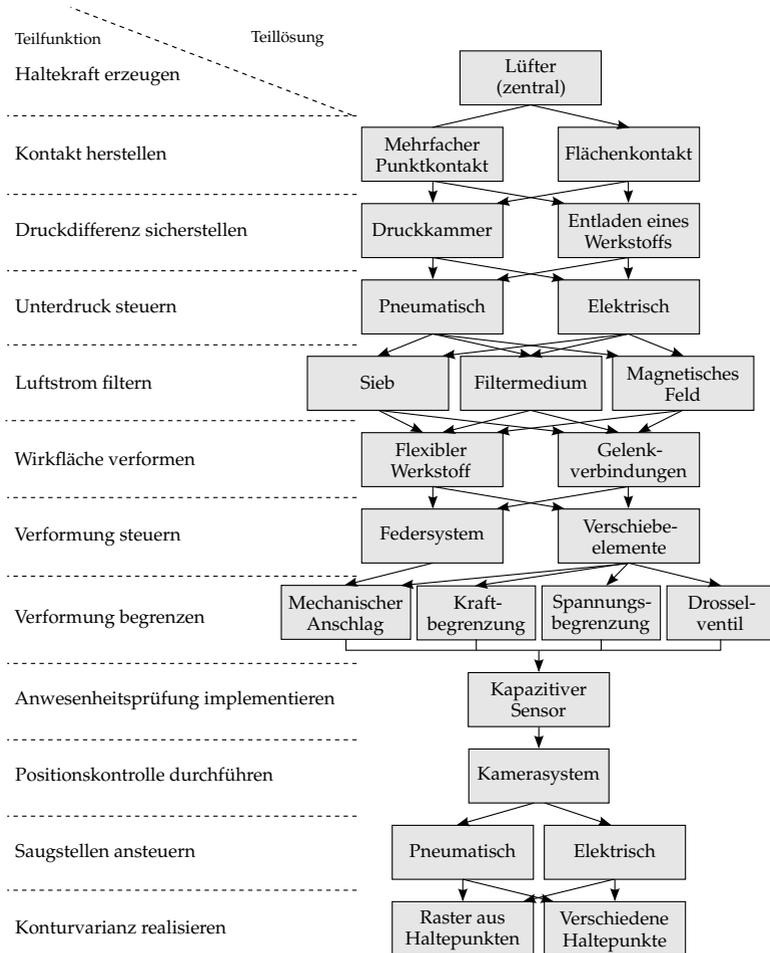


Abbildung 4.7: Konzeptbahn für die Umsetzung eines geeigneten Greifers

Verwendung des entwickelten Funktionsbaumes (siehe Abbildung A.8 im Anhang), des relationsorientierten Funktionsmodells (siehe Abbildung A.7 im Anhang) aus Abschnitt 3.2.3 sowie des Aktivitätsdiagramms aus Abbildung 4.5 formuliert. Nach Auswertung des Morphologischen Kastens ergeben sich für die Teilfunktionen kombinierbare Teillösungen. Das Prinzip des Niederdruckflächensaugens kann entweder über mehrfachen Punktkontakt verschiedener

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

singulärer Saugstellen oder über einen direkten Flächenkontakt mit dem Textil realisiert werden, wobei der Lüfter die zentrale Unterdruckerzeugung übernimmt. Davon abhängig gestaltet sich die Realisierung der Formflexibilität zur Verformung der Wirkfläche. Neben der Verwendung von Gelenkverbindungen eignet sich der Einsatz eines hochelastischen Werkstoffs. Bei der Gestaltung der Wirkfläche ist auch die Berücksichtigung des kapazitiven Sensors erforderlich, der in die Oberfläche des Greifers integriert wird und normal zur Wirkfläche angeordnet wird. Zur Vermeidung angesaugter Partikel lassen sich verschiedene Ansätze, wie bspw. ein Sieb oder ein Filtermedium, verfolgen. Unabhängig von der konturvarianten Wirkfläche kann das formatflexible Ansaugen von pneumatischen oder elektrischen Komponenten übernommen werden. Die einzelnen Konzepte werden jeweils detailliert untersucht und anhand einer Punktbewertung gegenübergestellt. Daraus wird das in Abbildung 4.8 vorgestellte Konzept ausgewählt. Die Ansaugung erfolgt mit einem zentralen Lüfter, während die konturvariante Wirkfläche über elektrische Hubmagneten eingestellt wird. Die Verformung wird über einzelne miteinander über Gelenkverbindungen verknüpfte Elemente der Wirkfläche realisiert.

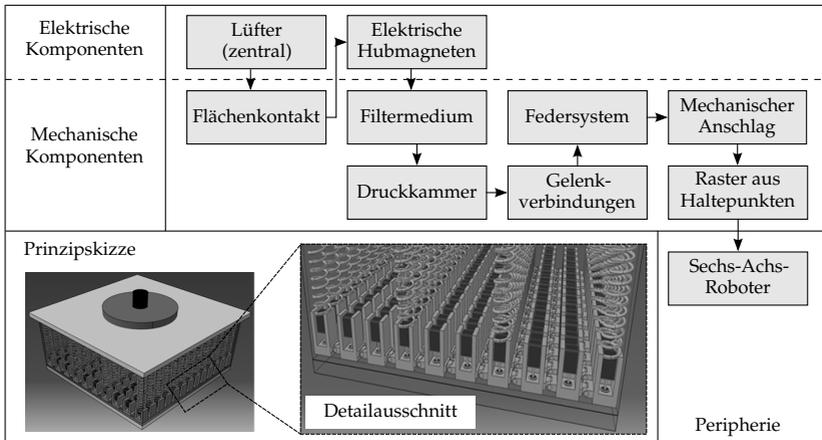


Abbildung 4.8: Gewähltes Konzept für die Umsetzung eines geeigneten Greifers

Konturvariante Wirkfläche

Zur Verformung der Wirkfläche werden Gelenkverbindungen eingesetzt. Reduziert auf den linearen Zustand ergibt sich eine kettenartige Struktur, auf deren

einzelnen diskreten Flächen die Wirkfläche mit Hubmagneten aktiviert bzw. deaktiviert wird, wodurch das konturvariante Ansaugen ermöglicht wird.

Zur Fertigung und Umsetzung des Konzepts werden verschiedene Systeme untersucht, mit denen eine flexible Wirkfläche erzeugt werden kann, da bei der erforderlichen Auflösung, einer Kantenlänge der diskreten Flächen von $l = 30 \text{ mm}$, der Einsatz mechanischer Gelenke zu einer hohen Komplexität bei der Auslegung und Montage führt. Die gezielte Nutzung von Kunststoffen, welche eine höhere Elastizität als Metalle aufweisen, ermöglicht es, die Gelenke innerhalb der Wirkfläche zu ersetzen.

Der Einsatz *additiver Fertigungstechnologien* gestattet aufgrund der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten den schichtweisen Aufbau der geforderten Struktur. Für weitere Details wird auf BREUNINGER ET AL. (2012) verwiesen. Abbildung 4.9 beschreibt, ausgehend von einem Erstentwurf zur Erfüllung der erforderlichen Funktionen, den Verlauf der Entwicklung vom Konzept (I, links oben) bis zur umgesetzten Lösung (II, rechts unten), wobei die Anforderungen an eine konturvariante Wirkfläche berücksichtigt werden. Zusätzlich wird durch die gewählte Ablagestrategie eine definierte passive Umformung und Ablage ermöglicht. Im Wesentlichen erfolgt die Optimierung der Kettenstruktur in den drei nachfolgend beschriebenen Entwicklungsstufen:

1. *Gewichtsreduktion durch Rippenstruktur*

Mit den Möglichkeiten der additiven Fertigung werden die Stützstrukturen und Halterungen auf strukturellen Leichtbau optimiert. Ausgenommen sind die durch die Hubmagneten verschlossenen Kammern, die aufgrund der erforderlichen Dichtigkeit dünnwandig ($t = 1 \text{ mm}$) gestaltet werden.

2. *Gelenkgestaltung mit mechanischem Endanschlag*

Unter Berücksichtigung einer hohen Anzahl von Bewegungszyklen werden die mechanischen Anschläge auf eine doppelte flächige Berührung ausgelegt (d), um im Vergleich zu einer einfachen Linienberührung (a) die Stabilität und dadurch die Lebensdauer zu erhöhen. Um die Auslegung des mechanischen Anschlags zu vereinfachen, liegt dieser in der Ruheposition fluchtend unter der Biegestelle (3).

Zusätzlich wird die Biegung des Gelenks in die Biegelinie verschoben und das Gelenk durch eine geeignete Materialverstärkung auf die Belastungen und Verformungen optimiert.

3. *Verschiebung und Optimierung der Biegelinie*

Zur Reduktion und Vermeidung von Verscherungen sowie Verschiebungen der textilen Struktur bei der Umformung wird im finalen Konzept

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

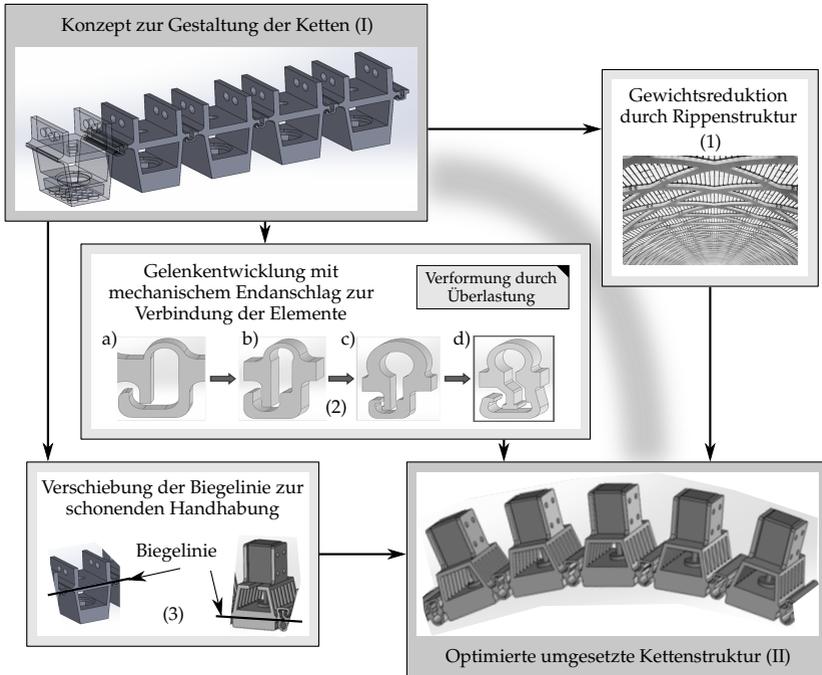


Abbildung 4.9: Entwicklung der konturvarianten formflexiblen Wirkfläche

die Biegelinie direkt auf die Wirkfläche bzw. Greiferoberfläche verlagert, wodurch die Biegestellen nach unten verschoben und gedreht werden.

Die Ketten bieten die Möglichkeit der konvexen und konkaven Anpassung an die Ablageform. Gleichzeitig ermöglicht die Wirkfläche eine stabile Form und definierte Umformung (im Gegensatz bspw. zu einer Schaumstoffstruktur). In Anlehnung an STRASSER (2010) wird bei der gesamten Konstruktion der Strömungsverlauf des Niederdrucks berücksichtigt.

Die Greiferoberfläche lässt bei der Ablage einen maximalen Radius von 602,41 mm zu, der sich aus der vorgegebenen Krümmung des Referenzbauteils berechnet, kann jedoch, abhängig von einem anderen Radius, der Ablageform individuell angepasst werden.

Integration eines Sensors in die Wirkfläche

Unter Berücksichtigung der Handlungsempfehlungen zur funktionsgerechten Anbindung und der erforderlichen Abmessungen aus Tabelle 3.12 lassen sich der kapazitive Näherungssensor sowie die Kabelführung in ein Element der Wirkfläche integrieren. Hierzu wird eine Kette des Greifers modifiziert und der Sensor neben dem Hubmagneten in ein Element der Wirkfläche eingepasst (vgl. Abbildung 4.10).

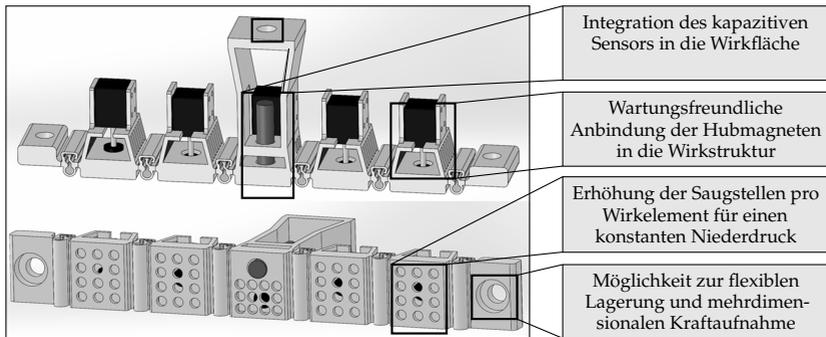


Abbildung 4.10: Konzept einer additiv gefertigten Kette mit integriertem kapazitiven Sensor

Außer durch einen bündigen Abschluss des Sensors auf der Wirkfläche sowie der Kabelführung wird die Montierbarkeit durch Erhöhung und Verbreiterung der Querstrebe sichergestellt. Die Befestigung erfolgt über ein Feingewinde an der Außenseite mithilfe von zwei Muttern (nicht dargestellt) an einer weiteren verbreiterten Querstrebe. Die Funktionalität des Niederdruckflächensaugens ist durch die Verschiebung des Hubmagneten auf die übrige freie Fläche des verbauten diskreten Elements der Wirkfläche garantiert, wodurch ein Abklappen des textilen Halbzeugs vermieden wird.

Darüber hinaus verfügen die Ketten über einen innen liegenden Lüftungskanal, welcher den Luftstrom auf mehrere kleine Bohrungen verteilt. Mit dieser angepassten Aufteilung wird die punktuelle Kraft auf das Textil durch das konstante Aufteilen des Unterdrucks auf das textile Halbzeug reduziert somit und eine schonendere Handhabung ermöglicht, da kein Einziehen der Textilien an den Saugstellen auftreten kann. Mit dieser Maßnahme wird die Geometrie des Gummistößels der Hubmagneten von der Oberfläche der Wirkfläche entkoppelt. Die Hubmagneten werden an den vorgesehenen Halterungen montiert und kön-

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

nen im Falle einer Wartung oder Reparatur durch eine einfache Verschiebewegung ausgewechselt werden. Neben den Aktoren können weitere Funktionen in die Wirkfläche integriert werden, wie [bspw.](#) der Einsatz von Heizstrukturen zur Aktivierung thermoplastischer Bindern.

Die Ketten besitzen zur Befestigung und Montage des Greifers an den Enden Bohrungen, an denen Kugellager montiert sind. Hiermit lässt sich eine flexible Lagerung realisieren, mit der die Ketten zu einer flächigen Struktur erweitert werden.

Konstruktiver Leichtbau zur Reduktion bewegter Massen

Die Hauptanforderung des konstruktiven Leichtbaus betrifft neben der Wirkfläche das gesamte Greifsystem, weshalb die vier wesentlichen Baugruppen untersucht werden. Die erste Baugruppe umfasst die *Wirkfläche*, deren umgesetzte Leichtbaumaßnahmen beschrieben wurden. Die *Federführungen*, welche die passiven Verformungen der Ketten aufnehmen, bilden die zweite Baugruppe des Greifers. Da die übergeordnete *Anschlussplatte* und die *formflexible Folie* gemeinsam für die Abdichtung des Greifers verbaut werden, werden diese beiden Baugruppen zusammengefasst. Die Wirkfläche wird zur Abbildung der geforderten Fläche gemäß dem Referenzbauteil aus fünf Ketten zusammengesetzt (Seitenlängen: 170 mm und 190 mm), wobei die Ketten untereinander zur Realisierung einer gleichmäßigen Verformung mit einer Aluminiumschiene verbunden sind ([vgl.](#) [Abbildung 4.11](#)). Die modifizierte Kette mit dem kapazitiven Sensor wird in der Mitte der Wirkfläche angeordnet.

Bei einer Umformung der Wirkfläche in der Ablageform wird der Höhenunterschied der einzelnen Glieder der Kette durch die fünf Federführungen ausgeglichen, die über Gelenke an die Wirkfläche gelagert sind und die Verbindung zur Anschlussplatte bilden.

Die einzelne, zentral angebrachte Federführung wird direkt mit der Kette und der Platte verschraubt. Durch das Sperren dieses Freiheitsgrades wird einer undefinierten, schwimmenden Lagerung entgegengewirkt, um die geforderte Positioniergenauigkeit zu erreichen. Die verwendete Druckfeder in der Federführung wird vorgespannt, um eine definierte Position der Führung im Ruhezustand sicherzustellen. Die Auslegung der Anschlussplatte, welche die Schnittstelle zum Roboter darstellt, erfolgt abhängig vom übergeordneten Greifsystem und den peripheren Komponenten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der umgesetzte Greifer modular an eine flexible Greifeinrichtung montiert ([vgl.](#) [Abschnitt 4.4.2](#)).

Zur Abdichtung des Greifers wird eine luftdichte Folie verwendet, die auf der Wirkfläche verklebt und mit Löchern versehen wird. Über einen Rahmen wird

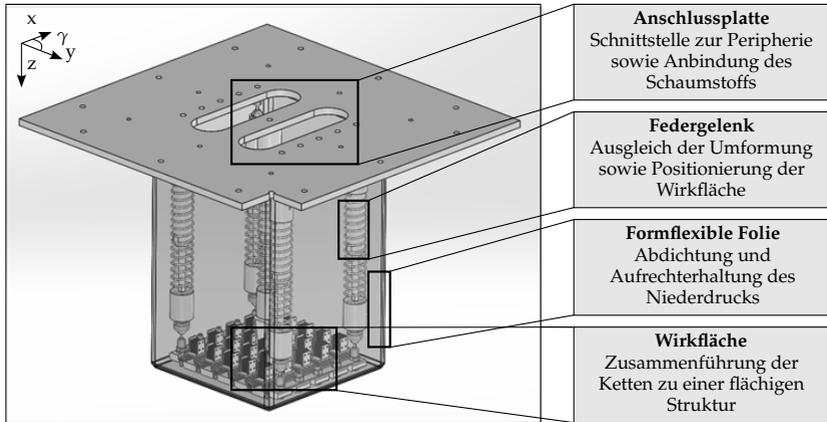


Abbildung 4.11: Konstruktion des Greifers unter Berücksichtigung aller wesentlichen Baugruppen und deren Aufgaben

die Folie zur Abdichtung an die Anschlussplatte geklemmt. Das Filtern des Luftstroms erfolgt mithilfe eines Schaumstoffs, der zur einfacheren Zugänglichkeit am Übergang zur Anschlussplatte montiert wird. Der Greifer erreicht mit der gegebenen Wirkfläche ein Gesamtgewicht von $G = 3,0 \text{ kg}$.

Sensorik

In Abschnitt 3.3.5 wurden die schädlichen Funktionen durch die Prüfaufgaben *Anwesenheitskontrolle des Textils* sowie *Positionskontrolle des Textils* zusammengefasst, zu deren Prüfung die Kombination aus Näherungssensor und Kamerasystem die geeignetste Lösung darstellt. Neben der Auslegung und Konstruktion des Greifsystems spielen die exakte Sensorauswahl und Anbindung eine wesentliche Rolle zur Erfüllung der definierten Anforderungen. Basierend auf den Ergebnissen der Sensorauswahl in Tabelle 3.12 und dem Exkurs zum Aufbau und zur Wirkungsweise der gewählten Sensorprinzipien in Abschnitt A.1 erfolgen die Auswahl und Anordnung der gewählten Sensoren im Handhabungsvorgang. Die nachgeschaltete informationstechnische Anbindung und Datenauswertung werden in Abschnitt 4.4.2 erarbeitet.

Kapazitiver Näherungssensor

Für kapazitive Sensoren, deren Wirkungsweise auf dem physikalischen Effekt eines Kondensators basiert, gilt zwischen der für die Funktionserfüllung erforderlichen Kapazität C und den geometrischen Größen der Wirkfläche A und des Abstands d vom Prüfbjekt der folgende Zusammenhang:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A_{kap}}{d_{Kap}} \quad (4.1)$$

Die elektrische Feldkonstante ϵ_0 sowie die materialabhängige relative Permittivität ϵ_r beeinflussen die Kapazität. Aufgrund der flexiblen Anordnung des Sensors mit frei wählbarem Abstand normal zur Wirkfläche wird für die Umsetzung ein kapazitiver Sensor¹ ausgewählt, der innerhalb eines Schaltabstandes von $d = 4 \text{ mm}$ ein vorhandenes Objekt detektiert und die Anwesenheit mit einem Spannungsabfall von $1,5 \text{ V}$ seines Ausgangssignals nachweist, das bei fehlendem Anliegen eines Objekts der Versorgungsspannung entspricht. Der geeignete Schaltabstand von $d = 4 \text{ mm}$ ermöglicht die Integration in die Kette sowie die Detektion des Textils im angesaugten Zustand während des Handhabungsvorgangs. Die analoge Ausgangsspannung des Sensors kann direkt von der Steuereinheit verarbeitet werden. Zur mechanischen Anbindung besitzt der Sensor eine zylindrische Form mit einem ISO-M8-Gewinde. Die Größe des Gewindes ist durch die Fläche der einzelnen Wirkelemente festgelegt.

Kamerasystem

Abbildung 4.12 zeigt rechts die Auslegung des Kamerasystems anhand der Anordnung zur Wirkfläche, deren vollständige Abdeckung die erforderliche Bildauflösung definiert.

Das gewählte optische System beruht auf dem Einsatz von CMOS-Bildsensoren (vgl. Abschnitt A.1). Eine CMOS-Kamera arbeitet mit einer einzelnen Bildaufnahme. Daher ist es ausreichend, den Greifer für jede Anwendung in eine definierte Lage über das Kamerafeld zu bringen. Das günstigste Verfahren, um die Positionsprüfung mit einem minimalen zeitlichen Mehraufwand umzusetzen, bildet die direkte Prüfung der Wirkfläche während des Abfahrens der Bahnkurve. Zusätzlich stellt eine möglichst geringe Änderung der Orientierung der Wirkfläche eine aus Prozesssicht sinnvolle Lösung dar.

Die Prüfung der Textilloberfläche hinsichtlich Faserfehlern und Verunreinigungen wird bereits tiefgehend von ORTH (2008) und MIENE ET AL. (2011) be-

¹Typ CNS8N4PC45/A2P (DIETZ 2016)

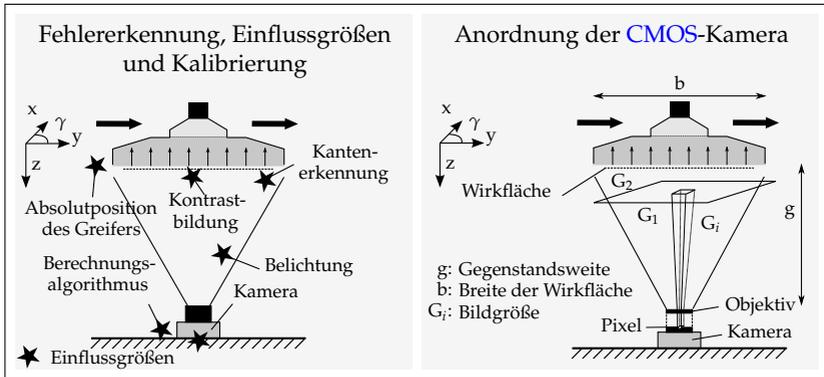


Abbildung 4.12: Funktionsweise und Anbindung der CMOS-Kamera

schrieben. Daher wird nachfolgend nur die Konturerkennung in Form der Randkurve des Textils fokussiert. Somit ist für die Kontrasterkennung auch die Verwendung von Schwarz-Weiß-Bildern ausreichend, wodurch die Bilder für die Auswertung in 256 Grauwerte aufgeschlüsselt gespeichert werden.

Zur Erreichung einer ausreichenden Auflösung für die Konturerfassung wird, bei einer vorgegebenen Gegenstandsweite $g = 300 \text{ mm}$ und einer Wirkfläche mit Breite $b_1 = 190 \text{ mm}$ und $b_2 = 170 \text{ mm}$, die Bildgröße G_i definiert, die vollständig erfasst werden muss (vgl. Abbildung 4.12, rechter Bildabschnitt).

Für die Bildaufnahme soll eine CMOS-Kamera vom Typ EXG50 eingesetzt werden (BAUMER 2016). Bei einer Pixelzahl von 2592×1944 Bildpunkten mit einer Pixelgröße von $2,2 \mu\text{m} \times 2,2 \mu\text{m}$ beträgt die Bildwandlergröße der Kamera:

$$B_i = 2,2 \mu\text{m} \cdot \begin{pmatrix} 2592 \\ 1944 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5,702 \text{ mm} \\ 4,277 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Unter Verwendung eines Objektivs mit der Brennweite $f = 7,0 \text{ mm}$ und einer Blendenzahl von 1,5 berechnet sich die abdeckbare Bildgröße G_i nach ORTH (2008) zu:

$$G_i = \left(\frac{g}{f} - 1 \right) \cdot B_i = \left(\frac{300 \text{ mm}}{7,0 \text{ mm}} - 1 \right) \cdot \begin{pmatrix} 5,702 \text{ mm} \\ 4,277 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 244,37 \text{ mm} \\ 179,02 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

Nach Abgleich des Sichtbereichs der Kamera mit der vorliegenden Breite der Wirkfläche ist das Kamerasystem als geeignet zu bewerten. Die Kalibrierung erfolgt mit einer Platte, die auf der Wirkfläche angebracht wird.

Gemäß DIETRICH & RADECK (2015) und PLEGNIERE (2011) wird die Auflösung der Kamera durch die Mindestgenauigkeit von 1/20 der translatorischen Abweichung auf 100 µm definiert und durch die Kamera erreicht (vgl. Abbildung 4.4). Für die gewünschte Positionsermittlung des Textils stellt die Randkurve die entscheidende Größe dar, auf deren Basis die geforderte Pose berechnet werden kann. Speziell bei der Bildaufnahme textiler Halbzeuge gilt es weitere wesentliche Einflussgrößen zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 4.12, links) Das sichere Erkennen der Textilkontur ist eine wesentliche Anforderung bei der Auswertung. Hierzu muss die Beleuchtungsquelle für einen ausreichenden Kontrast in Abhängigkeit von der Einfallrichtung des Lichts gewählt werden. Ebenso gilt es das Reflexionsverhalten des Textils bei der Bildaufnahme zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Versuchsanlage wird das günstigste Reflexionsverhalten erreicht, wenn eine größtmögliche Absorption des einfallenden Lichts durch das Textil bei gleichzeitiger Vermeidung von Schattenwürfen vorliegt. Hierfür eignet sich eine gerichtete Beleuchtung. Den besten Kompromiss zwischen gleichmäßiger Beleuchtung durch diffuses Licht und gleichzeitig größtmöglichem Absorptionsverhalten bietet die Dombelichtung. Weiter liefert eine Beleuchtung unter 45° zur Hauptfaserrichtung des Textils ein geeignetes Kontrastverhältnis bei minimalen Reflexionen.

Zentrale Steuereinheit

Die zentrale Steuereinheit als Verbindungselement verschiedener Domänen unterteilt sich in zwei Teilbereiche zur Auswahl und Implementierung der Hardware- und Softwarekomponenten. Damit verbunden sind der Steuerungsaufbau sowie die Belegung der Ein- und Ausgänge infolge des Schaltschrankaufbaus und der Elektroinstallation (BINDEL ET AL. 2013).

Für die Umsetzung des Steuerungssystems stehen verschiedene Bauarten und Architekturen zur Auswahl. Die zu wählende Steuerung besitzt einen entscheidenden Einfluss auf die Erfüllung der Hauptaufgaben. In Abbildung 4.13 werden die wesentlichen Auswahlkriterien aufgeführt, die sich maßgeblich aus den Anforderungen aus Abschnitt 4.3 ergeben. Auf der Basis dieser Auswahlkriterien wird die Steuerung ausgewählt.

Aufgrund der Online-Überwachung werden erhöhte Anforderungen an die

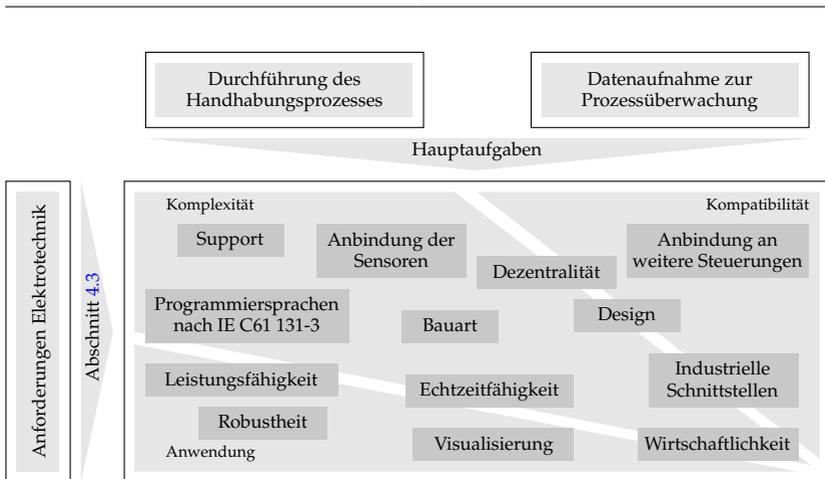


Abbildung 4.13: Kriterien für die Wahl der Steuerung

Verarbeitungszeit und gleichzeitig auch an die Kompatibilität zu den eingesetzten Sensoren und Aktoren gestellt. Durch eine robuste Ansteuerung sollen die Anforderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit und des Betriebs für die industrielle Anwendung erfüllt werden. Im Zuge der zunehmenden Vernetzung sollen die erhaltenen Daten für eine weitergehende, übergreifende Verwendung den anderen Kommunikationsteilnehmern zugänglich gemacht werden.

Nach Durchführung einer Punktbewertung wird eine Echtzeitsteuerung mit integrierten SPS-, NC- und CNC-Funktionen gewählt, weshalb die Programmierung mittels TwinCAT 3 erfolgt. Zur Realisierung eines großen Spektrums von Programmiermöglichkeiten werden dem Anwender verschiedene Softwareentwicklungsumgebungen (bspw. Visual Studio) und Schnittstellen (bspw. Matlab Simulink) bereitgestellt.

Abbildung 4.14 skizziert schematisch die Architektur und den Aufbau der eingesetzten Steuerung zur Anbindung aller Aktoren und Sensoren.

Übergeordnet wird die Steuereinheit Beckhoff CX2040-0120 eingesetzt, in der Buskoppler als weitere dezentrale Peripherieeinheiten fungieren und über die Busanbindung EtherCAT flexibel im Arbeitsraum eingesetzt werden können. Damit ist auch eine modulare Anbindung an das Greifsystem gewährleistet. Die Buskoppler können individuell bedarfsgerecht mit analogen und digitalen Klemmen versehen werden, worüber alle Komponenten auf dem Greifsystem angesteuert werden. Das Grundmodul der Steuerung im Steuerpult beinhaltet neben der Central Processing Unit (CPU) und dem Chipsatz einen

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

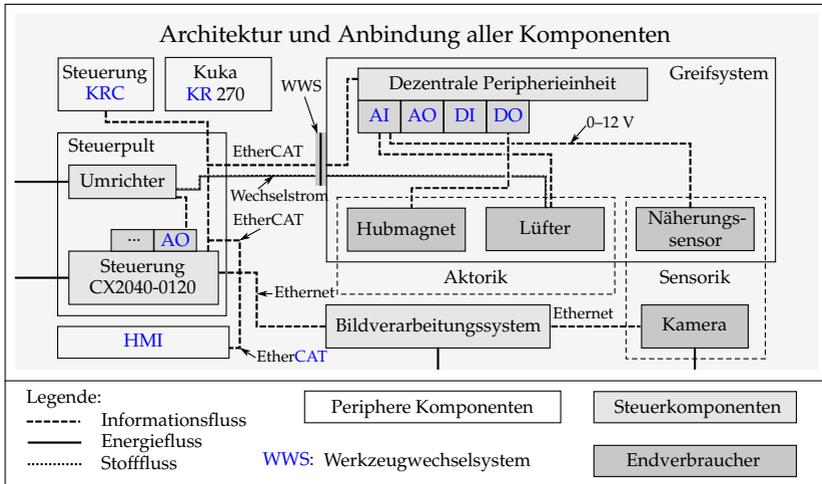


Abbildung 4.14: Schematischer Aufbau der Steuerung

integrierten Arbeitsspeicher. Die Visualisierung erfolgt über ein Touchpanel. An das Grundmodul der Steuereinheit wird ein zusätzliches System über eine Transmission-Control-Protocol-(TCP)/Internet-Protocol-(IP)-Verbindung zur Bildverarbeitung angeschlossen, die wiederum über den Interface-Standard GigE Vision mit der Kamera kommuniziert. Die exakte Anbindung der Aktoren wird nachfolgend beschrieben.

Realisierung der formflexiblen Ansteuerung der Wirkfläche

Durch Öffnen und Schließen der einzelnen Hubmagneten gemäß der Auflösung der Wirkelemente lässt sich die Wirkfläche selektiv mit Unterdruck beaufschlagen, womit das Vereinzeln der textilen Halbzeuge ermöglicht wird. Die Hubmagneten sind hierfür am Ende mit Gummistopfen versehen, die den Luftstrom auf der Wirkfläche unterbrechen. Die Aktoren werden bistabil angesteuert, sodass durch die Verwendung kurzer Stromimpulse zum Bewegen der Hubmagneten nur ein Minimum an Energie gegenüber einer dauerhaften Bestromung aufgewendet werden muss. Die Auslegung und Gestaltung der Gummistopfen und des Luftstroms erfolgen in Anlehnung an die Ergebnisse von STRASSER (2012).

Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt mit einer H-Brücke, mit der der Impuls

zum Öffnen des Stößels erzeugt wird. Im vorliegenden Szenario werden 25 Aktoren verbaut.

Realisierung der Unterdruckerzeugung

Die Radialgebläse zur Niederdruckerzeugung werden mithilfe eines Umrichters angesteuert, dessen Wechselspannung am Ausgang sich variabel einstellen lässt. Im Grundsatz besteht der Umrichter aus einem vorgeschalteten Gleichrichter, der einen Zwischenkreis speist, und einem nachgeschalteten Wechselrichter, mit dem die Wechselspannung für das Asynchronegebläse ausgegeben werden kann. Die Einstellung der Drehzahl für den Unterdruck erfolgt durch den Umrichter mit einem externen Analogsignal.

Aus Gewichtsgründen und zur Abschirmung vor Schmutzpartikeln ist der Umrichter im Steuerpult angeordnet und überträgt die Versorgung der Lüfter sowie die erforderliche Drehzahl über die Wechselspannung auf den Endeffektor. Die vorgegebene Drehzahl wird von der Steuereinheit über ein Analogsignal an den Umrichter übergeben. Zur thermischen Überwachung verfügt das Radialgebläse über einen Positive-Temperature-Coefficient-(PTC)-Widerstand in der Motorwicklung, dessen analoges Signal in die Steuereinheit eingelesen wird. Zusätzlich zur Steuerung der Aktoren erfasst die dezentrale Peripherieeinheit auf dem Endeffektor die Daten des kapazitiven Sensors. Zur Bildverarbeitung **BV** und Auswertung der Kameradaten wird die zusätzliche **BV**-Steuerung eingesetzt, die auf die Kamera abgestimmt ist und eine standardisierte Schnittstelle über **TCP/IP** zur zentralen Steuerung besitzt. Hiermit wird sichergestellt, bei einer Änderung des Aufbaus auch die Kamera mit deren Ansteuerung modular und flexibel einsetzen zu können. Der detaillierte Informations- und Datenfluss zur Auswertung der Sensordaten werden nachfolgend vorgestellt.

Datenverarbeitung und Visualisierung

Die Datenauswertung erfolgt in der zentralen Steuereinheit. Abhängig von der erforderlichen Detaillierungsebene der beschriebenen Aufgabe lassen sich die Sensordaten – ausgehend von einem Hinweissignal für den Bediener bis zu einer automatisierten Ausregelung des Fehlers – unterschiedlich einsetzen. Damit ergeben sich für die Erfüllung der einzelnen Prüfaufgaben verschiedene Möglichkeiten, in welcher Form die Daten nach der Auswertung verarbeitet werden können (vgl. Abbildung 4.15).

Am Beispiel der Anwesenheitsprüfung des textilen Halbzeugs lässt sich auf der universellen Ebene ein Signal ausgeben, mit welchem dem Bediener entweder ein Hinweis- oder ein Alarmsignal gegeben wird. Im Gegensatz dazu

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

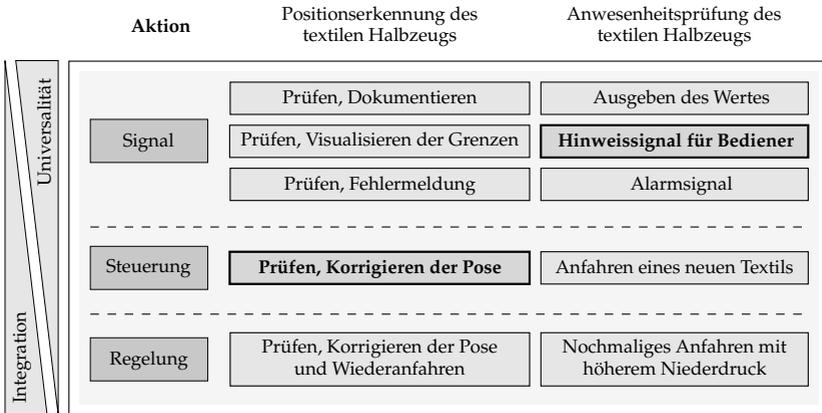


Abbildung 4.15: Ebene der Datenauswertung bei der Ansteuerung und Eliminierung der Hauptaufgaben

bietet die Regelung durch das nochmalige Anfahren mit erhöhtem Niederdruck die höchste Form der Integration. Gleichzeitig verringern sich die universelle Einsatzfähigkeit und die Übertragbarkeit auf andere Systeme. Die Einteilung lässt sich auf sämtliche weitere Aufgaben übertragen. Die Korrektur der Pose kann aufgrund der Greifergeometrie nur in einem bestimmten Toleranzbereich erfolgen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen beispielhaft für jede Aufgabe unterschiedliche Ebenen der Datenauswertung umgesetzt und evaluiert werden. Die gekennzeichneten Zustände in Abbildung 4.15 zeigen die ausgewählten Ebenen.

Zur Positionserkennung der textilen Halbzeuge wird eine Steuerung mit anschließender Fehlerkorrektur implementiert. In Abhängigkeit der Abweichung wird entweder die Roboterposition korrigiert oder das Textil als Ausschuss deklariert, sodass durch die Positionsänderung des Greifers in der Form keine Beschädigung auftreten kann. Hingegen wird das Sensorsignal des kapazitiven Näherungssensors dem Bediener in Form eines Hinweissignals übermittelt. Daraus ergibt sich der in Abbildung 4.16 beschriebene Ablauf für die Auswertung, in dem die Tätigkeiten der einzelnen Steuerungen aufgeteilt werden.

Die Kommunikation innerhalb der Steuerung basiert auf der integrierten Entwicklungsumgebung (Integrated Development Environment, IDE) TwinCAT 3, mit der unterschiedliche Anwendungsprogramme zusammengefasst sind. Durch diese Entwicklungsumgebung wird mit einer modularen Plattform die Integration in Visual Studio ermöglicht. Die Module bestehen beispielhaft aus

Programmiersprachen der erweiterten Norm International Electrotechnical Commission (IEC) 61131 sowie einer C- bzw. C++-Entwicklungsumgebung (DIN 1983). Zur Erfüllung der Echtzeitfähigkeit von TwinCAT 3 lassen sich die Module auf verschiedene Kerne einer Multicore-CPU auslagern und durch das produktspezifische eXtended Automation Engineering (XAE) deterministisch ausführen (BECKHOFF 2016). Mit dem Aufbau und den Programmiermöglichkeiten werden die Voraussetzungen für eine zeitnahe plattformunabhängige Implementierung in die Steuerung erfüllt. Dadurch lässt sich die Steuerungsumgebung, außer für die nachfolgend detaillierter beschriebenen Prüfaufgaben, auch für weitere umfangreichere Anwendungen, wie bspw. eine vollständige Faserwinkelmessung und eine Skalierung auf größere Textilgeometrien und zusätzliche Sensorsysteme, einsetzen.

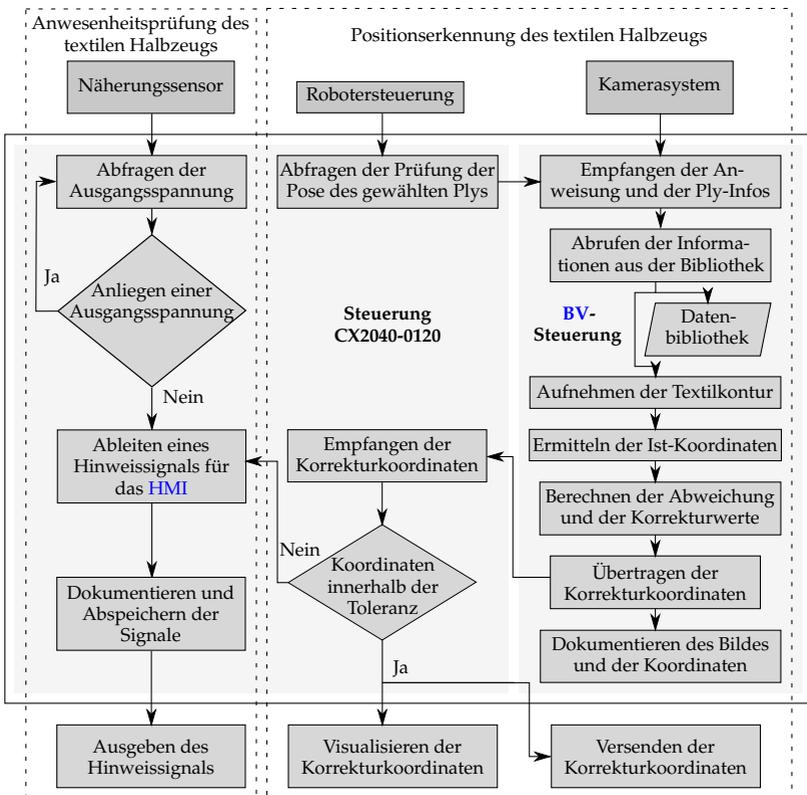


Abbildung 4.16: Ablaufdiagramm der Auswertung

Anwesenheitsprüfung des textilen Halbzeugs

Ausgehend vom kapazitiven Näherungssensor wird das analoge Spannungssignal über einen Abwärtsschaltregler von 24 V (Ausgangssignal) auf 5 V konvertiert und über die Steuerung eingelesen. Der Nachweis der Anwesenheit des Textils wird durch das Anliegen der Spannung geprüft, wobei bei einem Spannungsabfall ein Hinweissignal an den Bediener ausgegeben wird. Die Erweiterung der Anwesenheitsprüfung hin zu einer Steuerung *bzw.* Regelung lässt sich anstelle der Ausgabe und Visualisierung des Signals über eine Korrektur der Lüfterleistung, ein Unterbrechen des Prozesses oder ein erneutes Anfahren der Aufnahmeposition implementieren. Jede Meldung wird zur Nachvollziehbarkeit des Prozessablaufs abgespeichert.

Positionserkennung des textilen Halbzeugs

Im Gegensatz zur Anwesenheitsprüfung wird zur Positionsprüfung die korrekte Stellung des Endeffektors mit der Robotersteuerung über dem Prüfbereich vorausgesetzt. Die Hauptsteuerung CX2040-0120 übernimmt dabei die Rolle des Servers, während die lokale kameraspezifische Steuerung den Client repräsentiert. Nach dem Abrufen der Textilkontur aus der Datenbibliothek mit einem zu CAD-Systemen kompatiblen Format, wie *bspw.* dem Drawing-Interchange-File-(*dx*f)-Format, erfolgt die Konturaufnahme über ein Bussystem durch die Kamera mit anschließendem Abgleich der Soll- und der Ist-Position des Halbzeugs.

Die Datenübertragung erfolgt über *GigE* Vision, einer speziellen Ethernet-Verbindung. Durch die Dokumentation jeder Textillage stellt die Kamera dabei ein Werkzeug zur Nachverfolgung der Bauteilqualität dar. Die Bildauswertung erfolgt mit dem Programm Halcon, das die Abweichung anhand der drei Koordinaten x , y und γ definiert, wodurch die translatorische Verschiebung mit den beiden Beträgen Δx und Δy sowie die Drehung des Textils mit $\Delta\phi$ in der Wirkebene angegeben wird.

Die Kanten des Textils werden bei der Bildanalyse über die Grauwertänderung von Pixel zu Pixel detektiert. Eine Interpolation des Grauwertverlaufs ermöglicht ein auf Subpixel exaktes Erkennen des Kantenverlaufs. Die Kanten und die Textillage des aufgenommenen Bildes werden mit der vorgegebenen Kontur überlagert. Ausgegeben wird die Position des Textils über die Lage des Flächenschwerpunktes der Kontur anhand der drei eingeführten Koordinaten. Nach der Dokumentation des Bildes und der Abweichungen werden die Korrekturwerte der zentralen Steuereinheit für die nachfolgenden Steuerungsaufgaben übergeben.

Bei Erfüllung der geforderten Genauigkeit werden die drei Lagekoordinaten

zur Korrektur der Position an die Robotersteuerung weitergegeben, andernfalls wird ein Hinweissignal für den Bediener ausgegeben. In der Robotersteuerung werden die Korrekturwerte zur Berechnung einer neuen Bahnkurve verwendet. Da die Abweichungen im Bereich von maximal $\Delta X \pm 10 \text{ mm}$ bzw. $\Delta \Phi \pm 5^\circ$ liegen, übt die Korrektur keinen Einfluss auf die Drapierstrategie aus. Die Ergebnisse der Datenverarbeitung werden auf dem HMI des Steuerpults für den Bediener visualisiert (vgl. Abbildung 4.17). Zu jedem Zeitpunkt des Handhabungsvorgangs können im Interface der Status sowie aktuelle Informationen zu den aktiven Komponenten abgerufen werden, währenddessen die zentrale Oberfläche den übergreifenden Status sowie die Korrekturdaten der Positions- und Anwesenheitskontrolle visualisiert.

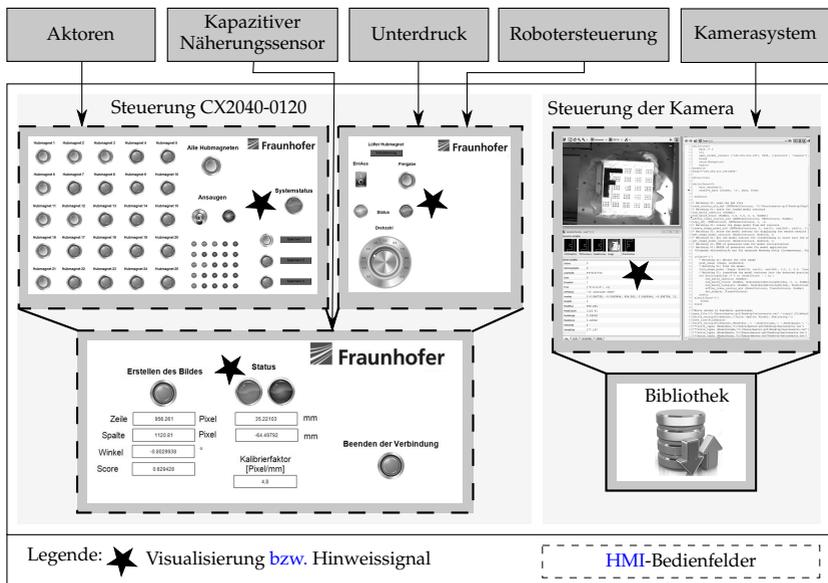


Abbildung 4.17: Überblick über das HMI

Peripherer Aufbau

Zur vollständigen Durchführung des Handhabungsvorgangs werden zusätzliche Komponenten im Versuchsfeld benötigt. Neben einem Industrieroboter

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

(Kuka KR 270) ist ein Bereich zur Überwachung des Prozesses durch den Bediener erforderlich, der, je nach Aufgabenbereich, individuell konzipiert und angeordnet wird. Für die Materialzu- und abführung dient in der vorliegenden technischen Umsetzung ein Aufnahmetisch, auf dem die Textilien positioniert werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, ein Zuschneidsystem oder einen Materialspeicher (bspw. in Form eines Paternosterregals) zur Pufferung einzusetzen. Das Textil wird im vorliegenden Szenario auf einer speziellen Form abgelegt, womit die Krümmung des Referenzbauteils abgebildet wird. Zur Erhöhung der Flexibilität des Technikaufbaus ist der formflexible Greifer auf einer übergeordneten Greiferanbindung montiert, womit parallel weitere Greifer entwickelt und qualifiziert werden können (GRAF ET AL. 2014).

4.4.3 Systemintegration

Die Systemintegration lässt sich in eine räumliche und eine kommunikative Ausprägung unterscheiden, wodurch neben der Anordnung aller Komponenten die übergeordneten Signal- und Informationsflüsse definiert werden.

Räumliche Integration

Unter Berücksichtigung aller erforderlichen Komponenten wird in Abbildung 4.18 das Layout eines möglichen Fertigungsszenarios mit einem Steuerungsbereich für die Überwachung und Steuerung des Handhabungsprozesses skizziert. Die modulare Anordnung des Aufnahmetisches mit der Ablageform im direkten rechten Anschluss sowie mit der zwischengeschalteten Kamera visualisiert die minimale Roboterbahn, die für den Handhabungsvorgang erforderlich ist. Durch die zusätzliche Zeit zur Konturerfassung wird eine geringe Taktzeiterhöhung erwartet. Gleichzeitig wird durch die Anordnung die größtmögliche Flexibilität für den An- und Abtransport des Halbzeugs gewährleistet. Das Kamerasystem wird in den Ablauf des Handhabungsvorgangs so integriert, dass die Textilablage im weiteren Arbeitsbereich nach der Prüfung variabel durchgeführt werden kann. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit lässt sich das Layout erweitern, indem sowohl eine Parallelisierung der Tätigkeiten auf dem Aufnahmetisch bzw. der Ablageform als auch eine Erweiterung des Tätigkeitsbereichs des Roboters ermöglicht wird (vgl. Abbildung 4.18, rechts).

Kommunikative Integration

Je nach Prüfstrategie ergeben sich unterschiedliche Informationsflüsse zwischen den Domänen. Für die Korrektur der Textilposition werden die Koordinaten

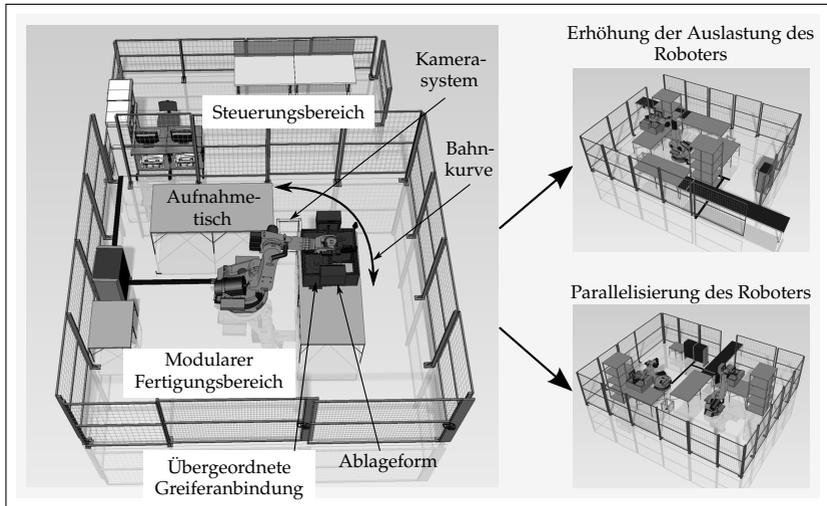


Abbildung 4.18: Räumliche Anordnung der Komponenten mit weiteren Ansätzen zur modularen Gestaltung

über **PROFINET** auf die Steuerung des Roboters übertragen. Zur Überwachung und Dokumentation der Prozessparameter lässt sich die zentrale Steuereinheit in eine übergeordnete **SCADA**-Einrichtung integrieren.

4.5 Umsetzung und Realisierung der Versuchsanlage

Abbildung 4.19 zeigt einen Ausschnitt der Simulationsumgebung sowie den finalen umgesetzten Aufbau. Zur Überprüfung der Zugänglichkeit und zur Vermeidung von Kollisionen der beteiligten Komponenten wird das skizzierte Layout vor der praktischen Umsetzung simulativ abgesichert, wodurch die exakte Anordnung sowie die geometrischen Abmessungen aller Komponenten festgelegt werden.

4 Konzeption und Umsetzung einer Versuchsanlage

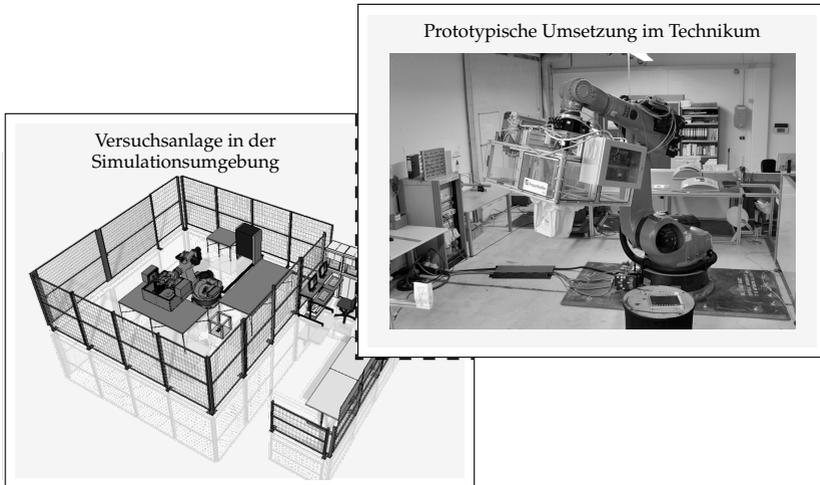


Abbildung 4.19: Anordnung der Versuchsanlage in der Simulationsumgebung und nach der Umsetzung

4.6 Zusammenfassung

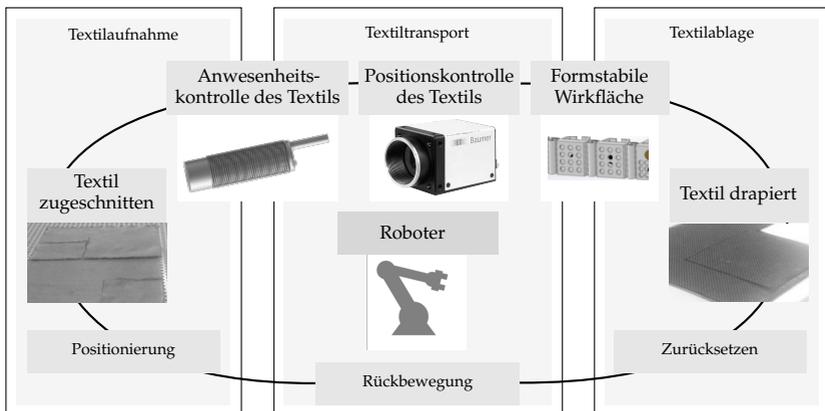
Zur Umsetzung der in Kapitel 3 identifizierten Aufgaben wurden im vorliegenden Kapitel zunächst die notwendigen Domänen definiert, deren Bestimmung maßgeblich von den Handlungsempfehlungen aus Abschnitt 3.3.5 beeinflusst wurde. Im Anschluss erfolgte die Beschreibung der Auswirkungen auf die Komponenten des Handhabungssystems. Anhand der allgemeinen VDI-Vorgehensweise 2206 wurde am Beispiel der vorliegenden Versuchsanlage durch die Detaillierung der Domänen die konkrete Umsetzung eines Handhabungssystems in eine konvexe Ablageform erarbeitet, die sich für alternative Sensorlösungen skalierbar erweitern lässt. Als Referenzbauteil wurde die Abdeckung einer Hinterradschwinge für ein Motorrad betrachtet, die aus sechs Textillagen besteht. Dadurch wurden die Voraussetzungen für die nachfolgende technische und wirtschaftliche Bewertung in Form ausführlicher Versuchsreihen geschaffen.

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

5.1 Zielsetzung der Validierung und Definition der Vorgehensweise

Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Validierung der erarbeiteten technischen Lösung. Hierzu werden die Grenzen des Handhabungssystems untersucht und die resultierenden Potenziale formuliert. Als Grundlage dienen Versuchsreihen, die auf die Ergebnisse der allgemeingültigen Vorgehensweise übertragen werden. Kapitel 6 fokussiert die wirtschaftliche Bewertung im industriellen Umfeld unter Betrachtung unterschiedlicher Szenarien, deren Basis im vorliegenden Kapitel geschaffen wird.

Abbildung 5.1 zeigt schematisch den durchgeführten Handhabungsprozess mit der Anwesenheits- und Positionsprüfung durch den Näherungssensor sowie durch das Kamerasystem. Mit Fokus auf das Niederdruckflächensaugen führt STRASSER (2012) in seiner Arbeit Untersuchungen zur Prozesssicherheit des Greifers durch. Dabei wird diesem Wirkprinzip ein sehr günstiges Verhalten



Bildquelle: Dietz Sensortechnik, Baumer Optronic GmbH

Abbildung 5.1: Ablauf des Referenzprozesses mit den eingefügten Sensorlösungen

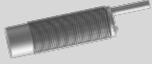
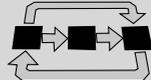
für den Einsatz luftdurchlässiger textiler Halbzeuge bescheinigt, woraus auch

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

die Verwendung des Greifprinzips für das vorliegende Handhabungssystem folgt. Daher werden die Wechselwirkungen zwischen Textil und Greifsystem nicht untersucht. EHINGER (2013) beziffert für den Drapiervorgang die erreichbare Positioniergenauigkeit auf $\Delta x = \pm 1,5 \text{ mm}$. Aus den Untersuchungen von STRASSER (2012) und EHINGER (2013) lassen sich dabei folgende Annahmen folgern:

- Fokussierung auf die Qualität des Greifprinzips und auf die Drapierstrategie (EHINGER 2013; REINHART ET AL. 2012)
- Ideale Prozessumgebung (keine qualitativen Abweichungen des Halbzeugs bedingt durch Fehler während der Textilherstellung sowie Auftreten weiterer übergeordneter Produktionsunterbrechungen)
- Betrachtung einzelner Teilschritte des Preformprozesses (keine übergreifende Untersuchung des Absortier- und Drapierprozesses)
- Zugrundelegen einer exakten Aufnahme des textilen Halbzeugs

Übertragen auf das Handhabungssystem lassen sich die schädlichen Funktionen und Prüfaufgaben in die übergeordneten Zielgrößen Prozess- und Produktqualität eingruppiieren (vgl. Abbildung 5.2).

Anforderungen	Schädliche Funktionen	Prüfstrategie	Zielgrößen
Sicheres Aufnehmen des Halbzeugs	Halbzeug wird nicht gegriffen	Anwesenheitskontrolle des Textils	Prozessqualität
Detektion des Abfallens	Halbzeug fällt ab		
Positionsgenaueres Ablegen	Halbzeug wird nicht positioniert	Positionskontrolle des Textils	Produktqualität
Kein Zerstören der Textilkontur	Ablageposition nicht korrekt		

Bildquelle: Dietz Sensortechnik, Baumer

Abbildung 5.2: Einteilung der Sensorlösungen gemäß den Anforderungen und Zielgrößen

Zur Validierung eines realen Produktionsszenarios müssen daher Randbedingungen und Grenzen definiert werden, mit denen sichergestellt wird, dass

textile Halbzeuge in der gebotenen Zeit unter Einhaltung der geforderten Ab-
 lagegenauigkeit und Verfügbarkeit des Prozesses abgelegt werden können.
 Die Zielgrößen sind unabhängig voneinander, da trotz einer prozesssicheren
 Handhabung mit dem kapazitiven Näherungssensor von der Aufnahme bis
 zum Drapieren in die Form die exakte Positionierung des Textils nicht über-
 prüft werden kann. Zudem ist auch der umgekehrte Vorgang möglich, dass ein
 exaktes Ablegen durch die Positionsprüfung und Steuerung nicht zwingend
 eine hohe Zuverlässigkeit des Prozesses voraussetzt. Die erreichte Genauigkeit
 des abgelegten Textils liefert eine Aussage über die nachfolgende Qualität des
 Bauteils und Produkts.

Neben den globalen Zielgrößen werden in Abbildung 5.3 die wesentlichen zu-
 gehörigen untergeordneten Zielgrößen Zeit, Qualität, Kosten in einem Dreieck
 identifiziert und gruppiert, um die für die übergreifende Bewertung erforder-
 lichen Größen zu ermitteln (ARNDT ET AL. 2015). Die Zielgröße *Prozessqua-
 lität* weist die größte Schnittmenge zur Prozesszeit auf, da ein unzureichend
 funktionsfähiger Prozess die größten Auswirkungen auf die Prozesszeit im
 Handhabungssystem hat.

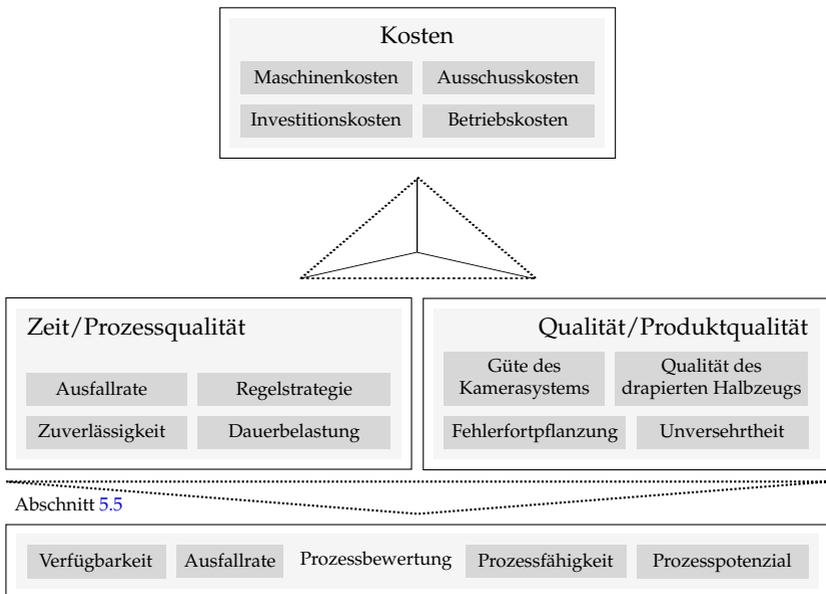


Abbildung 5.3: Einordnung der Bewertungsverfahren

Hieraus abgeleitet ermöglichen Größen wie die Zuverlässigkeit eine belastbare Aussage zur Prozessqualität. Unter Berücksichtigung der übergeordneten Produktqualität geht die Ablagequalität des Textils mit der Qualität der Preform einher, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des späteren Bauteils hat. Einen weiteren Einfluss bildet die Güte der Sensorik, da nur bei einer ausreichenden Messgüte die geforderte spätere Bauteilqualität erreicht werden kann. Umrahmt werden die beschriebenen Kriterien von den auftretenden Kosten, die Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Gesamtlösung ermöglichen. Zusammenfassend lassen sich die umgesetzten Sensorlösungen durch die Analyse der erreichbaren Prozess- und Produktqualität validieren, deren Umsetzung in den nachfolgenden Abschnitten 5.3 und 5.4 beschrieben wird. Zur Erarbeitung der Zielgrößen werden Versuchsreihen auf der Basis der statistischen Versuchsplanung durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.2). Die Validierung erfolgt anhand der beschriebenen Hinterradschwinge eines Motorrads aus Abschnitt 4.2.

5.2 Untersuchung der Einflussgrößen und Ableitung des Validierungsansatzes

Die Formulierung der wesentlichen Einflussgrößen stellt die Voraussetzung für die Berechnung der in Abbildung 5.3 aufgeführten Untersuchungsgrößen dar. Gemäß dem Vorgehen zur Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren bezeichnen DIETRICH & SCHULZE (2014) Einflussgrößen als Größen, die Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse ausüben. Einflussgrößen lassen sich in Steuergrößen und Störgrößen unterteilen, durch deren Variation sich ihr Einfluss auf das Betriebsverhalten bestimmen lässt. Einer Störgröße kann dabei kein fester Wert zugeordnet werden (KLEPPMANN 2013). Abbildung 5.4 listet die wesentlichen Ziel- und Einflussgrößen auf und ordnet sie qualitativ den definierten Zielgrößen zu.

Eine wesentliche Steuergröße für die Prozessqualität stellt der Ansaugdruck des Greifers dar, zudem beeinflusst eine ungleichmäßige Aufnahme­fläche als Störgröße das Prozessverhalten. Die weiteren Störgrößen beziehen sich auf die Charakteristik des Kamerasystems. Zum Beispiel kann sich eine falsche Belichtung negativ auf die Prüfung auswirken. Die Verfahrensgeschwindigkeit wirkt auf beide Zielgrößen, wohingegen die Ablagestrategie vorwiegend Einfluss auf die Produktqualität ausübt. Als zusätzliche Steuergrößen können weitere Geschwindigkeiten und Verweilzeiten während des Prozessablaufs festgelegt werden. Aus dem Überblick über die Einflussgrößen lässt sich ein greiferspezifischer

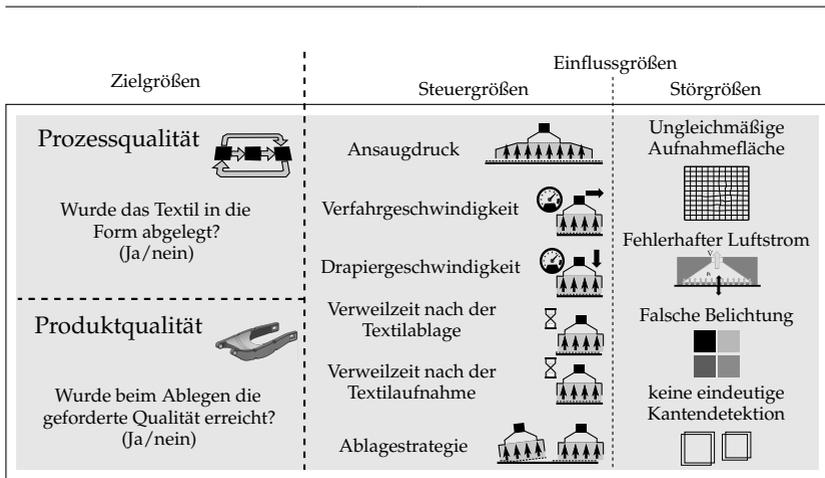


Abbildung 5.4: Ableitung der Einflussgrößen aus den Problemformulierungen

Zusammenhang zwischen dem Handhabungssystem und den Einflussgrößen ableiten. Daher sind bei Verwendung eines alternativen Handhabungsprinzips oder der Variation des textilen Halbzeugtyps weitergehende Größen zu ermitteln.

Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen leiten sich für die Bewertung der beiden Zielgrößen die nachfolgenden Zielsetzungen ab, die in den anschließenden Abschnitten detailliert erarbeitet werden. Die optimale Einstellung der Einflussgrößen gewährleistet sowohl eine hohe Prozess- als auch eine hohe Produktqualität.

1. *Prozessqualität:*

Als wesentliches Ziel definiert sich die Zuverlässigkeit des Systems. Zu deren Ermittlung wird der Prozess in seine Einzelkomponenten aufgeteilt und deren Ausfallverhalten mit geeigneten Versuchsreihen bestimmt.

2. *Produktqualität:*

Die Qualität des abgelegten Textils ist abhängig von zahlreichen Steuergrößen, woraus sich die Untersuchung geeigneter Kombinationsmöglichkeiten der Steuergrößen ableitet. Gleichzeitig wird die erreichbare Genauigkeit durch die Güte der geometrischen Messtechnik beeinflusst. Zusätzlich zur Prüfung der Einhaltung der geforderten Toleranzen sollen die Grenzen und möglichen Genauigkeiten erarbeitet werden.

5.3 Analyse der Zuverlässigkeit des Handhabungsprozesses

Laut DIN EN ISO 9000 (2005) wird die Zuverlässigkeit definiert als „zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“. Im engeren Sinne bezeichnet BRUNNER ET AL. (2013) die Zuverlässigkeit als Wahrscheinlichkeit, „dass eine Betrachtungseinheit unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen während einer definierten Zeitdauer nicht ausfällt“. Dadurch steht mit der Zuverlässigkeitsanalyse ein Werkzeug zur Modellierung und Beschreibung der Zuverlässigkeit von technischen Komponenten und Systemen zur Verfügung.

Das vorliegende Handhabungssystem besteht aus sieben sequenziell ablaufenden Prozessschritten. Da die Einzelschritte in einer kausalen Abhängigkeitsbeziehung zueinander stehen, ist die Funktionsfähigkeit des Gesamtprozesses nur bei Erfüllung aller Einzelschritte gewährleistet, d. h. die Nichterfüllung eines einzigen Schrittes führt zum Systemausfall. Anhand einer qualitativen Abschätzung bildet Abbildung 5.5 zunächst die kritischen Prozessschritte in Anlehnung an das Aktivitätsdiagramm aus Abbildung 4.5 ab.

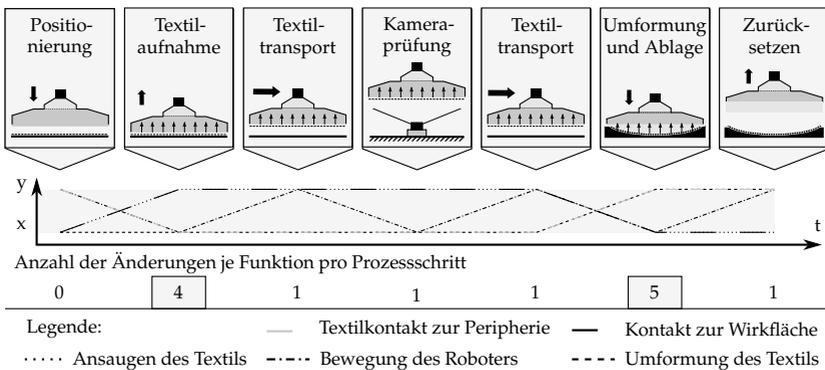


Abbildung 5.5: Reihenschaltung der Komponenten im Handhabungsprozess

Während des Handhabungsprozesses finden unterschiedliche Handlungen mit daraus resultierenden Zuständen statt, die einer zeitlichen Änderung unterworfen sind. Bspw. wird das textile Halbzeug im Laufe der Handhabung zeitweise durch den Roboter bewegt, zudem hat das Ansaugen des Greifers Auswirkungen auf das textile Halbzeug. Diese Funktionen, die auf das Handhabungsgut einwirken, haben direkte Konsequenzen auf die Zuverlässigkeit des Prozesses.

Abbildung 5.5 summiert die Zustandsänderungen der Funktionen für jeden Prozessschritt auf und benennt die Prozessschritte, aus denen qualitativ gesehen die meisten Einflüsse auf das textile Halbzeug resultieren. Bspw. ergeben sich bei der Textilaufnahme zum einen eine Beaufschlagung des Unterdrucks und eine Kontaktierung der Handhabungsoberfläche mit dem Textil, zum anderen ändern sich der Zustand der Roboterbewegung durch das beginnende Anfahren nach dem Aufnehmen sowie der Textilkontakt zur Peripherie durch den fehlenden Kontakt zur Aufnahme­fläche. Mit diesen vier Funktionsänderungen stellt die Textilaufnahme neben dem Umform- und Ablageprozess den Prozessschritt mit den meisten Einflüssen auf das textile Halbzeug dar.

Zur quantitativen Ermittlung der Systemzuverlässigkeit wird die mathematische Zuverlässigkeit berechnet, die auf Stichproben verschiedener Versuchsreihen basiert. Die Berechnung erfolgt in mehreren Phasen. Nach der Entnahme aus einer Grundgesamtheit und Prüfung der Stichprobe wird ein Modell zur Beschreibung des Ausfallverhaltens abgeschätzt, mit dem schließlich die statistische und sachlogische Interpretation durchgeführt wird (DIETRICH ET AL. 2014). Das Ergebnis bilden Überlebenswahrscheinlichkeiten, die die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass eine definierte Abfolge von Handhabungsvorgängen ohne Unterbrechungen erreicht wird.

Mit den Stichproben als Datengrundlage werden wiederholt Versuchsreihen des Handhabungsvorgangs bis zu einem oberen Grenzwert durchgeführt. Der maximale Wert wird nur dann erreicht, wenn vorher kein Systemversagen durch einen fehlerhaften Prozessschritt eingetreten ist. Andernfalls wird die Versuchsreihe beim Auftreten des Fehlers abgebrochen. Angelehnt an die Fertigung des Referenzbauteils wird im vorliegenden Szenario die maximale Wiederholungszahl einer Versuchsreihe auf 60 limitiert, was einer Fertigung von zehn Bauteilen mit jeweils sechs Textillagen entspricht. Nachdem zunächst eine Textillage direkt in die Ablageform abgelegt worden ist, werden die weiteren Textilien direkt auf das bereits in der Form liegende Textil abgelegt. Dadurch werden die unterschiedlichen Wechselwirkungen von Textil und Form miteinander in den nachfolgenden Versuchsreihen berücksichtigt. Da nach KLEPPMANN (2013) bei einem Umfang von 10 bis 20 Versuchsreihen bereits ein ausreichend gutes Ergebnis sowie statistische Signifikanz erhalten werden, werden insgesamt 15 Versuchsreihen mit jeweils maximal 60 Wiederholungen durchgeführt.

Im Gegensatz zu technischen Anwendungen, in denen sich die Zuverlässigkeit mittels eines parametrischen Modells, wie [bspw.](#) der Weibull-Verteilung, beschreiben lässt, liegt im vorliegenden Fall ein nicht parametrisches Verhalten vor. Hierfür eignet sich zur Abschätzung der Zuverlässigkeit am besten das Kaplan-Meier-Verfahren (BRUNNER ET AL. 2013). Basierend auf den erhobenen

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

Daten lässt sich die Wahrscheinlichkeit q_i berechnen, mit der ohne Prozessunterbrechung eine bestimmte Zeit **bzw.** eine gewisse Anzahl planmäßiger Handhabungsvorgänge i zu erreichen ist:

$$q_i = \frac{d_i - n_i}{d_i} \quad (5.1)$$

Hierbei bezeichnet n_i bezeichnet die zum Zeitpunkt i ausgefallenen Einheiten, wohingegen d_i die Anzahl der möglichen Einheiten bezeichnet, die ausfallen können. Zur Ableitung der Zuverlässigkeit berechnet sich die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$, mit der ein bestimmter Zeitpunkt i zu erreichen ist, nach:

$$R(t) = \prod_{i_i \leq t} \frac{n_i - d_i}{d_i} \quad (5.2)$$

Dabei steht t für die Anzahl der Wiederholungen ohne Zwischenfälle, die im vorliegenden Szenario zwischen 0 und 60 variiert (vgl. Abbildung 5.6).

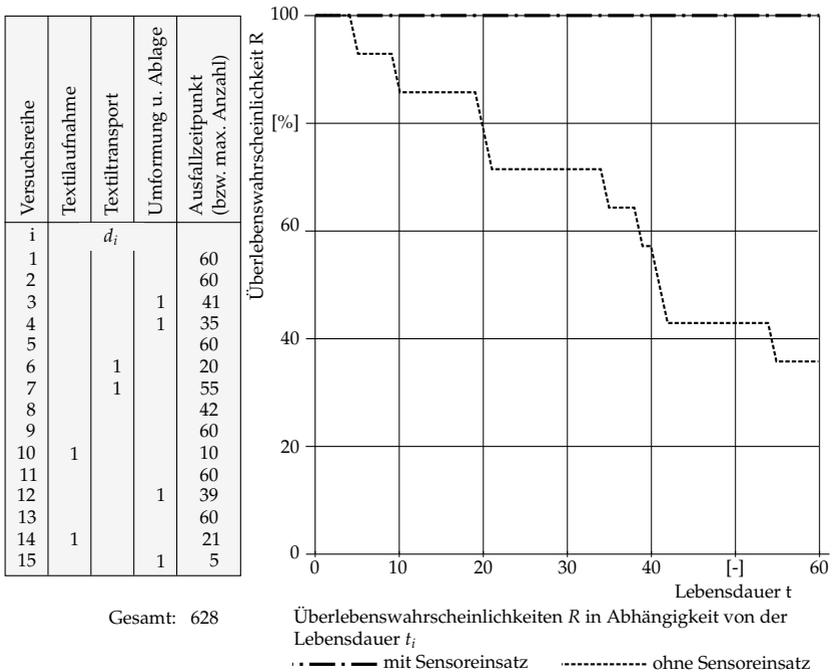


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse

Im Rahmen der Versuchsreihen werden in drei Prozessphasen Fehler identifiziert, die zu einem Abbruch des Vorgangs führen. Zur Berechnung der Zuverlässigkeit werden 15 Versuchsreihen durchgeführt, in denen jeweils bis zu $t = 60$ Handhabungsversuche abgefahren werden. Falls ein Fehler auftritt, wird der Ausfallzeitpunkt notiert und eine neue Reihe begonnen. In sechs der 15 Versuchsreihen treten bis zur maximalen Anzahl von $t = 60$ Versuchen keine Fehler auf. Die Fehler in den Prozessphasen lassen sich jeweils den gleichen Prozessschritten – der Textilaufnahme, dem Textiltransport sowie der Umformung und Ablage – zuordnen und sind in der linken Tabelle in Abbildung 5.6 dokumentiert.

Zur Bewertung der Eignung des verwendeten Näherungssensors charakterisiert Tabelle 5.1 die aufgetretenen Fehler bezüglich der Fehlerursachen sowie danach, ob es zu einer Fehlerdetektion mit dem Sensor kam.

Textilaufnahme	
Fehlerbeschreibung:	Anhaften und Zurückbleiben am Aufnahmetisch
Fehlerursache:	Verhaken bzw. Verklemmen auf dem Aufnahmetisch
Fehlerdetektion:	Ja
Lösungsstrategie:	Aufnahme eines neuen geometriegleichen Halbzeugs
Textiltransport	
Fehlerbeschreibung:	Abfallen während der Roboterbewegung
Fehlerursache:	Fehlender Unterdruck aufgrund verstopfter Saugstellen
Fehlerdetektion:	Ja
Lösungsstrategie:	Hinweissignal für eine notwendige Reinigung und erneute Aufnahme eines geometriegleichen Halbzeugs
Umformung und Ablage	
Fehlerbeschreibung:	Haftenbleiben auf dem Greifsystem
Fehlerursache:	Langsamer Abfall des Unterdrucks
Fehlerdetektion:	Ja
Lösungsstrategie:	Freigabe zur Rückbewegung des Roboters nach Prüfung des abgefallenen Unterdrucks im Greifer

Tabelle 5.1: Detaillierung der Fehlerursachen

Die Ursachen für die Fehler liegen in der Wirkungsweise des Handhabungsprinzips sowie im Materialverhalten der textilen Halbzeuge, die in ihrer Gesamtheit auf der Wirkfläche detektiert werden können. Somit liegen sämtliche Fehler bei einem Nichtanliegen des Textils an der Wirkfläche vor, sodass alle auftretenden Fehler mit dem verbauten kapazitiven Näherungssensor detektiert werden können.

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

nen. Im Zuge der Versuchsreihen konnten alle aufgetretenen Fehler gemäß der umgesetzten Prüfstrategie aus Abschnitt 4.4.2 durch ein Signal des Sensors auf dem HMI erfasst werden. Abbildung 5.6 visualisiert die Überlebenswahrscheinlichkeit für die Versuchsreihen unter Verwendung des kapazitiven Näherungssensors. Im Gegensatz dazu zeigt die berechnete Überlebenswahrscheinlichkeit ohne Prozessüberwachung einen sprunghaften Abfall bei Erhöhung der Lebensdauer. Der Ausfallzeitpunkt jeder Versuchsreihe bewirkt ein Abfallen der Zuverlässigkeit. Beispielsweise beträgt die Wahrscheinlichkeit der fehlerfreien Prozessdurchführung ohne Fehlervermeidung bei 40 aufeinanderfolgenden Handhabungsschritten $R(40) = 57\%$, wohingegen für eine fehlerfreie Versuchsreihe mit $t = 60$ Handhabungsversuchen eine Wahrscheinlichkeit von $R(60) = 35\%$ berechnet wird. Die Ergebnisse der Überlebenswahrscheinlichkeit zeigen am Beispiel des betrachteten Loses von zehn Preforms, dass die Prozessüberwachung eine wichtige Voraussetzung für die Handhabung textiler Halbzeuge ist.

Zur Verdeutlichung der Häufigkeit und Gewichtung der auftretenden Fehler zeigt Abbildung 5.7 separat für jeden Prozessschritt die zugehörige Zuverlässigkeitsanalyse. Der Umform- und Ablageprozess stellt den Prozessschritt mit den meisten Fehlern dar, womit sich die experimentell ermittelten Messergebnisse mit den qualitativen Erkenntnissen aus Abbildung 5.5 decken.

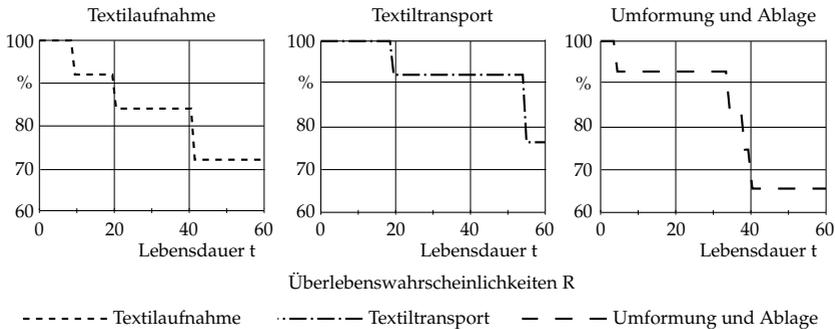


Abbildung 5.7: Separate aufgeführte Zuverlässigkeitsanalyse für jeden Prozessschritt

5.4 Untersuchung der Ablagequalität

Nach der Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit werden im Folgenden die erreichbaren Genauigkeiten beim Ablegen des textilen Halbzeugs mit Fokus

auf das spätere Bauteil untersucht.

Im Gegensatz zu den Prozessschritten, deren positive Funktionserfüllung eine fehlerfreie Prozessführung voraussetzt, weisen die in Abbildung 5.4 identifizierten Einflussgrößen eine entscheidende Bedeutung für die Ablegequalität auf. Abbildung 5.8 ordnet die Größen dem zeitlichen Auftreten im Handhabungsprozess zu.

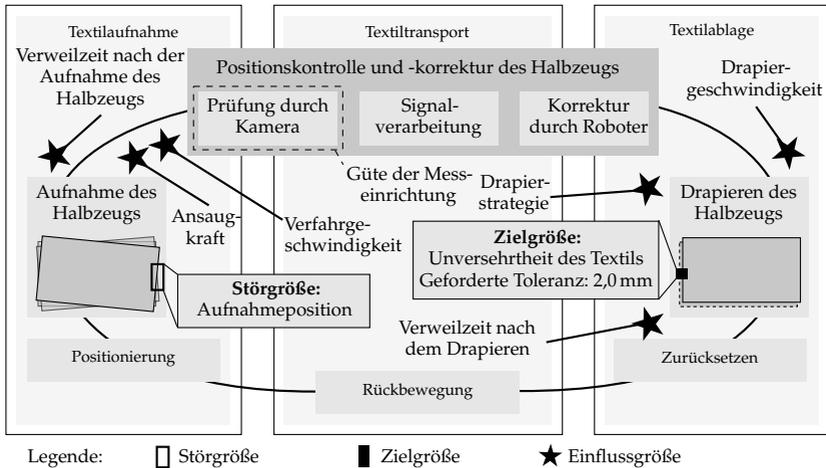


Abbildung 5.8: Einordnung der Einfluss- und Zielgrößen in den Handhabungsprozess

Abhängig von der Textilaufnahme, die entweder vom Schneidtisch oder aus dem Zwischenspeichersystem erfolgen kann, ist die exakte Position des Textils vorgegeben, tritt jedoch aufgrund der möglichen Abweichungen von der Soll-Position als Störgröße auf. Auch weitere Größen wie Verweilzeiten und Geschwindigkeiten beeinflussen die Ablagequalität. Zur Validierung werden drei Aspekte untersucht, anhand derer die erzielbare Qualität sowie die darauf wirkenden Einflüsse bewertet werden:

1. *Güte der Messeinrichtung (Abschnitt 5.4.1)*
Die erreichbare Genauigkeit des Kamerasystems als umgesetzte Sensorik und Messeinrichtung bildet die Voraussetzung für die positionsgenaue Textilablage.
2. *Einflussgrößen mit Auswirkungen auf die Taktzeit und die Betriebskosten (Abschnitt 5.4.2)*

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

Für eine wirtschaftliche Serienfertigung ist die Beherrschung und Einstellung der Einflussgrößen von entscheidender Bedeutung für die Qualität.

3. Erzielbare Ablegenauigkeit (Abschnitt 5.4.3)

Das abgelegte Textil stellt die wesentliche Zielgröße für die Produktqualität dar. Durch den Abgleich der erreichbaren Ist-Position mit der geforderten Soll-Position wird die Ablegequalität bewertet.

Für eine quantitative Aussage über das Ablageverhalten ist die positions- und wiederholgenaue Aufnahme des textilen Halbzeugs erforderlich, sodass die Textilaufnahme im Gegensatz zu einer Störgröße mit unbekannter Position im Folgenden als gezielt variierbare Einflussgröße deklariert wird.

Da Ablagetoleranzen von maximal $\Delta x, \Delta y \pm 2,0 \text{ mm}$ und $\Delta \phi \pm 1,5^\circ$ gefordert sind, leitet sich gemäß DIETRICH & RADECK (2015) und PLEGNIERE (2011) eine einstellbare Mindestgenauigkeit von

$$p_{\min} = \frac{1}{20} \cdot x = \pm 0,1 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$\gamma_{\min} = \frac{1}{20} \cdot \phi = \pm 0,075^\circ \quad (5.4)$$

ab. Mit dieser Auflösung müssen die Messdaten für die Prüfung der Güte der Messeinrichtung aufgenommen werden. Hierfür wird die Textilaufnahme über eine Vorrichtung mit zwei Anschlagkanten an den Koordinaten eingestellt (vgl. Abbildung 5.9).

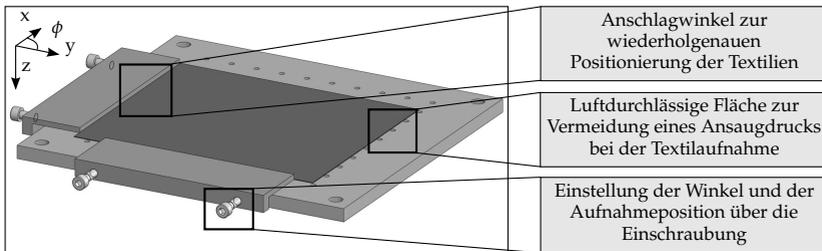


Abbildung 5.9: Vorrichtung zur variierbaren und wiederholgenauen Textilaufnahme

Die variablen Anschläge garantieren ein definiertes Positionieren des zugeschnittenen Textils auf dem Absortiertisch. Über die Drehung der Schrauben an den Anschlagkanten lässt sich der Anschlag für das Textil wiederholgenau variieren und die exakte Position bei der Aufnahme dokumentieren. Eine vollständige Drehung der Schraube bewirkt eine Variation um 1 mm. Zusätzlich

sind Bohrungen in die Platte eingebracht, die einen Unterdruck wirken lassen und dadurch das Ansaugen mit dem Greifsystem vom Aufnahmetisch gewährleisten.

5.4.1 Güte des Messsystems

Zur Prüfung der erzielbaren Genauigkeit des verwendeten Bildverarbeitungssystems werden die ausgegebenen Korrekturwerte nach Durchführung der Bildauswertung bewertet. Die aufgeführten Größen aus Abbildung 4.12, welche die Bilderfassung und -auswertung während der Textilaufnahme und -bewegung durch den Roboter unterschiedlich beeinflussen, werden zur Prüfung der erzielbaren Genauigkeit des Messsystems nicht berücksichtigt. Abbildung 5.10 veranschaulicht den Versuchsaufbau mit der vorgeschalteten Positionsprüfung, mit dem die Position des Textils bewertet wird.

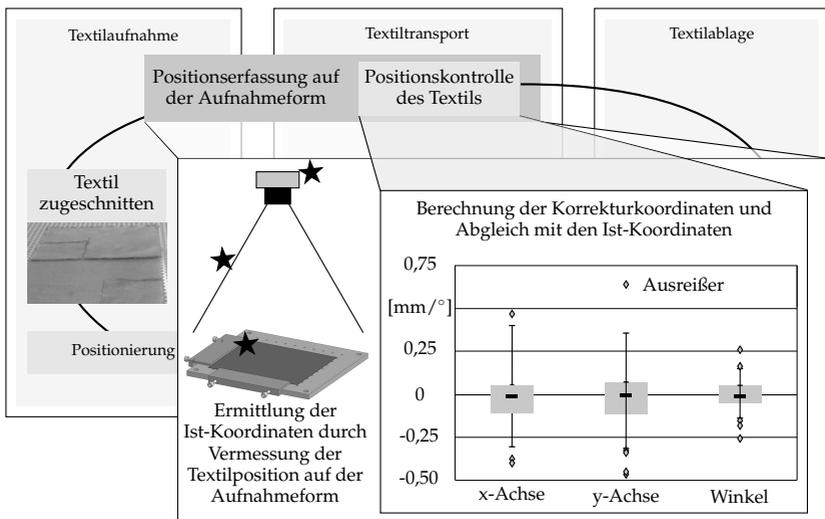


Abbildung 5.10: Aufbau zur Prüfung der Qualität der Messeinrichtung

Die Kamera wird an der gleichen Position wie bei der Umsetzung während des Handhabungsvorgangs zur Textilaufnahme angebracht, um die Einflüsse hinsichtlich der Beleuchtung und möglicher Bildfehler zu berücksichtigen. Die Aufnahmeform ermöglicht die erforderliche Auflösung bei der Positionierung des Textils. Zusätzlich wird die Oberfläche der Aufnahmeform mit

einer Folie versehen, um die Wirkfläche des Greifers nachzubilden. Während der experimentellen Umsetzung wird in $n = 50$ Versuchen normalverteilt ein quadratisches, flächiges textiles Halbzeug innerhalb der Grenzen $\Delta X \pm 2,0$ mm positioniert. Die Kamera nimmt im Anschluss die eingebrachte Abweichung auf und gibt mit den Korrekturkoordinaten die Positionsabweichung des Textils zurück.

Die Position des Textils wird über die lineare Verschiebung (erfasst durch Δx und Δy) sowie die Winkeländerung $\Delta\phi$ angegeben. Die Messwerte werden im Anschluss hinsichtlich ihrer Häufigkeitsverteilung untersucht (vgl. Boxplot in Abbildung 5.10). Der Median gibt den Wert an, unter dem 50 % aller Werte liegen, und wird auch als 50%-Quantil bezeichnet (BRUNNER ET AL. 2013). Umrahmt wird er im Boxplot vom oberen und vom unteren Quantil, die analog zum 50%-Quantil den Messwert bei $n = 0,25$ bzw. $n = 0,75$ angeben.

Für weitere Aussagen über die Grenzen der Messergebnisse ist der Nachweis einer parametrischen Verteilung der aufgenommenen Messwerte notwendig. Da der Boxplot auf eine Normalverteilung hindeutet, wird mittels eines Testverfahrens das Vorliegen einer Normalverteilung überprüft. Basierend auf dem Stichprobenumfang wird der Shapiro-Wilk-Test angewendet, der sich durch folgende Berechnungsvorschrift anwenden lässt (DIN 2004):

$$W = \frac{\sum_{k=1}^{n/2} \alpha_k \cdot \left[x_{(n+1-k)} - x_{(k)} \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.5)$$

Zum Nachweis der Normalverteilung darf die Prüfgröße W einen kritischen Wert nicht überschreiten. Die Koeffizienten α_k können aus SHAPIRO & WILK (1965) entnommen werden und sind abhängig vom Stichprobenumfang n . x_i bezeichnet die absteigend sortierte Messgröße. Aus der zugrunde liegenden Datenmenge berechnet sich W beispielhaft für die y -Koordinate zu:

$$W = \frac{(1,328566)^2}{2,20731} = 0,9595 > SW_{n;1-\alpha} = 0,9400 \quad (5.6)$$

Der kritische Schwellenwert $SW_{n;1-\alpha}$ wird unter Berücksichtigung der Signifikanz $\alpha = 5\%$ für den gegebenen Stichprobenumfang gewählt. Für die weiteren Koordinaten liegt der Wert der Prüfgröße ebenfalls oberhalb des Schwellenwerts, sodass für die gesamte Versuchsreihe eine Normalverteilung vorliegt. Die Anzahl der Klassen berechnet sich gemäß DIETRICH & SCHULZE (2014)

nach der CNOMO-Norm zu:

$$k = 1 + \frac{10 \log(n)}{3} \quad (5.7)$$

Aufgerundet auf die nächsthöhere Ganzzahl ergibt sich eine Klassenzahl von $k = 7$ für die einzelnen Größen, sodass die graphische Gestaltung der Messwerte in jeweils sieben Bereichen durchgeführt wird. Durch die Normalverteilung liefert die Messgröße nach Six Sigma eine Kennzahl für die Leistungsfähigkeit des Kamerasystems (vgl. Abbildung 5.11).

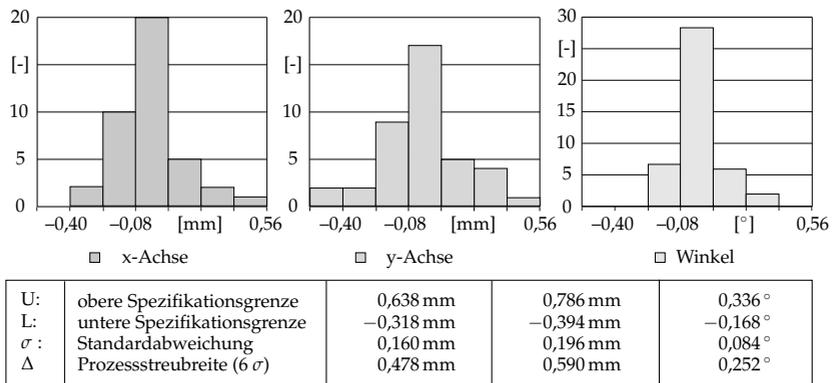


Abbildung 5.11: Auswertung der Qualität der Messeinrichtung

Weitere charakteristische Größen zur Beschreibung der Messungen stellen die obere (OSG) und untere (USG) Spezifikationsgrenze dar. Hiermit werden die Grenzwerte außerhalb von $\Delta 6\sigma$ und einem Fehleranteil von 0,135% bezeichnet. Zusammenfassend liegen die Zahlenwerte der drei Koordinaten in 99,73% der Versuchsreihen innerhalb einer absoluten Grenze von $\Delta x = \pm 0,7$ mm, $\Delta y = \pm 0,8$ mm bzw. $\Delta \phi = \pm 0,4$ °. Durch den statischen Versuchsaufbau werden Fehler, die sich nicht auf das Kamerasystem beziehen, wie Abweichungen des Roboters oder Fehler durch die Aufnahme- und Ablagebewegung, nicht aufgenommen und somit das Sensorsystem nicht isoliert bewertet. Aufgrund der Einhaltung der Toleranzgrenzen ist eine weitergehende, detailliertere Untersuchung und Quantifizierung der weiteren Fehlerquellen nicht notwendig. Hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Kamerasystems wurden während der gesamten Messreihen keinerlei Ausfälle verzeichnet.

5.4.2 Einflussgrößen im Hinblick auf die Prozesszeit

Die Prozesszeit steht in einem direkten Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit des Handhabungsprozesses. Die identifizierten Einflussgrößen aus Abbildung 5.8 treten räumlich und zeitlich unterschiedlich auf, beeinflussen jedoch maßgeblich die Prozesszeit. Als übergreifende Größe dient der vorgegebene Unterdruck zum Ansaugen der Textilien, dessen resultierende Kraft auf das Textil wirkt und die Verweilzeiten sowie die maximalen Geschwindigkeiten vorgibt (vgl. Abbildung 5.12).

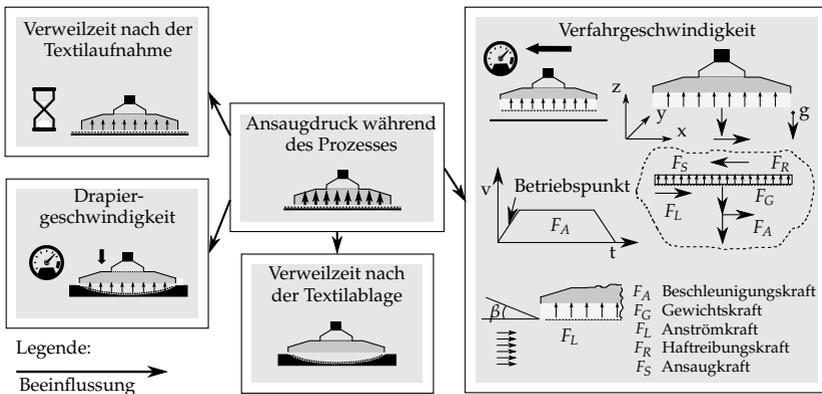


Abbildung 5.12: Abhängigkeiten der Einflussgrößen

Die maximale Verfahrensgeschwindigkeit, mit der noch ein prozesssicheres Handhaben gewährleistet werden kann, lässt sich über das Gleichgewicht der wirkenden Kräfte auf das Textil während des Prozesses ermitteln. Die mindeste erforderliche Ansaugkraft des Textils wird für den ungünstigsten Fall der maximalen Beschleunigung bei größter Schälkraft durch den Luftwiderstand wie folgt ermittelt:

$$z\text{-Richtung: } F_S - F_G - F_{A,z} = 0 \tag{5.8}$$

$$x\text{-Richtung: } F_L + F_{A,x} - F_R = 0 \tag{5.9}$$

In Anlehnung an die Berechnungen zum Ansaugverhalten von STRASSER (2012) ermöglicht der Ansaugdruck in z-Richtung das Sichern des Textils am Greifer.

Für die x-Richtung stellt sich das folgende Kräftegleichgewicht ein:

$$\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A_{An} \cdot \rho \cdot v_{max}^2 + m_{Textil} \cdot a_{max,x} - \mu_{HR} \cdot F_S = 0 \quad (5.10)$$

Die Kraft F_R auf der Wirkfläche, die für die Haftung des Textils in x-Richtung sorgt, wirkt entgegen der Anströmkraft F_L und der Beschleunigungskraft $F_{A,x}$. Die Kräfte berechnen sich über folgende Zusammenhänge:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A_{An} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5.11)$$

$$F_{A,x} = m_{Textil} \cdot a_{max,x} \quad (5.12)$$

$$F_R = \mu_{HR} \cdot F_{A,x} \quad (5.13)$$

Die Geschwindigkeit v_{max} und die Beschleunigung $a_{max,x}$ beziehen sich auf die maximal zulässigen Werte des eingesetzten Roboters (KUKA 2013), die aus der Winkelbeschleunigung α bei Berücksichtigung des zulässigen Massenträgheitsmoments $I = 135 \text{ kg m}^2$ berechnet werden. Dafür ist die Berechnung des Drehmoments M notwendig. Aus einem maximal auftretenden Hebelarm $b = 2,0 \text{ m}$ resultiert die maximale Beschleunigung $a_{max,x}$:

$$M = \alpha \cdot I \quad (5.14)$$

$$a_{max,x} = \alpha \cdot b = \frac{M}{I} \cdot b \quad (5.15)$$

Das Drehmoment berechnet sich über die maximal zulässige Kraft aus der Roboterspezifikation und den angenommenen Hebelarm b . Zur Ermittlung der Reibungskraft F_R entspricht die Normalkraft der Ansaugkraft F_S , die über den Differenzdruck p_S bezogen auf die Saugfläche A_{Saug} berechnet wird und nicht mit der Anströmfläche A_{An} des Textils zu verwechseln ist. Der Wert für den Unterdruck $p_S = 51,6 \text{ N/m}^2$ wird der Arbeit von STRASSER (2012) entnommen, der diesen Wert experimentell als einen wirtschaftlichen Kennwert für das Ansaugen von Geweben ermittelte; aufgrund der analogen Wirkungsweise ist der Wert auf das vorliegende Szenario übertragbar:

$$F_S = \Delta p_S \cdot A_{Saug} \quad (5.16)$$

Unter Berücksichtigung der charakteristischen Werte für eine Luftströmung unter Laborbedingungen (c_W, ρ) ergibt sich bei Verwendung der maximalen Geschwindigkeit v_{max} sowie der Beschleunigung $a_{max,x}$ ein minimaler Haftreibungskoeffizient:

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

$$\mu_{HR} = \frac{1/2 \cdot c_{Luft} \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot v_{max}^2 + m_{Textil} \cdot a_{max,x}}{\Delta p_S \cdot A_{Saug}} \quad (5.17)$$

$$\mu_{HR} = \frac{1/2 \cdot 1,15 \cdot 0,036 \text{ mm}^2 \cdot 1,2 \text{ g/mm}^3 \cdot (3,5 \text{ m/s})^2 + 0,020 \text{ kg} \cdot 3,67 \text{ m/s}^2}{51,6 \text{ N/mm}^2 \cdot 170 \text{ mm} \cdot 170 \text{ mm}} \quad (5.18)$$

$$\mu_{HR} = \frac{0,30429 + 0,0734}{1,66} = 0,228 \quad (5.19)$$

Der positive Wert für den Haftreibungskoeffizienten belegt auch für einen Handhabungsprozess mit maximalen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten das Haften des Textils an der Wirkfläche des Greifers. Mit dem experimentell nachgewiesenen Unterdruck, der für den Differenzdruck Δp_S eingestellt werden muss, werden die weiteren abhängigen zeitlichen Einflussgrößen zur Ermittlung der fehlerfreien Durchführung des Handhabungsprozesses untersucht. Nach einer Versuchsreihe mit jeweils $t = 20$ Wiederholungen können die in Tabelle 5.2 markierten Zeiten für das vorliegende Greifsystem als minimale Werte ermittelt werden.

Einflussgröße	Einheit	Variierte Parameter				
Verweilzeit nach der Textilaufnahme	s	0,5	1,0	1,5	2,0	
Verweilzeit nach dem Drapiervorgang	s	0,5	1,0	1,5	2,0	
Zeit zur Durchführung des Drapiervorgangs	s	2,0	2,5	3,0	3,5	

Tabelle 5.2: Teilprozesszeiten zur Ermittlung der Abhängigkeit von der Lüfterleistung

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass beim vorliegenden Ansaugdruck das Textil nach der Aufnahme und nach dem Drapieren innerhalb von einer Sekunde stabil und definiert am Greifsystem bzw. in der Ablageform anliegt. Nach dem Drapiervorgang muss durch unmittelbares Abschalten des Unterdrucks sichergestellt werden, dass keine Ansaugung durch den Restdruck vorliegt. Die Werte werden für die Einflussgrößen unterschiedlich ermittelt. Ein geeigneter Wert für die Verweilzeit wird experimentell ermittelt, indem der Betrag verwendet wird, bei dem das Textil in allen Testreihen entweder nach der Textilaufnahme sicher durch den Greifer aufgenommen wird oder nach dem Drapiervorgang das Textil sicher in der Form abgelegt ist. Der Betrag für die Drapiergeschwindigkeit wird anhand der Bewertung der Position des abgelegten Halbzeugs abgeleitet. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle A.13 dokumentiert. Im Rahmen des

Referenzszenarios wird als Drapierstrategie ein mittlerer Erstkontakt zwischen der Wirkfläche und der Drapierform gewählt, sodass sich mit einer linearen Bewegung in z-Richtung das Textil gleichmäßig flächig ausbreitet (vgl. Abbildung 3.9). Aufgrund der Vorarbeiten von EHINGER (2013) wird die Drapierstrategie nachfolgend nicht detaillierter betrachtet, sondern nur die zeitlichen Wechselwirkungen untersucht. Die ermittelten Werte für die Einflussgrößen fließen in die nachfolgenden Untersuchungen zur Zielgröße ein.

Die experimentellen Untersuchungen in der Versuchsanlage werden im Betriebsmodus 1 (BM 1) mit einer maximalen Geschwindigkeit von $v = 150 \text{ mm/s}$ durchgeführt. Basierend auf den Berechnungen zu den Verfahrensgeschwindigkeiten aus Abschnitt 5.4.2, die auch für die maximalen Achsgeschwindigkeiten gelten, lassen sich die Zeiten des betrachteten Referenzszenarios auf den automatischen Betriebsmodus 2 (BM 2) übertragen, der die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Produktion darstellt.

Einen limitierenden Faktor stellt die Größe des Textils dar, da die maximale Traglast des Roboters ein größer dimensioniertes Handhabungssystem begrenzt. In Abbildung 5.13 werden die Prozessphasen des Ablegevorgangs in den beiden Betriebsmodi veranschaulicht. Zusätzlich werden die ermittelten Zeiten der un-

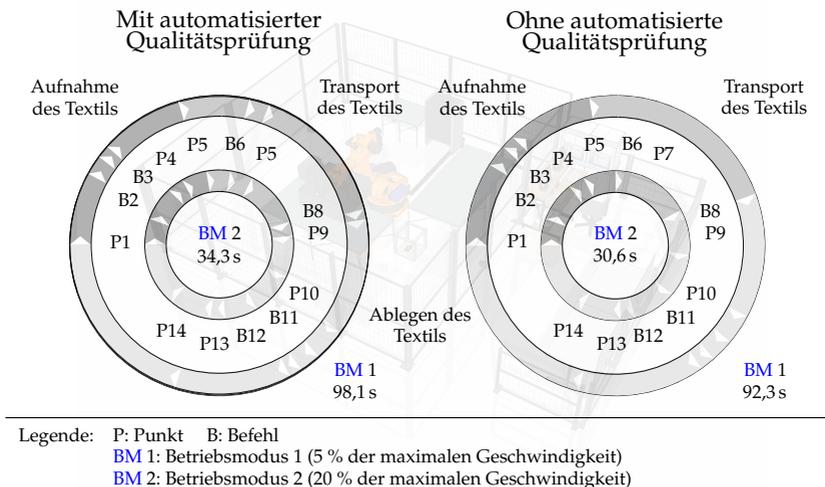


Abbildung 5.13: Auswertung und Gegenüberstellung der Ablegezeiten

tersuchten Einflussgrößen berücksichtigt. Während der drei Prozessphasen Tex-

tilaufnahme, Textiltransport und Transportablage werden die beiden Szenarien mit *bzw.* ohne Qualitätsprüfung gegenübergestellt. Die gesamte Handhabungszeit addiert sich durch die zeitliche Abfolge der anzufahrenden Positionen sowie durch die Verweilzeiten im Prozess und während der Textilprüfung, deren detaillierte Beschreibung im Anhang in Tabelle A.12 einzusehen ist. Beim Einsatz der Qualitätsprüfung erhöht sich die Handhabungszeit im BM 1 auf 98,1 s im Vergleich zu 92,3 s ohne die Konturprüfung. Zur Abbildung des BM 2 werden die notwendigen sequenziellen Point-to-Point-(PTP)-Verfahrensschritte, welche die direkte Verfahrbewegung zwischen zwei Punkten unter paralleler Verwendung aller erforderlichen Achsen bezeichnen, mit dem Faktor 4 beaufschlagt, womit im Hinblick auf die maximale Achsgeschwindigkeit annähernd 20 % erreicht werden.

Die Abschätzung basiert auf der maximalen Verfahrgeschwindigkeit der Achse 1 von $\omega = 105^\circ/s$, wobei für den vorliegenden Referenzprozess eine Drehung von 90° erforderlich ist (KUKA 2013). Für die optionale Positionsprüfung ergeben sich ein zusätzlicher Verfahrensschritt sowie anschließende Prüf- und Korrekturzeiten, woraus ein zeitlicher Mehrbedarf von annähernd $t_{Korr} = 3$ s resultiert.

Wird die vom Betriebsmodus abhängige Verfahrgeschwindigkeit schrittweise erhöht, nähert sich die Differenz der Handhabungszeiten den zusätzlichen Prüfzeiten an. Abbildung 5.14 visualisiert auf einer logarithmischen Skala die erzielbaren Handhabungszeiten in Abhängigkeit von der maximalen Geschwindigkeit im BM 2. Bei Annäherung an die maximale Verfahrgeschwindigkeit im Prozess $v_{Prozess,max}$ reduzieren sich die Handhabungszeiten auf annähernd 16 s mit Positionsprüfung (Zeit ohne Positionsprüfung: 13 s). Die Differenz der Prozesszeit strebt gegen einen festen Grenzwert, der mit 3 s der Prüfzeit entspricht. Abbildung 5.14 zeigt zudem die Auswertung und Gegenüberstellung der Ablegezeiten. Die vorgestellten Handhabungszeiten gelten für Drapierprozesse ohne zusätzliche Zeiten für Fixiervorgänge. Im Falle einer zusätzlich benötigten Aktivierung eines thermoplastischen Binders gilt es, in Anlehnung an EHINGER (2013), einen konstanten Zeitanteil von 10 s zu addieren.

5.4.3 Erzielbare Qualität des textilen Halbzeugs nach Durchführung des Handhabungsvorgangs

Die nachfolgende Bewertung der Qualität des abgelegten Halbzeugs gliedert sich auf in die Untersuchung der Textilstruktur mit Prüfung auf mögliche eingebrachte Fehler sowie die Ermittlung der erzielbaren Positioniergenauigkeit in der Drapierform. Im Gegensatz zur Prüfung der Güte des Messsystems aus

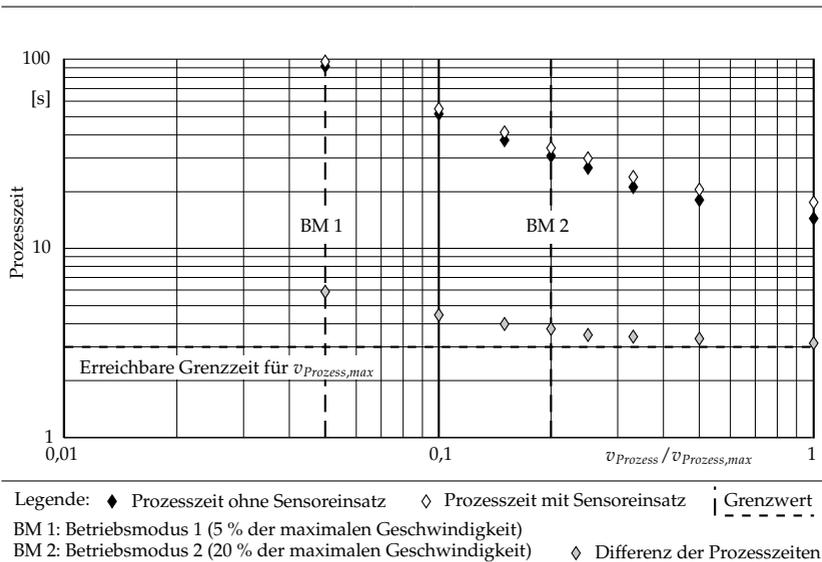


Abbildung 5.14: Auswertung und Gegenüberstellung der Ablegezeiten

Abschnitt 5.4.1 fließen in der Prüfung der Ablageposition alle im Handhabungsvorgang auftretenden Einflüsse ein.

Experimentelle Untersuchung der erreichbaren Ablagegenauigkeit

Analog dem Vorgehen zur Ermittlung der Genauigkeit des Messsystems erfolgt die Untersuchung der erzielbaren Ablageposition des textilen Halbzeugs. Mit dem zeitlichen Ablauf des Handhabungsvorgangs im BM 1 wird die Aufnahmeposition für einen Stichprobenumfang von $t = 40$ normalverteilt variiert. Als Mittelwert dient die exakte Textilposition um den Nulldurchgang. Die Positionseinstellung bei der Aufnahme erfolgt nach der in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Vorgehensweise, woran anschließend nach der Positionskontrolle und -korrektur die Ablageposition gemessen wird. In Anlehnung an die Einstellung der Textilaufnahme werden die Abweichungen anhand der Anschlagkanten, die sich über die Schraubendrehung verschieben lassen, aufgenommen. Abweichend zur Kontur des Referenzbauteils wird eine quadratische Textilgeometrie mit einer Kantenlänge von $c = 160$ mm verwendet, um eine wiederholgenaue Prüfung sicherzustellen. Nach dem Handhabungsschritt wird die Ablageposition in der Form ermittelt. Dabei wird die Randkurve mit den Anschlagkanten

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

der Aufnahmevorrichtung vermessen (vgl. Abbildung 5.9). Analog zur Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit werden auch in dieser Versuchsreihe die Textilien sequenziell direkt in die Form oder auf die darin liegenden Textilien abgelegt.

Nach Anwendung des Shapiro-Wilk-Tests lässt sich für die erhaltenen Koordinaten, mit denen die Abweichung von der Soll-Position angegeben wird, die Normalverteilung nachweisen. Abbildung 5.15 visualisiert für die drei Dimensionen die Häufigkeitsverteilung der aus der eingestellten Textilaufnahme und gemessenen Ablageposition resultierenden Koordinaten.

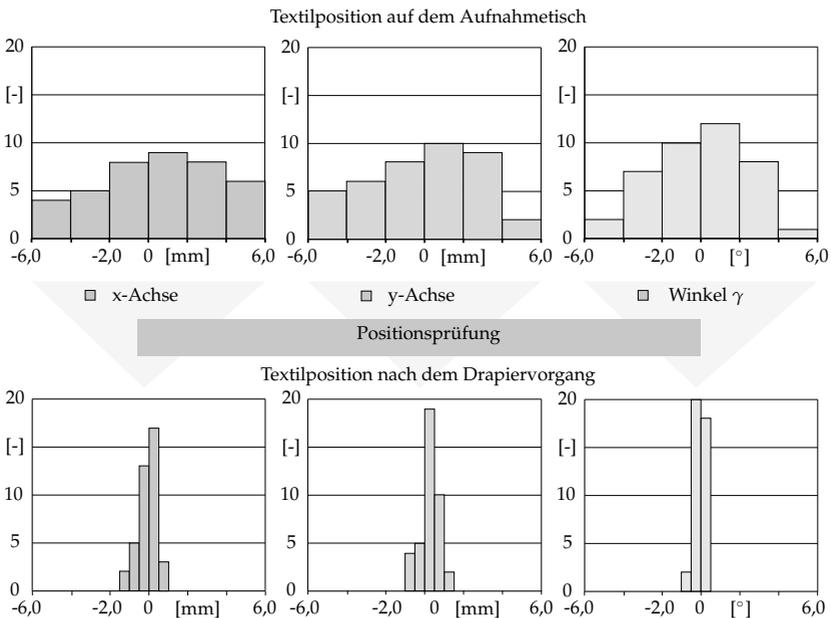


Abbildung 5.15: Häufigkeitsverteilung der Positionskoordinaten bei der Textilaufnahme und nach dem Drapiervorgang

Zur Übertragung der Ergebnisse der Stichprobe lässt sich unter Berücksichtigung des Vertrauensniveaus $1 - \alpha = 95\%$ (wobei α die Irrtumswahrscheinlichkeit bezeichnet) als Parameter für die Aussagewahrscheinlichkeit der Erwartungswert μ der zugrunde liegenden Normalverteilung abschätzen (DIETRICH ET AL. 2014). Tabelle 5.3 zeigt den Erwartungswert \bar{x} , die bei einer Normalverteilung den Näherungswert für den Mittelwert μ angeben, sowie die Standardabweichung σ der Grundgesamtheit der Verteilung. Die Schwellenwerte

grenzen schließlich den Wertebereich ein, innerhalb dessen mit der angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit die erhaltenen Koordinaten der abgelegten Textilien liegen. $u_{1-\alpha/2} = 1,960$ stellt einen Tabellenwert zur Berechnung der Schwellenwerte bei Normalverteilungen dar.

Kennwert	Formelzeichen	Berechnungsvorschrift	Δx	Δy	$\Delta\Phi$
Erwartungswert	\bar{x}/μ	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i$	-0,12 mm	+0,23 mm	-0,08°
Standardabweichung	σ	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	+0,41 mm	+0,44 mm	+0,22°
Oberer Schwellenwert	x_{oben}	$\mu + u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma$	+0,70 mm	+1,09 mm	+0,36°
Unterer Schwellenwert	x_{unten}	$\mu - u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma$	-0,94 mm	-0,63 mm	-0,52°

Tabelle 5.3: Kennwerte zur Bewertung des Ablageverhaltens basierend auf der Normalverteilung (DIETRICH ET AL. 2014)

Aus den berechneten Schwellenwerten lässt sich ableiten, dass Ungenauigkeiten bei der Textilaufnahme in einem Bereich von

$$-6,0 \text{ mm} < \Delta X, \Delta Y < 6,0 \text{ mm} \text{ sowie } -6,0^\circ < \Delta\Phi < 6,0^\circ \quad (5.20)$$

detektiert und korrigiert werden können. Dabei werden die abgelegten drapierten Halbzeuge für den vorliegenden Stichprobenumfang im Vertrauensniveau 97°, d. h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %, wiederholgenau innerhalb der berechneten tabellierten Abweichungen abgelegt. Am Beispiel der Verschiebung in x-Richtung variiert die Position zwischen 1,09 mm und -0,63 mm vom Soll-Punkt. Im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit von $\pm 2,0$ mm in translatorischer bzw. von $\pm 1,5^\circ$ in rotatorischer Richtung erfüllen die erzielbaren Ergebnisse die Anforderungen. Während der Versuchsreihen wurde die Variation der Eingangsposition auf dem Aufnahmetisch aufgrund der Größe der Wirkfläche auf $\Delta X, \Delta Y = \pm 6$ mm beschränkt, jedoch lässt sich die Abweichung aus konstruktiver Sicht des Greifers bei der Ablage auf eine Abweichung von $\Delta X, \Delta Y \pm 10$ mm ausweiten.

Abbildung 5.16 veranschaulicht die Maßnahmen zur Reduktion der Systemfehler unter den geforderten Grenzwert. Zur vereinfachten Darstellung wird jeweils der absolut, betragsmäßig größte Fehler jeder Koordinate erfasst, der die höchste Abweichung darstellt.

Wird die Konturprüfung vor dem Drapierprozess aus Prozesssicht zur Elimini-

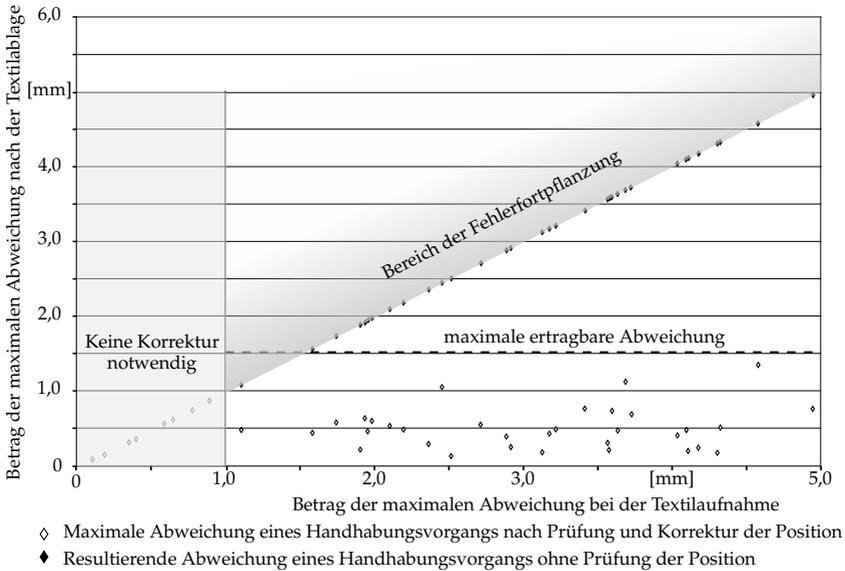


Abbildung 5.16: Unterbrechung der Fehlerfortpflanzung durch Reduktion der Positionsfehler

nierung sequenziell aufaddierter Fehler eingesetzt, lässt sich die Fehlerfortpflanzung unterbrechen, indem der Wert für die Koordinate für die nächsten Prozessschritte unter einen bestimmten Soll-Wert fällt. Neben der Fehlerüberwachung ermöglicht die Positionsprüfung eine Textilbereitstellung ohne die Notwendigkeit der genauen Positionsinformationen des Textils vor Prozessbeginn, weshalb sich aus wirtschaftlicher Sicht eine kostengünstige Zuführung realisieren lässt. Dies gilt für die Entnahme aus dem Speichersystem (zweites Teilszenario), bei der nicht dauerhaft die exakte Position des Textils bekannt sein muss.

Abbildung 5.17 visualisiert die Versuchsreihe der Positionsaufnahme des Textils während der Aufnahme sowie nach dem Drapierprozess anhand der drei ermittelten Koordinaten. Grau hinterlegt sind die räumlichen Bereiche, in denen die Punkte liegen. Neben den eingesetzten Koordinaten wird auch die z-Richtung berücksichtigt.

Aufgrund der Nachgiebigkeit des Greifers werden Ungenauigkeiten ausgeglichen, sodass keine Abweichung der Position resultiert. Auftretende Falten auf der Wirkfläche bewirken eine Längenänderung der Textilkontur, sodass das

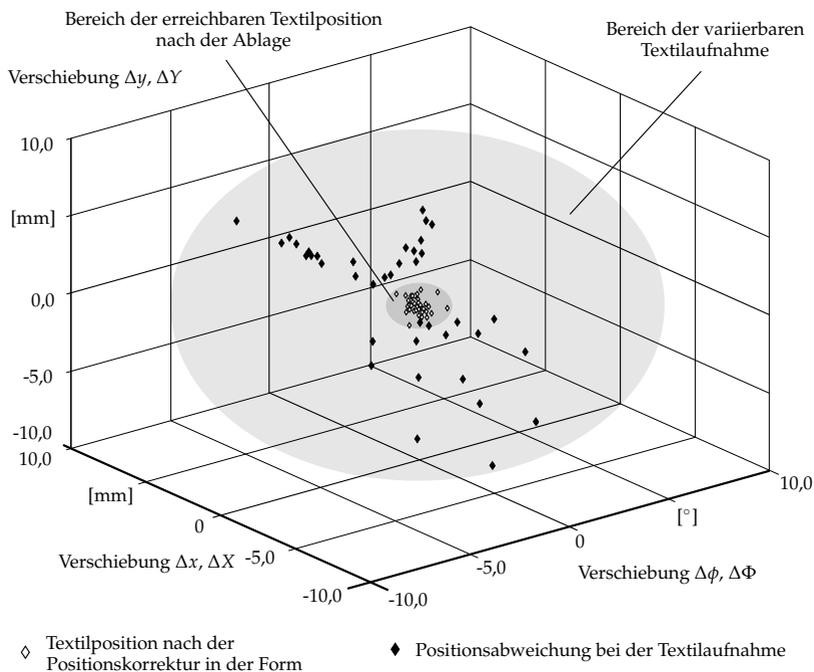


Abbildung 5.17: Auswertung der erreichbaren Ablegegenauigkeit

Bildverarbeitungssystem die Randkurve nicht mehr eindeutig bestimmen kann. In diesem Fall tritt eine Fehlermeldung an den Bediener auf.

Beurteilung der Textilqualität

Die Kontrolle der strukturellen Textilqualität findet nach der Textilablage in die Drapierform statt, womit der Zustand nach dem Durchlaufen eines Kriterienkatalogs beurteilt wird. Basierend auf den möglichen Textilfehlern aus Abschnitt 2.3.4 müssen für den Beleg der Unversehrtheit alle Kriterien erfüllt sein; sie lassen sich in die Bereiche Faserstruktur, Randkontur und Fremdkörper einteilen (vgl. Tabelle A.14). Außerdem wird das Textil als vorab geprüft angenommen, Strukturfehler wie Knoten oder Nahtfehler werden also ausgeschlossen.

Bei Verwendung von Halbzeugen mit spezifisch eingebrachten Bindermaterialien gilt es, zusätzliche Kriterien aufzustellen. Anstelle der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten manuellen sichtoptischen Prüfung lässt

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

sich die Prüfung auch automatisiert über einen Auswertalgorithmus des aufgenommenen Bildes durchführen. In diesem Fall dienen die erhaltenen und abgespeicherten Bilder des Referenzszenarios zur Nachverfolgbarkeit der Erfüllung der notwendigen Qualität.

Im Rahmen der gesamten experimentellen Reihen zur Prüfung der Ablageposition wurden übergreifend keine Fehler detektiert, die infolge einer Nichteinhaltung der Kriterien zu einem Ausschuss des Textils geführt hätten. Die Unversehrtheit der Textilien während der Versuchsreihen zeigt, dass die definierten Funktionen zur Gestaltung der Wirkfläche erfüllt werden. So lässt sich durch die Verschiebung der Krümmungslinie und durch die Erhöhung der Unterdruckstellen für eine Reduktion der Ansaugkräfte, die zu einer kontrollierten Verscherung während der Umformung führen, die schonende Handhabung für das Textil realisieren. Neben der Wirkfläche verursacht auch der eingesetzte berührungslos integrierte kapazitive Sensor keine Auswirkungen auf die Textilstruktur.

5.5 Übergeordnete Prozessbewertung

Basierend auf den Kennwerten aus Abbildung 5.3 werden die Ergebnisse der technischen Validierung anhand einer übergeordneten Bewertung der Prozessfähigkeit sowie der Verfügbarkeit des Systems zusammengeführt. Zugrunde liegen die jährlichen Produktionszahlen der Fertigung der Hinterradschwinge, woraus sich ein Tagesvolumen von 400 Bauteilen ableitet. Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgt wie in Abbildung 5.18 beschrieben.

Prozessfähigkeit		Verfügbarkeit	
Prozesspotenzial: $c_p = \frac{T}{\Delta} = \frac{U-L}{\Delta}$		Technische	
Prozessfähigkeit: $c_{pK} = \min \frac{U-X_{50\%}}{\Delta U} \frac{X_{50\%}-L}{\Delta L}$		Verfügbarkeit: $V_T = N_T = \left(1 - \frac{T_T}{T_B}\right) \cdot 100\%$	
Prozessstreuung: $\Delta = \hat{X}_{99,865\%} - \hat{X}_{0,135\%}$ $= 6 \cdot \sigma$		$MTBF = \frac{\Sigma(TBF)}{n}$ $MTTR = \frac{\Sigma(TTR)}{n}$	
T:	Toleranz	N_T :	technischer Nutzungsgrad
U:	obere Spezifikationsgrenze	T_T :	technische Ausfallzeit
L:	untere Spezifikationsgrenze	T_B :	gesamte Belegungszeit
Δ :	Prozessstreuung	MTBF:	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (Mean Time between Failure)
$\hat{X}_{99,865\%}$:	99,865%-Quantil	TBF:	Betriebsdauer zwischen Ausfällen
$\hat{X}_{0,135\%}$:	0,135%-Quantil	MTTR:	mittlere Reparaturzeit (Mean Time to Recover)
$X_{50\%}$:	50%-Quantil	TTR:	Reparaturzeit zwischen Ausfällen
		n:	Anzahl der auftretenden Aktionen

Abbildung 5.18: Kennwerte zur übergeordneten Prozessbewertung

Der Prozessfähigkeitsindex C_p stellt einen charakteristischen Kennwert dar, um die Leistung eines Prozesses zu bewerten (KLETTI 2006; VDMA 2009). Abhängig von der geforderten Toleranz, die sich durch die Spezifikationsgrenzen $\pm 1,5$ mm bzw. $\pm 1,5^\circ$ ergibt, wird ermittelt, wie oft die Prozessstreuung Δ , die sich gemäß des Six-Sigma-Ansatzes über die sechsfache Standardabweichung berechnet, in der Toleranzbreite enthalten ist. Aus der Toleranzbreite folgt ein Abdeckungsbereich von 99,73 % der Normalverteilung.

Als weitere Größe berücksichtigt der minimale Fähigkeitsindex c_{pk} zusätzlich die Prozesslage (d. h. den Wert, um den die Versuchsreihe schwankt). Abhängig von der Abweichung des 50%-Quantils $X_{50\%}$ vom Mittelwert ergibt sich der Index c_{pk} , der maximal den Wert des Index c_p annehmen kann (DIETRICH ET AL. 2014).

Neben der Prozessfähigkeit liefert auch die technische Verfügbarkeit eine wesentliche Aussage zur Qualität des Handhabungssystems (BÖRCSÖK 2004). In Abschnitt 5.3 wurde gezeigt, dass alle auftretenden Fehler im Prozess mit der eingesetzten Sensorik detektiert werden konnten; somit hat der Handhabungsprozess keine Auswirkungen auf die Bauteilqualität. Aus diesem Grund fließen die Ergebnisse der Ablageversuche direkt in die Berechnungen der Kenngrößen ein. Die berechneten Indizes sind in Abbildung 5.19 dargestellt.

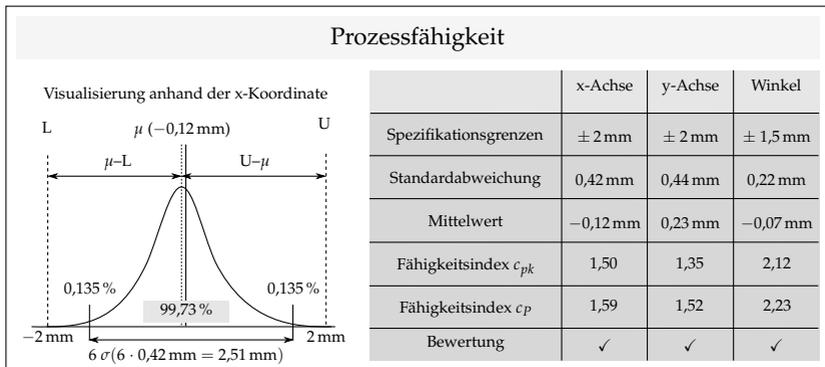


Abbildung 5.19: Übersicht über die Prozessfähigkeit des Handhabungsvorgangs

Die Festlegung des Mindestgrenzwerts ist individuell abhängig von der Anwendung und dem Stichprobenumfang. DIETRICH & SCHULZE (2014) definieren für die vorliegende Stichprobe einen Mindestgrenzwert von 1,33, um mit der beschriebenen Wahrscheinlichkeit von 99,73 % die Produktqualität einhalten zu können. Der Gültigkeitsbereich der Fähigkeitskennwerte ist nicht auf die positi-

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

onsgenaue Aufnahme beschränkt, sondern gilt auch für die variable Aufnahme innerhalb der Grenzen $\Delta X \pm 6 \text{ mm}$.

Die technische Verfügbarkeit wird über die verschiedenen Betriebszeiten ermittelt. In Abbildung 5.18 werden rechts die notwendigen Berechnungsvorschriften dargestellt. Dabei liegt der Fokus auf dem Benchmark der Szenarien während der auszuführenden Tätigkeit, weshalb Neben- und Rüstzeiten nicht berücksichtigt und als Ausfallzeiten nur technische Störfälle einbezogen werden. Neben der technischen Verfügbarkeit werden die Zeitgrößen **MTBF** und **MTTR**, die zur Beschreibung der Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung der Ausfallraten eingesetzt werden, adaptiert und auf den Handhabungsprozess angewendet (BRUNNER ET AL. 2013; DIN 2008A; DIN 2013; VDI 2011). Verglichen wird das automatisierte Szenario, in dem das umgesetzte Sensorsystem eingesetzt wird, mit einer manuellen Lösung. Die manuelle Prüfung erfolgt dabei mittels Sichtprüfung eines Werkers. Zugrunde gelegt werden die automatisierten Handhabungsprozesse im Betriebsmodus **BM 2** (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Abbildung 5.20 zeigt die Auswertung der berechneten Verfügbarkeit und der Zeitgrößen für die beiden Szenarien. Zur Berechnung der Größen werden für

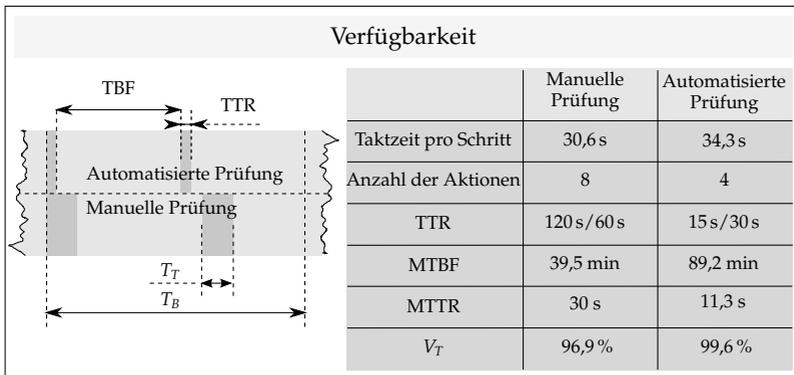


Abbildung 5.20: Übersicht über die Verfügbarkeit des Handhabungsvorgangs

die beiden Szenarien qualitativ die Hilfsgrößen bestimmt. Für die automatisierte Prüfung wird vorausgesetzt, dass nur ein Teil der Schwachstellen in einem Fehler resultiert und durch die Anwesenheitsprüfung beim Ablegen ein Anhaften vermieden werden kann. Aufgrund der Fehlerreduktion und der kürzeren Reaktionszeiten bei der Fehlerbehebung kann sowohl die mittlere Betriebsdauer (**MTBF**) erhöht als auch die Standzeit (**MTTR**) erheblich reduziert werden.

Als Datengrundlage dienen 400 Bauteile. Die umgesetzten Maßnahmen spie-

geln sich auch in einer Erhöhung der technischen Verfügbarkeit wider. Die kürzere Handhabungszeit bei der manuellen Prüfung wird durch die Effekte der beschriebenen Zeitreduktion ausgeglichen.

Werden die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer der einzelnen Sensoren untersucht, lässt sich sowohl für den kapazitiven Sensor als auch für das Kamerasystem eine fehlerfreie und robuste Bedienung ableiten, deren fehlerfreier Einsatz während der gesamten Validierung nachgewiesen werden kann.

5.6 Zusammenfassung

Die technische Validierung der umgesetzten Maßnahmen zur Sensorintegration erfolgte am Beispiel einer Oberflächenstruktur für eine Hinterradschwinge eines Motorrads. Aus den gestellten Anforderungen und Sensorlösungen wurde ein zweistufiges unabhängiges Vorgehen abgeleitet, um sowohl den Handhabungsprozess als auch die erreichbare Qualität des Handhabungsguts bei dessen Durchführung zu validieren.

Mit der Zuverlässigkeitsanalyse des Ablageprozesses, die anhand der Überlebenswahrscheinlichkeit nach SHAPIRO & WILK (1965) berechnet wurde, konnte nachgewiesen werden, dass alle auftretenden Fehler detektiert und je nach gewünschtem Integrationsgrad auch ausgeregelt werden können. Für den vorliegenden Referenzprozess erweist sich der Einsatz einer Überwachung als notwendig, da ohne Überwachung ein Fertigungslos von zehn Preforms mit je sechs Textillagen nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 35 % fehlerfrei bearbeitet werden kann.

Bei der Prüfung der erreichbaren Ablegequalität zeigte die Validierung der Messeinrichtung, dass das implementierte Kamerasystem die Randkurve des Textils mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73 % mit einer Genauigkeit von $\Delta x, \Delta y \pm 0,8 \text{ mm}$ bzw. $\Delta \phi \pm 0,4^\circ$ detektiert.

Übertragen auf das gesamte Handhabungssystem wird ein wiederholgenauer Ablageprozess mit einer Genauigkeit von $\pm 1,1 \text{ mm}$ translatorischer bzw. $\pm 0,5^\circ$ rotatorischer Abweichung von der Soll-Kontur erreicht (vgl. Tabelle 5.3). Dabei liegt ein Vertrauensniveau von 95 % zugrunde. Mit diesen Ergebnissen werden die geforderten Ablagetoleranzen von $\Delta x, \Delta y \pm 2,0 \text{ mm}$ und $\Delta \phi \pm 1,5^\circ$ eingehalten.

Für die nachfolgende wirtschaftliche Bewertung wurden erreichbare Taktzeiten des Handhabungsprozesses sowie übergeordnete Größen wie die Prozessfähigkeit und die technische Verfügbarkeit errechnet. Unter Berücksichtigung der häufigeren und längeren Unterbrechungen zur Störungsbeseitigung bei

5 Technische Validierung des Handhabungssystems

der manuellen Prüfung wurde für die automatisierte Prüfung eine technische Verfügbarkeit von 99,6% ermittelt (manuelle Prüfung: 96,9%). Bezogen auf die Taktzeit muss für die automatisierte Qualitätsprüfung ein zeitlicher Aufschlag berücksichtigt werden, wohingegen durch die eingesetzten Sensoren die auftretenden Fehler reduziert und das Ablageverhalten verbessert werden kann. Außerdem vermindert das Kamerasystem eine weitere Fehlerfortpflanzung und ermöglicht eine größere Streuung der Aufnahmeposition.

6 Wirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels soll eine monetäre Bewertung der Wirtschaftlichkeit des umgesetzten Handhabungsschrittes durchgeführt werden. Als Referenzszenario dient der in Kapitel 5 untersuchte Handhabungsvorgang, für dessen Bewertung die erforderlichen Kennwerte aus der experimentellen Validierung in Kapitel 5 erhoben wurden. Für unterschiedliche Anwendungsszenarien wird der Zeitpunkt der Amortisation für die zusätzlichen Kosten durch die Qualitätssicherungsmaßnahmen berechnet.

In Abbildung 6.1 werden die wesentlichen ökonomischen Kriterien zusammengefasst, die verschiedene Produktionsszenarien unterschiedlich beeinflussen.

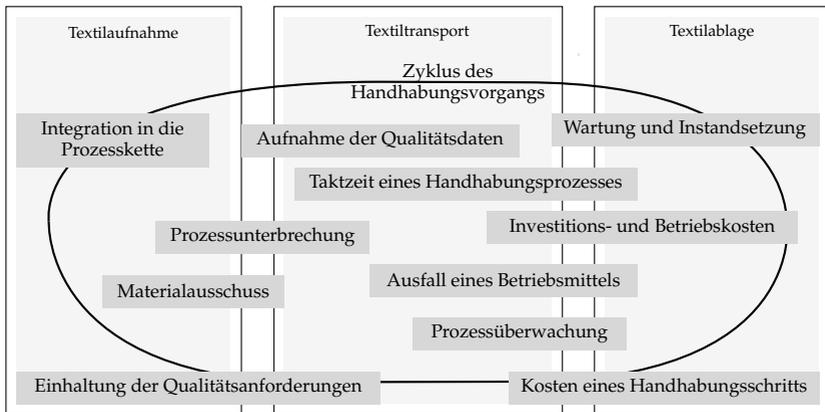


Abbildung 6.1: Übersicht über die Kriterien zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Neben den zeitlichen Kriterien, wie der Handhabungsdauer und der daraus resultierenden zusätzlichen Zeit für die Prüfung des textilen Halbzeugs, ermöglichen auch die monetären Größen eine quantitative Bewertung des Handhabungsschrittes. Die Aufnahme von Qualitätsdaten zur Rückverfolgbarkeit des gefertigten Produkts sowie die flexible Integration des Teilprozesses in die

übergeordnete Prozesskette stellen qualitative Vorteile dar, die jedoch nicht im Rahmen der nachfolgenden finanziellen Bewertung berücksichtigt werden.

6.1 Szenariodefinition

Die Bewertung erfolgt anhand dreier Szenarien zur Durchführung des Handhabungsprozesses, mit denen unter Berücksichtigung der Allgemeingültigkeit die verschiedenen Abstufungen der Qualitätssicherung abgedeckt werden (vgl. Abbildung 6.2).

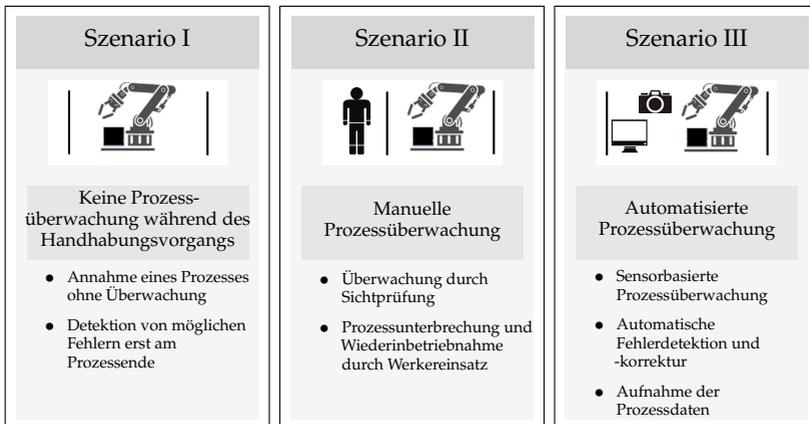


Abbildung 6.2: Definition der Szenarien

Unter Einbeziehung der in Abschnitt 5.3 berechneten Überlebenswahrscheinlichkeiten, woraus sich die Qualitätsfähigkeit der einzelnen Szenarien bestimmen lässt, wird Szenario I für das vorliegende Referenzszenario aus technischer Sicht nicht empfohlen. Für Handhabungsvorgänge, in denen größere Toleranzgrenzen definiert werden, bietet dieses Szenario jedoch eine mögliche Variante, weshalb es als Referenz für die wirtschaftliche Bewertung mit aufgenommen wird.

Die durch die fehlende Qualitätsüberwachung eingebrachten Fehler würden in Szenario I erst im Rahmen der Endkontrolle detektiert werden, sodass durch die Bearbeitung von späteren Ausschussteilen in den Prozessschritten nach dem Preforming zusätzliche Kosten entstehen.

In allen Szenarien werden der Absortier- und Drapierschnitt zu einem einzigen Handhabungsschritt zusammengefasst und eine technische Umsetzung des Handhabungssystems mittels additiv gefertigter formflexibler Wirkflächen vorausgesetzt. Außerdem wird in allen Szenarien der automatisierte Betriebszustand mit den ermittelten Taktzeiten abgebildet. Zur Vergleichbarkeit der erhaltenen Ergebnisse wird in Szenario I die Prüfung der Preform nach dem Aufbau vorausgesetzt, wozu Ansätze aus Abbildung 2.11 in Kapitel 2 geeignet sind. Szenario II setzt die manuelle Überwachung durch einen Mitarbeiter voraus, der im Störfall den Handhabungsvorgang unterbricht und innerhalb des Schutzbereichs den Fehler korrigiert. Szenario III entspricht den in der vorliegenden Arbeit identifizierten und umgesetzten automatisierten Strategien und Lösungen zur Fehlerdetektion und -eliminierung.

6.2 Wirtschaftliche Bewertung des Handhabungssystems

6.2.1 Auswahl eines geeigneten Bewertungsverfahrens

Unter Fokussierung und Priorisierung unterschiedlicher Kriterien können zur Bewertung verschiedene Verfahren herangezogen werden. Abbildung 6.3 stellt qualitativ die drei Szenarien den wesentlichen Einfluss- und Zielgrößen mit ihren Auswirkungen einander gegenüber.

Die dargestellten Größen lassen sich dabei anhand der Kriterien Zeit, Kosten und Qualität unterscheiden. Aufgrund unterschiedlicher Auswirkungen dieser Größen auf die Szenarien resultieren entweder Vor- oder Nachteile für die drei Szenarien, die mithilfe des Dreiecks veranschaulicht werden. Anhand der Pfeile werden die Bereiche im Dreieck markiert, in denen entweder die Vor- oder die Nachteile eingeordnet sind.

Am Beispiel der Investitionskosten ergeben sich für die Szenarien I und II jeweils Vorteile gegenüber Szenario III, da nur in diesem Szenario zusätzliche Investitionskosten für die Sensorik auftreten. Die Einordnung der Investitionskosten im linken oberen Bereich des Dreiecks veranschaulicht die Einteilung. Das Ziel der vorliegenden Bewertung ist die Quantifizierung des erwarteten monetären Nutzens der automatisierten Qualitätsprüfung im Vergleich zur manuellen Überwachung und Fehlerbeseitigung (HOFFMEISTER 2008). Die Entscheidung für das gewählte Verfahren richtet sich im Wesentlichen nach dem Zielsystem mit den relevanten Zielgrößen der *Bearbeitungszeit*, der *Investitionskosten* und des benötigten *Personaleinsatzes* zur Anlagenüberwachung

6 Wirtschaftliche Bewertung

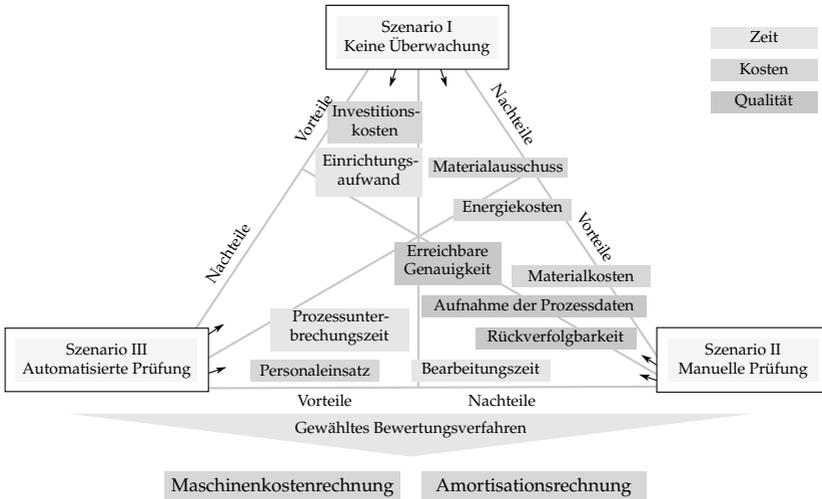


Abbildung 6.3: Gegenüberstellung der Szenarien

(GÖTZE 2008). Da der Handhabungsvorgang als separater Teilschritt der Fertigung mit festen Systemgrenzen betrachtet werden kann, der flexibel in die Produktion integriert werden kann, wird die Bewertung auf den Aufbau einer einzelnen Textillage reduziert, wofür die statische Stückkostenrechnung unter Berücksichtigung des Maschinenstundensatzes ein geeignetes Verfahren darstellt. Unter Berücksichtigung der Personal-, Material- und Maschinenkosten lassen sich die unterschiedlichen Kriterien zusammenfassen und auf die erreichbaren stündlichen Stückzahlen skalieren (POGGENSEE 2011):

$$M_{\text{Fertigung}} = \frac{\text{Stündliche Personal-, Material- und Maschinenkosten}}{\text{Bauteile pro Stunde}} \quad (6.1)$$

Mit den Ergebnissen der Kostenrechnung lässt sich anhand der Amortisationszeit das mit der Investition verbundene finanzwirtschaftliche Risiko beurteilen. Für die Berechnung wird der Zeitraum $t_{\text{Amortisation}}$ definiert, in dem das langfristig eingesetzte Kapital aus den durchschnittlichen Rückflüssen oder Einnahmeüberschüssen des Investitionsobjekts wiedergewonnen wird (GÖTZE 2008; HOFFMEISTER 2008). Der Zeitraum wird auf eine kritische Mindeststückzahl

Größe	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Personalbedarf	0,25 MA	1 MA	0,25 MA
Taktzeit der Preformfertigung	183,45 s	183,45 s	205,65 s
Prognostizierte Störfälle	0	8	4
MTBF	39,5 min	89,2 min	89,2 min
Ausschussquote der Preform	12 %	0 %	0 %
Bauteilfertigung	17 Stück/h	19 Stück/h	17 Stück/h

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der erforderlichen Kennwerte für die betrachteten Szenarien

bzw. auf Handhabungsoperationen umgerechnet:

$$t_{\text{Amortisation}} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{mittlere Rückflüsse}} \quad (6.2)$$

Für Szenarien mit häufigen Produktwechseln und einem erhöhten Umrüstaufwand ist eine dynamische Investitionsrechnung vorteilhaft, die anhand weiterer Berechnungsverfahren, wie der Kapitalwertmethode, der Annuitätenmethode oder der internen Zinsfußmethode, durchgeführt wird.

Wird die Bewertung auf die gesamte Prozesskette bezogen, ermöglicht die Lebenszykluskostenanalyse eine detaillierte Einordnung in den Fertigungsprozess (BODE ET AL. 2011).

6.2.2 Rahmenbedingungen und Bewertungskriterien

Aus den Ergebnissen der technischen Validierung werden individuell für jedes Szenario die erforderlichen Größen ermittelt (vgl. Tabelle 6.1) (HOFFMEISTER 2008). Die Bearbeitungszeit ergibt sich für die Handhabung des Bauteils aus der Anzahl der Lagen im automatischen Betriebsmodus (vgl. Abschnitt 5.4.2). Zusätzlich werden die Unterbrechungszeiten bei Störfällen aus der Berechnung der MTBF berücksichtigt.

Der Personalbedarf in den Szenarien I und III wird anteilig für einen Mitarbeiter (MA) festgelegt, da der betreffende Mitarbeiter aufgrund der automatisierten Prüfung nicht ausschließlich in diesem Teilschritt eingesetzt werden muss. Daher kann die Überwachung weiterer Prozessschritte übernommen werden, sodass anteilig ein Viertel für die Preformingfertigung vorgesehen wird. Aus den Ergebnissen der Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeiten leiten sich die prognostizierten Störfälle in den Szenarien II und III sowie die Ausschussquote

6 Wirtschaftliche Bewertung

Größe	Kennwert	Einheit
Inbetriebnahmefaktor	0,04	-
Taktzeiten pro Lage (BM 1 ohne Prüfung)	30,575	s
Taktzeiten pro Lage (BM 2 mit Prüfung)	34,275	s
Kalkulatorischer Zinssatz	8	%
Jährliche Laufzeit im Zweischichtbetrieb	3840	h/a
Jährliche Laufzeit im Dreischichtbetrieb	5760	h/a
Materialkosten	20	€/kg
Nutzungsdauer	6	Jahre
Personalkosten im Zweischichtbetrieb	50	€/h
Personalkosten im Dreischichtbetrieb	75	€/h

Tabelle 6.2: Annahmen und allgemeine Kennwerte für die wirtschaftliche Bewertung der Szenarien

in Szenario I ab, die in diesem Szenario in einer geringeren Bauteilfertigung resultiert, obgleich die gleiche Taktzeit wie in Szenario II erreicht wird. Eine Preform setzt sich aus sechs Lagen zusammen, womit sich eine Taktzeit für die Fertigung einer Preform von 183,45 s bzw. 205,65 s ergibt. Die prognostizierten Störfälle beziehen sich auf die stündliche Fertigung der Preforms. Des Weiteren werden wertunabhängige Kenngrößen für die Bewertung benötigt, die in Tabelle 6.2 aufgeführt werden. Für die exakten Berechnungsvorschriften der Annahmen wird auf Tabelle A.15 im Anhang verwiesen.

6.2.3 Durchführung der Bewertung

Zur Berechnung der Stückkosten werden die Szenarien I und II jeweils separat in einen Zweischicht- und einen Dreischichtbetrieb unterteilt. In Tabelle 6.3 werden die resultierenden Stückkosten sowie die erreichbaren Stückzahlen verglichen, deren Berechnung im Anhang in Tabelle A.15 formelseitig hinterlegt ist. Die Stückkosten setzen sich aus den Kosten für den Maschineneinsatz, dem erforderlichen Personalaufwand sowie den Ausschusskosten der textilen Halbzeuge zusammen. Der Vergleich zeigt die geringsten Kosten für Szenario III, was vor allem auf die reduzierten Personal- und Materialkosten zurückzuführen ist. In Szenario I weisen die Maschinen- und Personalkosten einen geringeren Anteil auf, jedoch führt die Ausschussquote von 12% zu erhöhten Ausschusskosten. Für Szenario II ergeben sich die hohen Stückkosten aus den hohen Personalkosten, die vor allem mit den Zuschlägen im Dreischichtbetrieb

zu den höchsten Stückkosten führen.

Größen	Einheit	Szenario I		Szenario II		Szenario III
		Zweischicht- betrieb	Dreischicht- betrieb	Zweischicht- betrieb	Dreischicht- betrieb	Dreischicht- betrieb
Wiederbeschaffungskosten des HHS	€	275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00	302 000,00
Umrüstkosten bei anderem Bauteil	€/a					12 080,00
Wartungs- und Einstellungskosten	€/a	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	12 080,00
Energiekosten	€/a	3 000,00	3 000,00	3 000,00	3 000,00	3 000,00
Raumkosten	€/a	2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00
Kalkulatorischer Zinssatz	€/a	45 833,33	45 833,33	45 833,33	45 833,33	50 333,33
Kalkulatorische Abschreibung	€/a	22 000,00	22 000,00	22 000,00	22 000,00	24 160,00
Bauteilausschuss	%	12,00	12,00	0,00	0,00	0,00
Taktzeit für eine Preform (6 Lagen)	s	183,45	183,45	183,45	183,45	205,65
Bauteile pro Stunde	Stück/h	17,00	17,00	17,00	17,00	15,00
Maschinenstundensatz	€/h	21,83	14,55	21,83	14,55	18,00
Personalkostensatz	€/h	12,50	18,75	50,00	75,00	18,75
Materialausschusskosten	€/h	24,00	24,00	8,00	8,00	8,00
Stückkosten pro Preform	€/Stück	3,43	3,37	4,70	5,74	2,98
Erreichbare Stückzahlen	Stück/a	66 313	99 470	75 356	113 034	100 832

HHS: Handhabungssystem

Tabella 6.3: Berechnung der Stückkosten

Für Szenario III ergeben sich aufgrund der zusätzlichen Investitionskosten für die Sensorik die höchsten Maschinenstundenskosten, womit sich zur weiteren Senkung der Stückkosten die Reduktion der Wiederbeschaffungskosten für die Sensorintegration als der wichtigste Befähiger darstellt. Berücksichtigt werden in Szenario III auch die Umrüstkosten zur Umstellung des Handhabungsprozesses und der damit verbundenen Neueinstellung der Prozess- und Textilprüfung auf neue Geometrien. Die erreichbaren Stückzahlen pro Jahr ergeben sich aus dem Schichtmodell, der Anzahl der gefertigten Preforms sowie der notwendigen Zeit zur Beseitigung von Störungen.

Basierend auf den unterschiedlichen Stückkosten wird anhand der Amortisationsrechnung die Rekapitalisierung des eingesetzten Kapitals berechnet (vgl. Abbildung 6.4). Das Diagramm links zeigt den Verlauf der Amortisationsdauer in Abhängigkeit von den Investitionskosten bei der Einführung einer Sensorik zur Qualitätssicherung. Hierzu werden jeweils die geringsten Stückkosten aus den Szenarien I (S I) und II (S II) durch die Stückkosten aus Szenario III (S III) substituiert. Aufgrund der höheren Stückkosten in Szenario II ist die Amortisation der Kosten für die Sensorik nach 0,21 Jahren erreicht, wohingegen für Szenario I eine Dauer von 0,70 Jahren berechnet wird. Dies entspricht einer gefertigten Stückzahl von 70 000 bzw. 16 000 Preforms. Übertragen auf die Anzahl textiler Halbzeuge müssen bis zur Amortisation 418 000 bzw.

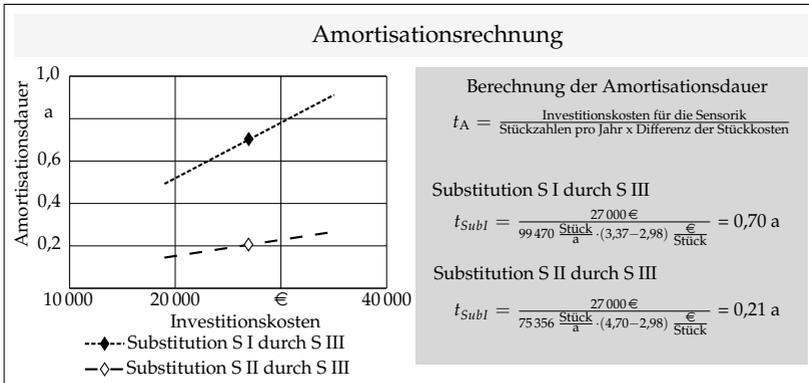


Abbildung 6.4: Übersicht über die durchgeführte Amortisationsrechnung

95 000 Handhabungsvorgänge durchgeführt werden. Rechts in Abbildung 6.4 ist die Berechnung hinterlegt. Durch die gleichartige Gestaltung des Handhabungssystems werden lediglich die Differenzkosten der Umsetzung der Sensorintegration wirksam, womit die Amortisationsrechnung unabhängig vom Greifsystem ist. Bei Variation der Investitionskosten ändert sich die Amortisationszeit unterschiedlich je nach Differenz der Stückkosten.

Neben der monetären Bewertung, auf deren Basis ein Einsatz der Sensorik zu empfehlen ist, lassen sich qualitative Faktoren und Randbedingungen formulieren, die in der durchgeführten Bewertung nicht berücksichtigt wurden.

- *Textilgröße*
Für Bauteile, die durch eine größere Textilfläche im Vergleich zum gewählten Referenzbauteil einen höheren Materialbedarf benötigen, steigt die Differenz der Ausschusskosten, wodurch die Wirtschaftlichkeit von Szenario II positiv beeinflusst wird.
- *Zusätzliche Preformprüfung*
Die Kosten sowie der zeitliche Aufwand bei der Preformprüfung in Szenario I werden nicht berücksichtigt. Hierzu sind weitere Systeme notwendig, für die zusätzliche Personal- und Investitionskosten anfallen.

-
- *Weitere Fertigungskosten der ungeprüften Preforms*
Im Falle einer Endprüfung nach der finalen Bauteilfertigung werden die zusätzlichen Produktionskosten für die defekten Bauteile, die erst am Ende der Prozesskette als Ausschuss detektiert werden, nicht berücksichtigt.
 - *Geringere Verfügbarkeit eines alternativen Greifers*
In allen Szenarien wird das Betriebsverhalten eines Greifsystems angenommen, das aufgrund der bedarfsgerechten additiven Struktur das ermittelte reduzierte Störverhalten aufweist. Daher würde ein alternatives Greifsystem eine erhöhte Störquote aufweisen.

Mögliche Änderungen der Handhabungszeit, die sich je nach vorliegendem Halbzeug durch eine zusätzliche thermische Aktivierung des Binders ergeben können, wirken sich konstant auf alle Szenarien aus, sodass hierbei keine Unterschiede zwischen den Szenarien auftreten.

6.3 Fazit

Mithilfe eines Stückkostenvergleichs konnte die Wirtschaftlichkeit der automatisierten Qualitätsprüfung im Vergleich zu weiteren Prüfszenarien gezeigt werden. Damit werden infolge der erzielbaren Fertigungszeiten die geforderten jährlichen Stückzahlen von 100 000 Bauteilen erreicht.

Die berechneten Amortisationszeiten belegen den wirtschaftlichen Einsatz der identifizierten Sensorlösungen, bedingt durch das gewählte Schichtmodell und durch die alternative Sicherstellung der Qualität. Sowohl für die Integration in bestehende Anlagen als auch im Rahmen einer Neukonstruktion beträgt der Zeitraum für die Amortisation für das betrachtete Anwendungsszenario unter einem Jahr.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

Im Zuge der aktuellen Entwicklungen in der Produktionstechnik erleben Faserverbundwerkstoffe ein starkes Wachstum. Aufgrund ihrer strukturellen Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen und der zunehmenden Lösungen für eine automatisierte Fertigung finden CFK-Werkstoffe immer mehr Anwendungsfelder in der industriellen Produktion. Nicht zuletzt wegen der beginnenden automatisierten Serienproduktion spielen Fragestellungen zur Verfügbarkeit und Produktqualität eine wichtige Rolle. Die angestrebte Steigerung der Wirtschaftlichkeit unter Einhaltung der notwendigen Qualitätsstandards erfordert robuste Prozessabläufe. Die Steuerung von automatischen Produktionsprozessen bedingt daher die Überwachung der qualitätsrelevanten Fertigungsschritte durch Sensorik.

Speziell die Handhabung der textilen Halbzeuge unterliegt während der Fertigung aufgrund ihrer anisotropen Faserstruktur hohen Anforderungen an eine qualitätskonforme Prozessführung. Eine geringe Winkeländerung eines abgelegten Textils vom Soll-Zustand bewirkt enorme Abweichungen in Bezug auf die spätere Bauteilfestigkeit.

Vor diesem Hintergrund verfolgte die vorliegende Arbeit das Ziel, ein Vorgehen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und zur Qualitätssicherung in einem automatisierten Handhabungsprozess zu erarbeiten. Neben der Identifikation und Auswahl geeigneter Sensoren bildete deren Integration und Einbindung in einen Handhabungsprozess den Schwerpunkt der Untersuchungen. Hierzu wurde eine Methodik erarbeitet, die nach dem Durchlaufen der vier Ebenen konkrete Handlungsempfehlungen und Vorgaben für die Umsetzung liefert. Als Referenzprozess für die Validierung diente der automatisierte Preformaufbau eines gekrümmten Strukturbauteils aus der Automobilindustrie.

Ausgehend von der Definition der Prozessanforderungen und der Bestimmung der auftretenden Einflussgrößen wurde der Handhabungsprozess anhand eines Funktionsmodells strukturiert, um die Schwachstellen des Prozesses in

7 Schlussbetrachtung

Form schädlicher Funktionen zu erfassen. Daran anschließend wurden Sensorlösungen erarbeitet, die auf der Basis der unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien ausgewählt und zu einem Gesamtkonzept zusammengesetzt wurden. Neben einem kapazitiven Sensor zur Anwesenheitsprüfung am Greifer wurde ein Kamerasystem zur Prüfung der geforderten Textilqualität ausgewählt. Hiermit wurde gewährleistet, dass entstehende Fehler bereits zu einem frühen Zeitpunkt des Herstellungsprozesses detektiert und eliminiert werden können.

Unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen wurde das Gesamtkonzept im Rahmen einer Versuchsanlage umgesetzt. Es wurde ein Handhabungssystem unter Ausnutzung des Prinzips des Niederdruckflächensaugens konzipiert. Dabei dienen additiv gefertigte Strukturen zur Gestaltung einer formflexiblen Wirkfläche sowie zur Integration des kapazitiven Sensors in die Wirkfläche. Neben der partiell schaltbaren Wirkfläche verfügt der Greifer über die Möglichkeit der konvexen und konkaven Anpassung an die Ablageform. Neben der mechanischen Anbindung werden die Sensoren auch steuerungstechnisch integriert, sodass, je nach gewünschter Prüfstrategie, unterschiedliche Ansätze zur Beseitigung der auftretenden Fehler bestehen.

Die anschließende experimentelle Validierung ermöglichte die technische Bewertung der umgesetzten Lösung. Unterteilt in die Untersuchung der Prozessqualität während des Handhabens und die Beurteilung der resultierenden Qualität des abgelegten Textils wurden charakteristische Kennwerte ermittelt. Mithilfe einer Zuverlässigkeitsanalyse konnte gezeigt werden, dass im Rahmen der experimentellen Untersuchungen alle auftretenden Fehler detektiert werden konnten.

Das Kamerasystem erlaubt eine Erfassung einer Abweichung der Textilkontur innerhalb von $\Delta x, \Delta y \pm 0,8$ mm translatorischer bzw. $\Delta \phi \pm 0,4^\circ$ rotatorischer Abweichung mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,973 %. Übertragen auf die erreichbare Genauigkeit des Textils im abgelegten Zustand werden die maximal tolerierbaren translatorischen Abweichungen von $\pm 2,00$ mm mit maximal $\Delta x \pm 1,09$ mm eingehalten.

Zur übergeordneten Bewertung der Prozessfähigkeit belegen die Fähigkeitsindizes $> 1,5$ eine ausreichende Prozesssicherheit.

Anhand der Ergebnisse der experimentellen Validierung wurde die Wirtschaftlichkeit für verschiedene Szenarien bewertet. Neben der automatisierten Qualitätsprüfung wurden die weiteren Szenarien, die eine manuelle Überwachung mit einer Endprüfung des fertigen Bauteils beinhalten, einander gegenübergestellt. Dabei ergaben sich für den Dreischichtbetrieb im Szenario mit einer

automatisierten Prüfung die geringsten Stückkosten einer gefertigten Preform. Aufgrund des verminderten Materialausschusses amortisieren sich die eingesetzten Investitionskosten für die Sensorik innerhalb eines Jahres.

Somit stellt das entwickelte Vorgehensmodell einen Wissenspeicher zur Integration prozessspezifischer Sensorik in automatisierte Handhabungsschritte bereit und lässt sich im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten erweitern. Die vorliegende Arbeit legte zum einen den Grundstein für die anschließende Implementierung in den industriellen Fertigungsprozess und lieferte zum anderen einen Beitrag zur wirtschaftlichen Automatisierung von Fertigungsschritten für Faserverbundbauteile.

7.2 Ausblick

Die automatisierte Serienfertigung von Faserverbundbauteilen ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung nur bei einer zuverlässig hohen Produktqualität und einer hohen Verfügbarkeit der Prozessschritte. Zukünftig wird die Beschränkung auf die sichere Erkennung von Bearbeitungsfehlern nicht mehr ausreichend sein. Stattdessen wird die sogenannte Null-Fehler-Produktion gefordert werden, die durch entsprechende Steuerungs- und Regelungsstrategien umgesetzt werden kann. Hieraus ergeben sich zukünftig anspruchsvolle Aufgaben an die Sensortechnik für die automatisierte robotergesteuerte Handhabung. Auf der Basis der vorliegenden Arbeit lässt sich der Entwicklungsstand von Sensorlösungen hinsichtlich eines industriellen Einsatzes bewerten. Durch die Erfüllung mehrerer Prüfaufgaben mit einem Sensor ergeben sich Forschungsfragen zur *Entwicklung* und *Qualifizierung* neuartiger Sensorlösungen. Im vorliegenden Anwendungsfall bietet ein flächiger kapazitiver Sensor, der, in der Wirkfläche des Greifers integriert, zusätzlich zur Anwesenheitsprüfung auch die Konturprüfung des Textils durchführt, eine Lösung zur Eliminierung aller wesentlichen schädlichen Funktionen. Hiermit lässt sich durch die flächige Anordnung mehrerer Sondenelektroden und die anschließende sequenzielle Datenauswertung aus technischer Sicht die aktuell mögliche Anwesenheitsprüfung um die gewünschte Positionsprüfung ergänzen. Die Anforderungen an derartige Konzepte wurden in der vorliegenden Arbeit definiert.

Aufgrund der Übertragbarkeit der allgemeingültigen Vorgehensweise auf weitere Handhabungsvorgänge ist die Wahl der Handhabungsobjekte nicht auf Halbzeuge mit einer Kohlenstofffaserstruktur begrenzt. Es können auch Textilien aus Aramidfasern, Glasfasern oder Materialien für hybride Verbundbauweisen

eingesetzt werden. Die Wahl des Handhabungsguts beeinflusst maßgeblich den eingesetzten Greifer. Daraus ergeben sich neuartige Forschungsansätze zur Weiterentwicklung der Handhabungssysteme. Mit dem Fokus auf strukturierten Leichtbau lassen sich neuartige Konzepte mit alternativen Greifprinzipien und einer zusätzlichen Funktionsintegration ableiten. Für das vorliegende Greifsystem ist die Umgestaltung der Wirkfläche zu einer in allen Umformungen anwendbaren Freiformfläche denkbar. In Anlehnung an EHINGER & REINHART (2014) besteht die Möglichkeit der Integration von Heizelementen in die Wirkfläche des Greifers, um die Halbzeuge nach dem Ablegen mithilfe der Aktivierung eines thermoplastischen Binders zu fixieren.

Neben der Wirkfläche des Greifers beeinflusst auch die Kooperationsform der am Handhabungsvorgang beteiligten Partner maßgeblich die Greifergestaltung. Zum Beispiel existieren bei Mensch-Roboter-Kooperationen für Arbeiten im gemeinsamen Arbeitsraum Sicherheitsrichtlinien, die einen erheblichen Einfluss auf die Greifergeometrie haben.

Zusätzlich zur Greifergestaltung resultieren aus den Anforderungen eines flexiblen Einsatzes und eines schnellen Austauschs des Greifers neue steuerungs-technische Ansätze zur Integration in die Prozesskette, woraus sich weitere Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten ableiten lassen.

Literatur

Abele & Reinhart 2011

ABELE, E.; G. REINHART: *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 2011. 246 S. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ACMITE 2016

ACMITE: *Global Carbon Fiber Composite Market, Total (Volume I+II)*. Hrsg. von ACMITE MARKET INTELLIGENCE E. K. Version 3rd Edition, 565 S. Ratingen.

Ahrens et al. 1998

AHRENS, M.; V. MALLICK; K. PARFREY: *Robotic Based Thermoplastic Fibre Placement Process*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Hrsg. von G. GIRALT; P. DARIO. Piscataway, USA. 1998, S. 1148–1153.

Angerer 2004

ANGERER, T.: *Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten*. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation. München: TU München. 2004. 168 S.

Apmann 2008

APMANN, H.: *Automatic Handling of CFRP-Material for Frame and Stringer Production*. In: *Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition*. Hrsg. von SAE INTERNATIONAL. North Charleston, South Carolina, USA: Aerospace Engineering and Manufacturing. 2008.

Apmann 2013

APMANN, H.: *Mechatronische Handhabungsgeräte*. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 4. 2. Augsburg. 2013, S. 1–26.

Arndt et al. 2015

ARNDT, T.; G. LANZA: Planning support for the design of quality control strategies in global production networks. In: *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. 2015, S. 675–680.

Arnold et al. 2013

ARNOLD, M.; H. FRANZ; M. BOBERTAG; J. GLÜCK; M. COJUTTI; M. WAHL; P. MITSCHANG: Kapazitive Messtechnik zur RTM-Prozessüberwachung; Sensortechnik im Werkzeug; *Lightweight Design* 6. Jahrgang (2013), S.50–S.55.

ASS 2015

ASS MASCHINENBAU GMBH: *Roboterhand Baukasten*. Hrsg. von AUTOMATION SYSTEMS AND SOLUTIONS. Version 9/2015. URL: http://ass-automation.com/katalog/deutsch_new/index.html#p=U1 (besucht am 28. 03. 2017).

Baetz 2013

BAETZ, K. D.: *Die Carbon-Bäcker von der Elbe - Druckluft und Stickstoff beim DLR in Stade*. Version 1/2013. Kaeser Kompressoren SE. URL: <http://www.kaeser.at/Images/2013-01-Deutsches-Zentrum-f%C3%BCr-Luft-und-Raumfahrt-DLR-tcm7-368733.pdf> (besucht am 28. 03. 2017).

Baier 2009

BAIER, H.: Vorlesung Faserverbundwerkstoffe. München: Lehrstuhl für Leichtbau.

Duden 2017

BALCIK, I.; E. HESSE: *Duden Auf gut Deutsch! Rechtschreibung, Grammatik und Wortwahl einfach erklärt*. Unterhaching: KV&H Verlag. 2016. 640 S. ISBN: 978-3840013539.

Bardl et al. 2014

BARDL, G.; A. NOCKE; C. CHERIF; R. KUPKE; M. KLEIN; H. HEUER: Fehlererkennung an glatten Kohlenstofffasergeweben und CFRP mittels Hochfrequenzwirbelstrom-Technik; *Technische Textilien* 57. Jahrgang (2014) (4), S.142–S.143.

Baumann 2010

BAUMANN, P.: *Sensorschaltungen: Simulation mit PSPICE*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. 2010. 304 S. ISBN: 978-3-8348-0289-7.

Baumer 2016

BAUMER - PASSION FOR SENSORS: *Technisches Datenblatt EXG50 - (Digital Monochrome Camera)*. Hrsg. von BAUMER OPTRONIC GMBH. URL: www.baumer.com (besucht am 28.03.2017).

BEAUMONT 2010

BEAUMONT, M.: Vision der Luftfahrtindustrie für CFK; EADS Innovation Works - Composite Technologies. Hrsg. von BAYERN INNOVATIV CLUSTER TREFF ROSENHEIM. Version 10 S. Rosenheim.

Beckhoff 2016

BECKHOFF NEW AUTOMATION TECHNOLOGY: *Handbuch Beckhoff Information System*. Hrsg. von BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG. URL: <https://infosys.beckhoff.com/index.htm> (besucht am 28.03.2017).

Bengler et al. 2011

BENGLER, K.; V. SENNER: Vorlesung Produktionsergonomie. Unter Mitarb. von H. RAUSCH; D. BORTOT. München: Lehrstuhl für Ergonomie.

Bernstein 2013

BERNSTEIN, H.: *Messelektronik und Sensoren; Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. 1. Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. 341 S. ISBN: 978-3-658-00548-1.

BIERMANN et al. 2008

BIERMANN, D.; W. HUFENBACH; G. SELIGER: Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe; Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf. Hrsg. von INSTITUT FÜR LEICHTBAU UND KUNSTSTOFFTECHNIK. Version 59 S. Dresden.

Bindel et al. 2013

BINDEL, T.; D. HOFMANN: *Projektierung von Automatisierungsanlagen: Eine effektive und anschauliche Einführung*. 2. aktualisierte und verbesserte Auflage. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. 266 S. ISBN: 978-3-8348-1332-9.

Böck 2013

BÖCK, J.: *Methode zur Integration nicht-konventioneller Verfahren in flexible Fertigungs- und Montagelinien*. Bd. 19. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart. 2013. 211 S. ISBN: 978-3-8396-0590-5.

Literatur

Bode et al. 2011

BODE, M.; F. BÜNTING; K. GEISSDÖRFER: *Rechenbuch der Lebenszykluskosten; Ein Leitfaden mit Rechenmodell und Arbeitshilfen*. Betriebswirtschaft. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag. 2011. 78 S. ISBN: 978-3-8163-0617-7.

Böge 2011

BÖGE, A.: *Handbuch Maschinenbau; Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*; 20. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. 2011. 1485 S. ISBN: 978-3-8348-1025-0.

Bogner 2015

BOGNER, P.: *RobInspect Die neue Art zu messen - Das Messsystem der Zukunft*. Hrsg. von MINIKOMP BOGNER GMBH. URL: https://www.minikomp.de/assets/robinspect_2013_02_19_b_final.pdf (besucht am 28.03.2017).

Bonnet 2008

BONNET, M.: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung; Eigenschaften, Verarbeitung und Praxiseinsatz polymerer Werkstoffe*. 1. Auflage. Studium Technik. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2008. 230 S. ISBN: 978-3-8348-0349-8.

Borchert et al. 2016

BORCHERT, G.; A. RAATZ: A new method for combining handling systems with passive orientation devices. In: *Annals - Manufacturing Technology*. Hrsg. von CIRP THE INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING. Bd. 65. 2016, S. 49–52.

Börcsök 2004

BÖRCSÖK, J.: *Elektronische Sicherheitssysteme; Hardwarekonzepte, Modelle und Berechnung*. Heidelberg: Hüthig GmbH & Co. KG. 2004. 687 S. ISBN: 3-7785-2939-0.

Braess et al. 2013

BRAESS, H.-H.; U. SEIFFERT, Hrsg. (2013): *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. aktualisierte Auflage. ATZ-MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. 1264 S. ISBN: 978-3-658-01690-6.

Brecher 2012

BRECHER, C., Hrsg. (2012): *Megatrends und Ihre Auswirkungen auf die Produktionstechnik; Abschlussbericht*. Aachen: Apprimus. 2012. 85 S. ISBN: 978-3863590666.

Brecher et al. 2011

BRECHER, C.; M. EMONTS: Automatisierte Handhabung für die FVK-Großserienproduktion; Herausforderung und Beispiele für die Entwicklung neuer Greifertechnologien. In: *SAMPE Europe technical conference*. Hrsg. von M. A. ERATH. Riehen. 2011, S. 1–28. ISBN: 978-3-9523565-4-8.

Breuninger et al. 2012

BREUNINGER, J.; R. BECKER; A. WOLF; S. ROMMEL; A. VERL: *Generative Fertigung mit Kunststoffen; Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. 1. Auflage. Berlin: Springer. 2012. 257 S. ISBN: 978-3-6422-4325-7.

Brüggemann et al. 2012

BRÜGGEMANN, H.; P. BREMER: *Grundlagen Qualitätsmanagement; Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 2012. 275 S. ISBN: 978-3-8348-1309-1.

Brumbi 2003

BRUMBI, D.: *Qualitätssicherung in der Produktion*. Hrsg. von GEOCITIES. Fachhochschule Deggendorf. URL: http://www.oocities.org/de/brumbi_de/Qs.pdf (besucht am 28.03.2017).

Brunner et al. 2013

BRUNNER, F. J.; K. WÄLDER; O. WÄLDER: *Statistische Methoden der Qualitätssicherung; Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 2013. 199 S. ISBN: 978-3446432178.

BUDZIER & GERLACH 2011

BUDZIER, H.; G. GERLACH: Thermische Infrarot-Sensoren für die Thermographie - Stand und Tendenzen. Hrsg. von TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN; LEIBNIZ INSTITUT. Version 12 S. Dresden.

Bulavinov et al. 2008

BULAVINOV, A.; R. HANKE; J. HEGEMANN; M. KRÖNING; R. OSTER; S. PUDOVIKOV; K. M. REDDY; R. S. VENKAT: Application of Sampling Phased Array Technique for Ultrasonic Inspection of CFRP Components. In: *International Symposium on NDT in Aerospace*. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V. 1. Aufl. Berlin. 2008, S. 21–38.

Carr et al. 2003

CARR, C.; D. GRAHAM; J. MACFARLANE; G. DONALDSON: SQUID-based non-

destructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13. Jahrgang (2003) (2), S.196–S.199. ISSN: 1051-8223.

Cherif 2011

CHERIF, C., Hrsg. (2011): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau; Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin: Springer. 2011. 727 S. ISBN: 978-3-642-17991-4.

Czichos 2008

CZICHOS, H.: *Mechatronik; Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. 2008. 276 S. ISBN: 978-3-8348-0373-3.

Czichos et al. 2012

CZICHOS, H.; M. HENNECKE: *HÜTTE - Das Ingenieurwissen*. 34. aktualisierte Auflage. SpringerLink: Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. 2013 S. ISBN: 978-3-642-22849-0.

Delorme et al. 2012

DELORME, S.; J. DEBUS; K.-V. JENDERKA: *Sonografie*. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Duale Reihe. Stuttgart: Thieme. 2012. 385 S. ISBN: 978-3-13-136953-6.

DIN 2008e

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Hrsg. (2008): *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*. DIN EN ISO.

Dietrich et al. 2013

DIETRICH, F.; C. LÖCHTE; A. RAATZ: „Vorrichtung zum Halten und/oder Verformen eines Objektes sowie Verfahren zum Verformen eines Objektes“. DE102012003094 A1 (Deutschland).

Dietrich et al. 2015

DIETRICH; RADECK: *Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7*. 1. Auflage. München: Hanser. 2015. 128 S. ISBN: 978-3446443327.

Dietrich et al. 2014

DIETRICH; A. SCHULZE: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. 7. aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 2014. 765 S. ISBN: 978-3-446-44055-5.

Dietz 2016

DIETZ, R.: *Datenblatt Kapazitive Näherungssensoren*. Dietz Sensortechnik. URL: www.worldofsensors.com (besucht am 28. 03. 2017).

DIN 1995

DIN 1319-1, Hrsg. (1995): Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 1998c

DIN 19233, Hrsg. (1998): Prozessautomatisierung Automatisierung mit Prozessrechensystemen Begriffe. Deutsches Institut für Normung. Frankfurt am Main: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2002

DIN 2740, Hrsg. (2002): Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik - Führungsgetriebe. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 1993

DIN 40050, Hrsg. (1993): IP-Schutzarten. Deutsche Norm. Version 2. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 1983

DIN 66001, Hrsg. (1983): Informationsverarbeitung - Sinnbilder und ihre Anwendung. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2009

DIN 69901-1, Hrsg. (2009): Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1: Grundlagen. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2003d

DIN 8580, Hrsg. (2003): Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung; Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2003

DIN 8593-1, Hrsg. (2003): Fertigungsverfahren Fügen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2008B

DIN EN 473, Hrsg. (2008): Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und

Literatur

Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung. Deutsche Norm. Version 2. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2008A

DIN EN ISO 13849-1, Hrsg. (2008): Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1. Deutsche Norm. Version 2. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2013

DIN EN ISO 13849-2, Hrsg. (2013): Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2. Deutsche Norm. Version 3. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2005

DIN EN ISO 9000, Hrsg. (2005): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 2004

DIN ISO 16269, Hrsg. (2004): Statistische Auswertung von Daten - Tests auf Abweichung von der Normalverteilung. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Drechsler 2010

DRECHSLER, K.: CFK - Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann. CCEv Automotive Symposium, Neckarsulm: Carbon Composites e.V.

Drechsler 2010

DRECHSLER, K.: Übung Faser-, Matrix- und Verbundwerkstoffe und ihre Eigenschaften. Unter Mitarb. von E. LADSTÄTTER. München: Lehrstuhl für Carbon Composites.

Drechsler 2010

DRECHSLER, K.: Vorlesung Einführung in Werkstoffe und Fertigungstechnologien. Unter Mitarb. von E. LADSTÄTTER. München: Lehrstuhl für Carbon Composites.

DRECHSLER et al. 2011

DRECHSLER, K.; C. EHINGER; M. JELINEK; C. FISCHBACH: Forschungsprojekt Forcim3a; CFK/Metall-Mischbauweisen im Maschinen- & Anlagenbau - Antrag

und Zwischenbericht. Hrsg. von BAYERISCHE FORSCHUNGSALLIANZ. Version 204 S. Augsburg.

Dröder et al. 2016

DRÖDER, K.; F. DIETRICH; C. LÖCHTE; J. HESSELBACH: Model based design of process-specific handling tools for workpieces with many variants in shape and material. In: *Annals - Manufacturing Technology*. Hrsg. von CIRP THE INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING. Bd. 65. 2016, S. 53–56.

Duffe 2011

DUFFE, A.: Serienfertigung von Composites - Fertigungsintegrierte Messtechnik zur Automatisierung und Qualitätssicherung. Technikforum Produktion 2020: Einsatz, Verarbeitung und Prüfung von Leichtbau- und Faserverbundwerkstoffen, Nördlingen: Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen.

Duffner et al. 2013

DUFFNER, E.; C. GREGOR; J. BOHSE; G. MAIR: Schallemissionsprüfung für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung Druckbehälter. *Lightweight Design* 6. Jahrgang (2013), S.39–S.43.

Durst 2011

DURST, K.: Vorsprung durch Technik - die Audi-Leichtbaustrategie. Technikforum Produktion 2020: Einsatz, Verarbeitung und Prüfung von Leichtbau- und Faserverbundwerkstoffen, Nördlingen, 2011: Audi AG.

Eckstein et al. 2014

ECKSTEIN, L.; I. OLSCHESKI; C.-S. ERNST: CO₂-Emissionsreduktion bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020; Abschlussbericht 123320; hrsg. von RWTH AACHEN, INSTITUT FÜR KRAFTFAHRZEUGE. Version Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Aachen.

Ehinger 2013

EHINGER, C.: *Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen*. Bd. 268. Forschungsberichte IWB; Dissertation. München: Herbert Utz Verlag. 2013. 209 S. ISBN: 978-3-8316-4233-5.

Ehinger & Reinhart 2014

EHINGER, C.; G. REINHART: Robot-based automation system for the flexible preforming of single-layer cut-outs in composite industry. In: *Production Engineering - Assembly*. Bd. 8. Springer. 2014, S. 1–7.

Literatur

Ehinger et al. 2010

EHINGER, C.; G. STRASSER; G. REINHART: Automatisierte Verarbeitung von trockenen CF-Textilien. *Ingenieurspiegel* (2010) (1), S.46–S.47.

Ehrenstein 2006

EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe; Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. 2. vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser. 2006. 297 S. ISBN: 3-446-22716-4.

Ehrlenspiel et al. 2005

EHRENSPIEL, K.; A. KIEWERT; U. LINDEMANN: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren; Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 5. bearbeitete Auflage. VDI. Berlin: Springer Vieweg. 2005. 570 S. ISBN: 978-3-540-25165-1.

Ehrlenspiel et al. 2014

EHRENSPIEL, K.; A. KIEWERT; U. LINDEMANN; M. MÖRTL: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren; Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. bearbeitete Auflage. VDI. Berlin: Springer Vieweg. 2014. 593 S. ISBN: 978-3-642-41959-1.

Ehrlenspiel & Meerkam

EHRENSPIEL; H. MEERKAMM: *Integrierte Produktentwicklung; Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. 2013. 826 S. ISBN: 978-3446435483.

VDI 2013

EICKENBUSCH, H.; O. KRAUSS: *VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3 - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien*. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. 2013. 54 S. URL: http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf (besucht am 29.03.2017).

Emonts et al. 2012

EMONTS, M.; S. KRAUSE: *Elektrostatischer Greifer automatisiert die Handhabung von Kohlenstofffaser-Gewebe*. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Aachen. 2012. URL: www.maschinenmarkt.vogel.de (besucht am 28.03.2017).

Erath 2008

ERATH, M. A., Hrsg. (2008): *CFRP: the cost down solution for top performance*;

SETEC; SAMPE Europe technical conference and table-top exhibition; Riehen. 2008. 195 S. ISBN: 978-3-9522677-8-3.

Erath 2011

ERATH, M. A., Hrsg. (2011): *SAMPE Europe technical conference*. Riehen. 2011. 560 S. ISBN: 978-3-9523565-4-8.

Fantoni et al. 2014

FANTONI, G.; S. CAPIFERRI; J. TILLI: Method for supporting the selection of robot grippers. In: *24th CIRP Design Conference*. Hrsg. von CIRP. 2014, S. 330–335.

Feher et al. 2006

FEHER, L.; M. THUMM: Industrial CFRP large part fabrication with the innovative hephaistos-CA2 microwave processing system. 33rd IEEE International Conference on Plasma Science, Piscataway, USA: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.

Fischer 1997

FISCHER, R.: Entwicklung von Greif- und Spannvorrichtungen für die automatisierte Montage von Mikrobauteilen. Lehrstuhl für Produktionsautomatisierung. Dissertation. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern. 1997-09-01. 74 S.

Fleischer 2014

FLEISCHER, J.: *Intelligenter Greifer zur Handhabung textiler Halbzeuge aus Kohlenstofffaser*. J. Schmalz GmbH. (Besucht am 06. 11. 2014).

Fleischer 2015

FLEISCHER, J.: Vorlesung Automatisierte Produktionsanlagen. Karlsruhe: Institut für Produktionstechnik.

Flemming et al. 1999

FLEMMING, M.; G. ZIEGMANN; S. ROTH: *Faserverbundbauweisen; Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag. 1999. 385 S. ISBN: 3-540-61659-4.

Forberich et al. 2013

FORBERICH, B.; M. REGNET: Automatisiertes Legen von faserverstärkten Thermoplasten in der Luft- und Raumfahrt. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 5. 2. Augsburg. 2013, S. 1–13.

Franke et al. 2006

FRANKE, W.; W. DANGELMAIER: *RFID-Leitfaden für die Logistik; Anwendungsgebiete, Einsatzmöglichkeiten, Integration, Praxisbeispiele*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler. 2006. 320 S. ISBN: 3-8349-0303-5.

Frauenhofer et al. 2007

FRAUENHOFER, M.; K. DILGER; S. BÖHM; T. STROEHLEIN: Potentiale des induktiven Preformens. ifs-Kolloquium 2007, Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt & TU Braunschweig.

Friedrich 2013

FRIEDRICH, H. E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2013. 836 S. ISBN: 978-3-8348-1467-8.

Geiger et al. 2008

GEIGER, W.; W. KOTTE: *Handbuch Qualität; Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. 5. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Praxis und Studium. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2008. 596 S. ISBN: 978-3-8348-0273-6.

Gerngross 2013

GERNGROSS, T.: Endeffektoren zur Automatisierten Produktion - Wissen für Morgen. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 3. 2. Augsburg. 2013, S. 1–31.

Gevatter 2006

GEVATTER, H.-J., Hrsg. (2006): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. 2. Aufl. Berlin: Springer. 2006. 854 S. ISBN: 3-540-21207-8.

Giliard et al. 2013

GILIARD, P.; J. GRAF; M. JELINEK; G. REINHART: Effiziente Herstellung von Faserverbundbauteilen durch Automation. In: *Internationales Forum Mechatronik*. Hrsg. von CLUSTER MECHATRONIK & AUTOMATION E.V. Bd. 1. Winterthur. 2013, S. 1–18.

Gillespie 2006

GILLESPIE, J.: Posterbook - Center for Composite Materials. University of Delaware - International Recognizes Excellence, Delaware.

Göttinger et al. 2009

GÖTTINGER, M.; C. WEIMER; A. MIENE: Inline-Prozesskontrolle in der CFK-

Fertigung. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT - LILIENTHAL-OBERTH E.V. Bd. 1. Bonn: Druckerei Thierbach. 2009, S. 1–7.

Götze 2008

GÖTZE, U.: *Investitionsrechnung; Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 6. aktualisierte Auflage. Berlin: Springer-Verlag. 2008. 519 S. ISBN: 978-3-540-78872-0.

Graf et al. 2016

GRAF, J.; K. GRUBER; Y. SHEN; G. REINHART: An Approach for the Sensory Integration into the Automated Production of Carbon Fiber Reinforced Plastics. In: *The Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. Hrsg. von S. NEWMAN; A. NASSEHI. Bd. 52. 52. Bath. 2016, S. 280–287.

Graf & Reinhart 2014

GRAF, J.; G. REINHART: Entwicklung kosteneffizienter Prozessketten zur Fertigung thermoplastischer Faserverbundbauteile. In: *Konferenz für industrialisierte Composite Produktion*. Hrsg. von MAI CARBON. München: AUTOMATICA. 2014.

Graf et al. 2013

GRAF, J.; G. REINHART; C. EHINGER; P. GILIARD: The challenge of preforming and handling for high volumes. In: *Technical Conference*. Hrsg. von SOCIETY FOR THE ADVANCEMENT OF MATERIAL AND PROCESS ENGINEERING. Zürich. 2013.

Graf et al. 2014

GRAF, J.; P. STICH; G. REINHART: CFK-Handlung leicht gemacht - Möglichkeiten und Grenzen der automatisierten Handhabung. *Ingenieurspiegel* (2014) (3),

Graf et al. 2014

GRAF, J.; M. VOIT; S. DIETRICH; G. REINHART: Effiziente Fertigung von Faserverbundbauteilen. *wt Werkstatttechnik online* 104. Jahrgang (2014) (9), S.517–S.521.

Greb et al. 2011

GREB, C. W.; A. SCHNABEL; M. LINKE; T. GRIES: Neuartige Technologien und Prozessketten für die Großserienfertigung textiler Preforms. 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland, Aachen: Institut für Textiltechnik.

Literatur

GRIES & SCHOUTEN 2006

GRIES; M. SCHOUTEN: Textile Preformtechnologien für Faserverbundwerkstoffe. Hrsg. von INSTITUT FÜR TEXTILTECHNIK; RWTH AACHEN. Aachen.

Grindling 2006

GRINDLING, J.: Simulation zur Verarbeitung von reaktiven Non-Post-Cure-Epoxidharz-Systemen im Druckgelieren und konventionellen Vergiessen. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn. 2006-01-01. 185 S.

Grossmann 2010

GROSSMANN, K., Hrsg. (2010): *Effektive Fertigungsprozesse für endkonturnahe Thermoplastverbundbauteile*. Kolloquium an der TU Dresden. Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik. Dresden. 2010. 79 S.

Grote et al. 2007

GROTE, K.-H.; J. FELDHUSEN: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Dubbel. Berlin: Springer-Verlag. 2007. 2015 S. ISBN: 978-3-540-49714-1.

Grundmann 2006

GRUNDMANN: Ökonomische Produktion von faserverstärkten Kunststoffteilen durch automatische Produktion von textilen Preforms. Aachen: Institut für Textiltechnik.

Grundmann 2009

GRUNDMANN: *Automatisiertes Preforming für schalenförmige komplexe Faserverbundbauteile*. 1. Auflage. Dissertation. Aachen: Shaker Media Verlag. 2009. 158 S. ISBN: 978-3-8322-8381-0.

Grunwald 2002

GRUNWALD, S.: *Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung*. Bd. 159. Forschungsberichte IWB; Dissertation. München: Herbert Utz Verlag. 2002. 206 S. ISBN: 3831600953.

Gubernatis et al. 2012

GUBERNATIS, S.; J.-M. BALVERS; C. WEIMER: Concept Development for Inline Process Control of the Preform-LCM Production Chain. In: *International Symposium on NDT in Aerospace*. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V. 4. Aufl. Bd. 1. Berlin. 2012, S. 1–7.

Gutbrod et al. 2015

GUTBROD, M.; G. KÖGEL: *Carbon serienmäßig im neuen BMW 7er*. Hrsg. von GIESEL VERLAG GMBH. K-Zeitung Online. URL: <http://www.k-zeitung.de/carbon-serienmaessig-im-neuen-bmw-7er/150/1200/87121/> (besucht am 28.03.2017).

Harper 2006

HARPER, L. T.: *Discontinuous carbon fibre composites for automotive applications*. Faculty of Engineering. Dissertation. Nottingham: University of Nottingham. 2006-01-01. 348 S.

Harter et al. 2006

HARTER, L.; K. STEYERL: „Flächensauggreifer“. DE102006050970 (Deutschland). J. S. GMBH.

Hassan et al. 2014

HASSAN, A.; M. ABMOHARAM: *Design of a single DOF gripper based on four-bar and slider-crank mechanism for educational purposes*. In: *24th CIRP Design Conference Mass Customization and Personalization*. Hrsg. von G. MORONI; T. TOLIO. Bd. 21. 21. Mailand. 2014, S. 379–384.

HENNING et al. 2008

HENNING, K.; T. GRIES; P. FLACHSKAMPF; A. HEIDE; H. SCHULZ: *Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms*. Hrsg. von INSTITUT FÜR UNTERNEHMENSKYBERNETIK E.V. Version 32. Aachener Textiltagung; 24.11.2005; 208 S. Aachen.

Hering 2012

HERING, E.: *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer*. 2. Aufl. 2012. VDI-Buch. Berlin: Springer-Verlag. 2012. 578 S. ISBN: 978-3-642-12881-3.

Hering 2012

HERING, E., Hrsg. (2012b): *Sensoren in Wissenschaft und Technik; Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 2012. 706 S. ISBN: 978-3-8348-0169-2.

Herrmann 2011

HERRMANN, A.: *Ist die CFK-Technologie des Flugzeugbaus auf andere Branchen übertragbar? Unter Mitarb. von COMPOSITE TECHNOLOGY CENTER STADE GMBH*. Stade: Composite Technology Center Stade GmbH.

Literatur

Hesse 2006

HESSE: *Grundlagen der Handhabungstechnik*; München: Hanser, Carl. 2006. 346 S. ISBN: 3-446-40473-2.

Hesse 2011

HESSE: *Greifertechnik; Effektoren für Roboter und Automaten*. München: Hanser, Carl. 2011. 300 S. ISBN: 978-3-446-42422-7.

Hesse 1991

HESSE, S.: *Greifer-Praxis; Greifer in der Handhabungstechnik*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. 1991. 256 S. ISBN: 3-8023-0476-4.

Hesse et al. 2004

HESSE; MONKMAN; R. STEINMANN; H. SCHUNK: *Roboter greifer: Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greifertechnik*; München: Hanser, Carl. 2004. 436 S. ISBN: 3-446-22920-5.

Hesse et al. 2011

HESSE; SCHNELL: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation; Funktion - Ausführung - Anwendung*; 5. korrigierte und verbesserte Auflage. Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2011. 432 S. ISBN: 978-3-8348-0895-0.

Heuer et al. 2015

HEUER, H.; M. SCHULZE; M. POOCH: Review on quality assurance along the CFRP value chain e Nondestructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques. In: *Composites Part B: Engineering*. Hrsg. von D. HUI; L. FEO. Bd. 77. 77. New Orleans. 2015, S. 494–501.

HEUSS et al. 2012

HEUSS, R.; N. MÜLLER; W. VAN SINTERN; A. STARKE; A. TSCHIESNER: *Lightweight, heavy impact; How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive*. Hrsg. von MCKINSEY & COMPANY. Version Advanced Industries. New York.

Hindersmann et al. 2012

HINDERSMANN, A.; W. EXNER; N. LIEBERS; M. OPITZ; S. TORSTICK; H. UCAN: Forschungsplattform für endkonturnahe Faserverbundbauteile im automatisierten Fertigungsprozess. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT - LILIENTHAL-OBERTH E.V. 1. Aufl. Berlin. 2012, S. 1–10.

Hinsch et al. 2013

HINSCH, M.; J. OLTHOFF, Hrsg. (2013): *Impulsgeber Luftfahrt; Industrial leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte*. Hamburg: Springer. 2013. 347 S. ISBN: 978-3-642-32668-4.

Hirzinger 2011

HIRZINGER, G.: "Soft Robotics" - Neue Formen robotischer Interaktion mit Umwelt und Menschen. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 3. 1. Augsburg, 2011.

Hoffmeister 2008

HOFFMEISTER, W.: *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse; Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen*. 2. überarbeitete Auflage. Stuttgart: Berliner Wissenschafts-Verlag GmbH. 2008. 336 S. ISBN: 3-17-016353-1.

HOROSCHENKOFF et al. 2006

HOROSCHENKOFF, A.; S. KLEIN; K.-H. HAASE: *Strukturintegration von Dehnungsmessstreifen*. Hrsg. von HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. Darmstadt.

Huber et al. 2009

HUBER, O.; M. BICKER, Hrsg. (2009): *Leichtbau - eine Schlüsseltechnologie für Material-, Energieeffizienz und Klimaschutz*; 4. Landshuter Leichtbau-Colloquium. (Landshut). Mönchengladbach: LC-Verlag. 2009. 278 S. ISBN: 978-3-9812696-0-4.

Hufenbach 2007

HUFENBACH, W., Hrsg. (2007): *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*. Dresden: Progress-media Verlag. 2007. 501 S. ISBN: 978-3-00-022109-5.

Ilschner et al. 2005

ILSCHNER, B.; R. F. SINGER: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik; Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*; 4. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer. 2005. 436 S. ISBN: 3-540-21872-6.

Janschek 2010

JANSCHKE, K.: *Systementwurf mechatronischer Systeme; Methoden - Modelle - Konzepte*. Berlin: Springer-Verlag. 2010. 853 S. ISBN: 978-3-540-78877-5.

Kalafat et al. 2015

KALAFAT, S.; A.-M. ZELENYAK; M. SAUSE: *In-Situ Monitoring of Composite*

Failure by Computing Tomography and Accoustic Emission. In: *International Conference on Composite Materials*. Hrsg. von O. T. THOMSEN; C. BERGGREEN; B. SORENSEN; J. LENG. 1. Aufl. 20. Dänemark. 2015.

Karbhari et al. 2005

KARBHARI, V. M.; H. KAISER; R. NAVADA; G. KUMAR; L. LEE: *Methods for detecting defects in composite rehabilitated concrete structures; Final Report*. Research Group. Salem, OR: Oregon Department of Transportation, 2005. 426 S.

Kessel et al. 2012

KESSEL, S.; D. FRÖHLING: *Technische Mechanik - Engineering Mechanics; Zweisprachiges Lehrbuch zu Grundlagen der Mechanik fester Körper - Bilingual Textbook on the Fundamentals of Solid Mechanics*. 2. überarbeitet Auflage 2012. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag. 2012. 256 S. ISBN: 978-3-8348-2182-9.

Kessler et al. 2002

KESSLER, S.; M. SPEARING; C. SOUTIS: Damage detection in composite materials using lamb wave methods. *Smart Materials and Structures* 11. Jahrgang (2002) (2), S.269–S.278. ISSN: 0964-1726.

Kleppmann 2013

KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung; Produkte und Prozesse optimieren*. 8. Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, Carl. 2013. 352 S. ISBN: 978-3-446-43752-4.

Kletti 2006

KLETTI, J.: *MES – Manufacturing Execution System; Moderne informationstechnologie zur prozessfähigkeit der wertschopfung*. Berlin: Springer. 2006. 264 S. ISBN: 978-3-540-28010-1.

Kochan 2012

KOCHAN, A.: *Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau*. Berichte aus der Kunststofftechnik; Dissertation. Aachen: Shaker Media Verlag. 2012. 148 S. ISBN: 978-3-8440-0820-3.

Köhler et al. 2011

KÖHLER, K.; H. KUOLT: Prozesssichere Automation von CFK-Werkstoffen - Innovative Vakuum-Automatisierung. *Technikforum Produktion 2020: Einsatz, Verarbeitung und Prüfung von Leichtbau- und Faserverbundwerkstoffen*, Nördlingen.

Koll 2006

KOLL, L.: Vorlesung Faserverbundkonstruktion. Institut für Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Chemnitz. 2006.

Koller et al. 1994

KOLLER, R.; N. KASTRUP: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin & New York: Springer-Verlag. 1994. 476 S. ISBN: 3-540-58243-6.

Königsreuther 2013

KÖNIGSREUTHER, P.: *Prüfungen an Faserverbundstoffen werden optimiert - Werkstoffprüfung*. Hrsg. von M. BAUER; F. FISCHER; G. SCHÜRGER. Vogel Business Media GmbH & Co.KG. URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/pruefungen-an-faserverbundwerkstoffen-werden-optimiert-a-411102/> (besucht am 28.03.2017).

KRAUSS et al. 2015

KRAUSS; M. KÜHNEL; E. WITTEN: *Composite-Marktbericht 2015; Marktentwicklungen, Ausblicke und Herausforderungen*. Hrsg. von CARBON COMPOSITES E.V.; INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE. Augsburg.

Kuhl et al. 2013

KUHL, M.; T. WIENER; M. KRAUSS: *Multisensorial self-learning systems for quality monitoring of carbon fiber composites in aircraft production*. In: *8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Hrsg. von CIRP. Ischia. 2013, S. 103–108.

KUKA 2013

KUKA: *Spezifikation KR QUANTEC ultra*. Augsburg: KUKA Roboter GmbH. 2013. 115 S.

Lange et al. 2012

LANGE, E.; H. STEIGER: *Qualitätssicherung rückt in die Produktion; Das Beispiel der Autobauer lehrt die Industrie*. Hrsg. von A. MÖRER-FUNK; M. KEFER. VDI Verlag GmbH. URL: <http://www.ingenieur.de/Themen/Produktion/Qualitaetssicherung-rueckt-in-Produktion> (besucht am 28.03.2017).

Langemann 1995

LANGEMANN, M.: *Hochdruck-Wasserstrahlschneiden von technischen Textilien*. *Technische Textilien* 38. Jahrgang (1995), S.210.

Literatur

Lanza et al. 2012

LANZA, G.; D. BRABANT: Messtechnik für die FVK-Qualitätssicherung; Beschädigungen an Faserverbundkunststoffen mithilfe geeigneter Inline-Messtechnik vermeiden. *wt Werkstatttechnik online* 102. Jahrgang (2012) (11/12), S.783–S.788.

LÄSSIG et al. 2012

LÄSSIG, R.; M. EISENHUT; A. MATHIAS; R. SCHULTE; F. PETERS; T. KÜHMANN; T. WALDMANN; W. BEGEMANN: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen; Perspektiven für den deutschen Maschinen und Anlagenbau. Hrsg. von VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU; ROLAND BERGER GMBH. München.

Lemme 1990

LEMME, H.: *Sensoren in der Praxis; Daten, Applikationen und Bezugsquellen*. Elektronik. München: Franzis-Verlag. 1990. 423 S. ISBN: 9783772361821.

Leohold 2011

LEOHOLD, J.: Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil. CCEv Automotive Forum 2011, Ingolstadt: Volkswagen AG.

LINDEMANN 2009

LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte; Checklisten zur systematischen Produktentwicklung und Konstruktion. Hrsg. von SPRINGER-VDI-VERLAG GMBH & CO. KG. Version 341 S. Berlin & Heidelberg.

Lindemann et al. 2015

LINDEMANN, U.; VOGEL; H. BAIER: Vorlesung Modellbildung und Simulation. Garching: Lehrstuhl für Produktentwicklung.

Maeva et al. 2011

MAEVA, E.; I. SEVERINA; H. WEHBE; J. ERLEWEIN: Ultrasonic Imaging Techniques to Evaluate Quality of Fiber Reinforced Composite Materials and their Adhesive Joints. In: *5th Pan American Conference for NDT*. Hrsg. von INSTITUTO MEXICANO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. Bd. 1. Cancun. 2011, S. 1–7. ISBN: 978-968-9288-10-7.

Marcio 2005

MARCIO, J.: Quality Assurance. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

Mattmann et al. 2015

MATTMANN, I.; S. GRAMLICH; H. KLOBERDANZ: The Inscrutable Jungle of Quality Criteria - How to Formulate Requirements for a Successful Product Development. In: *CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation*. Hrsg. von M. SHPITALNI; A. FISCHER; G. MOLCHO. Bd. 36. 36. Haifa. 2015, S. 153–158.

Mehrer 2015

MEHRER, R.: *Greiferkomponenten für die Greifertechnik*. Hrsg. von FIPA GMBH. URL: http://www.fipa.com/de_DE/products/207452-greifertechnik/25/1 (besucht am 28.03.2017).

Meiners 2011

MEINERS, D.: *Beitrag zur Stabilität und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen*. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal. 2011. 203 S. ISBN: 978-3-942216-62-3.

Miene 2011

MIENE: Die digitale Bildanalyse zur Qualitätssicherung und Fehlerbewertung in der Prozesskette. Arbeitskreis des Fiber International Bremen: Faserinstitut Bremen e.V.

Miene 2009

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

Miene et al. 2007

MIENE, A.; M. GÖTTINGER: Digital Image Analysis for Quality Assurance in the Preforming and Draping Process. In: *5th CFK-Valley Stade Convention - The Expert Forum for Composite Lightweight Constructions*. Hrsg. von CFK-VALLEY STADE E.V. 1. Aufl. Bd. 1. Stade. 2007, S. 73–79. (Besucht am 03.09.2013).

Miene et al. 2011

MIENE; HEUMÜLLER; F. WEILAND; C. WEIMER: Quality Assurance System for aircraft structural Profile Preforms. In: *SAMPE Europe technical conference*. Hrsg. von M. A. ERATH. Bd. 4A. Riehen. 2011, S. 1–8. ISBN: 978-3-9523565-4-8.

Minch et al. 2014

MINCH, R.; K. MOONOOSAWMY; C.-H. SOLTERBECK; M. ES-SOUNI: The influence of processing conditions on the morphology and thermochromic properties of vanadium oxide films. In: *Thin Solid Films*. Hrsg. von J. E. GREENE. Bd. 556. Urbana, Illinois, USA. 2014, S. 274–284. (Besucht am 03.12.2015).

Literatur

Mitschang et al. 2014

MITSCHANG, P.; D. BECKER: Präzise Charakterisierung von Verstärkungsfasern. *Kunststoffe* (2014) (4), S.61–S.64.

MITTELHUBER & WINKLER 2002

MITTELHUBER, B.; R. WINKLER: Die wichtigsten Prinzipien von Lean Production & Lean Management. Hrsg. von MANAGEMENT CIRCLE AG. Eschborn.

Mosandl 2005

MOSANDL, T.: *Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme*. Bd. 189. Forschungsberichte IWB; Dissertation. München: Herbert Utz Verlag. 2005. 169 S. ISBN: 3-8316-0471-1.

Nedeljkovic 2014

NEDELJKOVIC, M.: Nachhaltige Schritte in das Zeitalter der Elektromobilität. In: *Münchener Kolloquium - Produktionskongress 2014*. Hrsg. von G. REINHART; M. ZÄH; W. VOLK. München: Bayern Innovativ GmbH. 2014, S. 337–347.

Neitzel et al. 2014

NEITZEL, M.; P. MITSCHANG; U. BREUER, Hrsg. (2014): *Handbuch Verbundwerkstoffe; Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Unter Mitarb. von M. NEITZEL. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser. 2014. 554 S. ISBN: 978-3-446-43696-1.

Niu 2010

NIU, C.: *Composite airframe structures; Practical design information and data*. 3. Auflage. Hong Kong: Conmilit Press. 2010. 1 online resource (xxvi, 688). ISBN: 978-1-61344-656-0.

Nufer 2013

NUFER, D.: Investitionen und Qualitätskultur; Hightech-Standort braucht Hightech-Qualitätssicherungssysteme. *QZ-online - Portal für Qualitätsmanagement* 58. Jahrgang (2013) (9), S.18–S.19.

Oblinger et al. 2016

OBLINGER, C.; M. JELINEK; H. LANG; A. BAETEN; K. DRECHSLER; G. REINHART: Development, Manufacturing and Testing of a CFRP Bellows Coupling for Powertrain Applications. In: *Euro Hybrid Materials and Structures*. Hrsg. von J. M. HAUSMANN; M. SIEBERT. Kaiserslautern. 2016.

Oldani 2010

OLDANI, T.: „Visual Fiber Placement Inspection“. US 2011/0017381 A1. T. OLDANI.

Orth 2008

ORTH, A.: *Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen*. Dissertation. Aachen: Shaker Media Verlag. 2008. 173 S. ISBN: 978-3-8322-6983-8.

Pahl et al. 2006

PAHL, G.; W. BEITZ; U. FELDHAUS; K.-H. GROTE: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Auflage. Berlin: Springer. 2006. 764 S. ISBN: 3-540-34060-2.

Pantelis et al. 2010

PANTELIS, N.; M.-P. TOITGANS; J. L. ATOUTVEILLE; E. B. SYNTHESITES: Automatic process monitoring and control for composite production. *JEC Composites Magazine* 57. Jahrgang (2010), S.32–S.34.

Passreiter 2013

PASSREITER, T.: Project i.; Die Antwort der BMW Group auf die zukünftigen Herausforderungen nachhaltiger und individueller Mobilität. In: *Fachtagung Carbon Composites*. Hrsg. von CARBON COMPOSITES E.V. Bd. 4. 3. Würzburg: Vogel Business Media. 2013, S. 1–43.

Petermann 2013

PETERMANN, J.: Automatisierungsbedarfe in der CFK-Produktion - Manufacturing Engineering. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 7. 2. Augsburg. 2013, S. 1–33.

Peters 1998

PETERS, S. T.: *Handbook of composites*. 2nd. Edition. Norwich, NY: Springer. 1998. 1127 S. ISBN: 978-1-4615-6389-1.

PLEGNIERE 2011

PLEGNIERE, H. G.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie; Prüfprozesseignung - Eignung von Messsystemen. Hrsg. von VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE. Version 2. vollständig überarbeitete Auflage, Band 5. Berlin.

Literatur

Poggensee 2011

POGGENSEE, K.: *Investitionsrechnung; Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*. 2. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2011. 416 S. ISBN: 978-3-8349-3014-9.

Ponn et al. 2011

PONN, J.; U. LINDEMANN: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. VDI-Buch. Berlin: Springer-Verlag. 2011. 471 S. ISBN: 978-3-642-20580-4.

Ragan 2007

RAGAN, Z.: *Eine rechnerintegrierte Methode zur Produktkonzeption*. German. Dissertation. Berlin: Fraunhofer IPK. 2007. 128 S.

Ramirez et al. 2014

RAMIREZ, J.; J. WOLLNACK: Flexible automated assembly systems for large CFRP-structures. In: *2nd International Conference on System-Integrated Intelligence; Challenges for Product and Production Engineering*. Bremen. 2014, S. 447–455.

Rauenbusch 2013

RAUENBUSCH, G.: Textile Preforms für den Composite-Leichtbau. In: *Fachtagung Carbon Composites*. Hrsg. von CARBON COMPOSITES E.V. Bd. 2. 3. Würzburg: Vogel Business Media. 2013, S. 1–18.

Rausch 2012

RAUSCH, J.: *Entwicklung und Anwendung miniaturisierter piezoresistiver Dehnungsmesselemente*. EMK-Dissertationsreihe. München: Verlag Dr. Hut. 2012. 229 S. ISBN: 978-3-8439-0553-4.

Reinhart et al. 2010

REINHART, G.; C. EHINGER: Highly flexible robot end effector for automated draping of dry carbon fiber textiles. In: *Improvement of materials and application characteristics*. Hrsg. von SEICO. Riehen. 2010, S. 468–475. ISBN: 978-3-9523565-0-0.

Reinhart 2011B

REINHART, G.; C. EHINGER; T. PHILIPP; J. SCHILP; Y. SHEN; R. SPILLNER; C. THIEMANN: Novel automation technologies for an efficient production of fibre reinforced plastics (FRP) structures at a glance. In: *SAMPE Europe technical conference*. Hrsg. von M. A. ERATH. Bd. 6A. Riehen. 2011, S. 1–8. ISBN: 978-3-9523565-4-8.

Reinhart et al. 2009

REINHART, G.; C. EHINGER; J. SCHARRER; G. STRASSER; J. SCHILP: Innovative Handhabungstechnik - Trends und zukünftige Entwicklungen. In: *Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben*. Hrsg. von G. REINHART. Bd. 93. Seminarberichte, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften 93. München: Utz. 2009. ISBN: 978-3-89675-093-8.

Reinhart et al. 2015

REINHART, G.; J. GRAF; U. MESSMANN: Sensoridentifikation zur fertigungsbegleitenden Qualitätssicherung bei der Handhabung technischer Textilien. *VDI-Z Integrierte Produktion* (2015) (4), S.75–S.77. ISSN: 0042-1766.

Reinhart et al. 2016

REINHART, G.; M. JELINEK; C. OBLINGER; A. BAETEN; K. DRECHSLER: Development, Manufacturing and Testing of a CFRP Metal Hybrid Gripper for Highly Dynamic Manipulation Processes. In: *Euro Hybrid Materials and Structures*. Hrsg. von J. M. HAUSMANN; M. SIEBERT. Kaiserslautern. 2016, S. 105–111.

Reinhart et al. 2015

REINHART, G.; M. JELINEK; C. SEIDEL: Thermographic Inspection of CFRP Metal Hybrid Components. In: *4th CIRP Global Web Conference*. Hrsg. von J. A. ERKONYUNCU. Cranfield. 2015.

Reinhart 2011A

REINHART, G.; J. SCHILP: Innovative Handhabungs- und Qualitätssicherungskonzept für die Automatisierung der Faserverbundfertigung. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 1. 1. Augsburg. 2011.

Reinhart et al. 2012

REINHART, G.; G. STRASSER: Flexible gripping technology for the automated handling of limp technical textiles in composites industry. In: *Future Trends in Production Engineering*. Hrsg. von G. SCHUH; R. NEUGEBAUER; E. UHLMANN. Berlin: Springer. 2011, S. 301–306. ISBN: 978-3-642-24490-2.

Reinhart et al. 2010

REINHART, G.; G. STRASSER; C. EHINGER: Highly flexible automated manufacturing of composite structures consisting of limp carbon fibre textiles. *SAE International Journal of Aerospace* 3. Jahrgang (2010) (1), S.181–S187.

Literatur

Reinhart et al. 2010

REINHART, G.; M. ZÄH, Hrsg. (2010): *Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen*. Augburg: Utz. 2010. ISBN: 978-3-89675-098-3.

Reinhart et al. 2012

REINHART, G.; A. GLÜCK; C. EHINGER: Automated Process Chain for the Manufacturing of Fiber Reinforced Plastics (FRP). In: *SAMPE Symposium on Automation of Advanced Composites and its Technology*. Hrsg. von M. A. ERATH. München. 2012, S. 1–6. ISBN: 978-1-6227626-6-8.

Reinhart et al. 2012

REINHART, G.; A. GLÜCK; C. EHINGER: Automated Process Chain for the Manufacturing of Fiber Reinforced Plastics (FRP). In: *2nd Symposium on Automation in Composite Technology*. Hrsg. von SOCIETY FOR THE ADVANCEMENT OF MATERIAL AND PROCESS ENGINEERING. München: AUTOMATICA. 2012.

Reuter 2014

REUTER, W.: CFK-Technologie im automobilen Leichtbau - die nächsten Herausforderungen. In: *Münchener Kolloquium - Produktionskongress 2014*. Hrsg. von G. REINHART; M. ZÄH; W. VOLK. München: Bayern Innovativ GmbH. 2014, S. 321–338.

Rheinfurth 2013

RHEINFURTH, M.: Geführte Ultraschallwellen zur Bewertung der Schadensakkumulation in Faser-Kunststoff-Verbunden. Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart. 2013. 153 S.

Ringen et al. 2014

RINGEN, G.; S. ASCHEHOUG; H. HOLTSKOG; J. INGVALDSEN: Integrating Quality and Lean into a Holistic Production System. In: *Conference on Manufacturing Systems*. Hrsg. von CIRP. Bd. 47. Windsor, Canada. 2014, S. 242–247.

Rose 2010

ROSE, T.: Vorlesung Sensortechnik 1 - Grundlagen und Anwendungen von Sensoren. Münster: Fachbereich Physikalische Technik.

Rudorfer 2001

RUDORFER, W.: *Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke*. Bd. 154. Forschungsberichte IWB; Dissertation. München: Herbert Utz Verlag. 2001. 191 S. ISBN: 3-8316-0037-6.

Ruhm 2010

RUHM, K. H.: Modul Sensoren der Schwingungsmesstechnik. Zürich: Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung.

Salzburger 2009

SALZBURGER, H.-J., Hrsg. (2009): *Erkennung und Elimination von Störsignalen bei der Ultraschallprüfung mit EMUS-Prüfköpfen*. 2009.

Schanz 1988

SCHANZ, G. W.: *Sensoren, Fühler der Messtechnik; Ein Handbuch der Messwertaufnahme für den Praktiker*. 2. erweiterte und aktualisierte Auflage. Heidelberg: Hüthig. 1988. 432 S. ISBN: 3-7785-1579-9.

Scheitle 2008

SCHEITLE, J. P.: Trends bei der Automatisierung der Fertigung von Faserverbundstrukturen für hochleistungsfähige Anwendungen. Donauwörth: Eurocopter Deutschland GmbH.

Schlemmer 1996

SCHLEMMER, H.: *Grundlagen der Sensorik; Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure*. 1. Auflage. Heidelberg: Wichmann. 1996. 562 S. ISBN: 3-87907-278-7.

Schmidt et al. 2013

SCHMIDT, T.; S. DUTTA: Produktionsintegrierte Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung - Wissen für Morgen. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 6. 2. Augsburg. 2013, S. 1–25.

Schmitt et al. 2010

SCHMITT, R.; C. MERSMANN: Kamera prüft Faserorientierung großer CFK-Strukturen. *VDI-Z Integrierte Produktion* (2010) (10), S.52–S.55. ISSN: 0042-1766.

Schmitt et al. 2014

SCHMITT, R.; A. WITTE; M. JANSSEN; F. BERTELSMEIER: Metrology assisted assembly of airplane structure elements. In: *5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. Hrsg. von CIRP. Dresden. 2014, S. 116–121.

Schmitt et al. 2008

SCHMITT; B. E. DAMM: Prüfen und Messen im Takt; Wie sie mit Inline-Messtechnik ihre Wertschöpfung maximieren. *QZ* 53 (2008) (9), S.57–S.59.

Literatur

Schmitt et al. 2008

SCHMITT; GRIES; A. HERRMANN; C. MERSMANN; A. ORTH; T. C. GRUNDMANN; A. MIENE: *Falcon - Fibre Automatic Live Control; Aufbau eines Inline-Prüfsystems zur automatisierten Konfektion faserverstärkter Kunststoffstrukturen; Schlussbericht des Verbundprojekts im Förderprogramms InnoNet von BMWi mit VDI/VDE-IT*. 96 S. Aachen: BMWI-Forschungsbericht. 2008.

Schmitt et al. 2010

SCHMITT; C. MERSMANN; B. E. DAMM: In-process 3D laser measurement to control the fiber tape-laying for composite production. *SPIE Proceedings* (2010), S.154–S.163.

Schmitt et al. 2009

SCHMITT; A. SCHÖNBERG; C. MERSMANN; B. E. DAMM: Messtechnik in der automatisierten FVK-Fertigung; Fähige Prozesse als Voraussetzung für eine wirtschaftliche FVK-Herstellung - Automatisierung, Fertigungsmesstechnik, Faserverbundwerkstoffe. *wt Werkstatttechnik online* 99 (2009) (3), S.157–S.161.

Schneider 1999

SCHNEIDER, B.: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation. München: TU München. 1999-05-01. 192 S.

SCHNEIDER et al. 2006

SCHNEIDER; A. MIENE; H. MÜLLER: Abschlussbericht für das Verbundprojekt PRO-CFK. Hrsg. von TIB LEIBNIZ-INFORMATIONSZENTRUM TECHNIK UND NATURWISSENSCHAFTEN UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK. Bremen.

Schnieder 1999

SCHNIEDER, E.: *Methoden der Automatisierung - muss noch geprüft werden; Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*; Studium Technik. Braunschweig & Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag. 1999. 362 S. ISBN: 978-3528065669.

Schnizer 2013

SCHNIZER, M.: Technologien für die Zukunft der Luftfahrt - Anforderungen und Lösungsansätze für einen höheren Automatisierungsgrad in der CFK-Fertigung. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 4. 2. Augsburg. 2013, S. 1–20.

Schorer et al. 2015

SCHORER, N.; M. SAUSE: Identification of Failure Mechanisms in CFRP Laminates using 3D Digital Image Correlation. In: *International Conference on Composite Materials*. Hrsg. von O. T. THOMSEN; C. BERGGREEN; B. SORENSEN; J. LENG. 1. Aufl. 20. Dänemark. 2015.

SCHRÖDER et al. 2011

SCHRÖDER, H.-W.; S. JESCHKE; R. SCHMITT; P. ABEL; U. REISGEN; E. SAAD: Forschungsbericht - Wirtschaftliche Serienfertigung textiler Preforms durch Umflechtverfahren mittels automatisiertem Handling und online Qualitätsüberwachung (AutoBraid). Hrsg. von RWTH AACHEN, FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN. Aachen.

Schürmann 2007

SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Auflage. VDI Buch. Berlin: Springer. 2007. 573 S. ISBN: 3-540-40283-7.

Schwake et al. 2014

SCHWAKE, K.; J. WULFSBERG: Robot-based system for handling of aircraft shell parts. In: *5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. Hrsg. von CIRP. Dresden. 2014, S. 104–109.

Seegräber 1993

SEEGRÄBER, L.: *Greifsysteme für Montage; Handhabung und Industrieroboter ; Grundlagen - Erfahrungen - Einsatzbeispiele*. Kontakt & Studium. Böblingen: Expert-Verlag. 1993. 151 S. ISBN: 3-8169-0943-4.

Shapiro et al. 1965

SHAPIRO, S.; M. WILK: *An Analysis of Variance Test for Normality (complete samples)*. Bd. 52. Biometrika Trust. Großbritannien: Oxford University Press. 1965. 22 S. URL: http://www.jstor.org/stable/2333709?seq=1#page_scan_tab_contents (besucht am 23.03.2017).

Siebenpfeiffer 2014

SIEBENPFEIFFER, W.: *Leichtbau-Technologien im Automobilbau; Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2014. 201 S. ISBN: 978-3-658-04024-6.

Söhnchen et al. 2016

SÖHNCHEN, R.; E. GUTTENBERGER: *Informationsbrochüre 2D Oberflächenprüfung*. Automation W+R GmbH. URL: <http://www.automationwr.de/de/>

Literatur

loesungen / oberflaechenpruefung / 2d - oberflaechenpruefung/
(besucht am 28.03.2017).

Spießberger 2011

SPIESSBERGER, C.: Aktive Thermografie für die Qualitätssicherung in der CFK-Produktion. In: *Fachtagung Carbon Composites*. Hrsg. von CARBON COMPOSITES E.V. Bd. 3. 1. Würzburg: Vogel Business Media. 2011, S. 1–26.

Stephan 2001

STEPHAN, J.: Beitrag zum Greifen von Textilien. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb. Dissertation. Berlin: TU Berlin. 2001-02-08. 148 S.

Strasser 2010

STRASSER, G.: Automatisierte Handhabung konturvarianter, textiler Halbzeuge für die Faserverbundproduktion. In: *Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen*. Hrsg. von G. REINHART; M. ZÄH. Bd. 98. Augsburg: Utz. 2010, S. 1–16. ISBN: 978-3-89675-098-3.

Straßer 2012

STRASSER, G.: *Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung*. Bd. 256 S. Forschungsberichte IWB; Dissertation. München: Herbert Utz Verlag. 2012. 245 S. ISBN: 978-3-8316-4161-1.

Szimmat 2007

SZIMMAT, F.: Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb. Dissertation. Berlin: TU Berlin. 2007. 194 S.

Terninko et al. 2010

TERNINKO, J.; A. ZUSMAN; B. ZLOTIN: *Systematic innovation - An introduction to TRIZ; (Theory of inventive problem solving)*. Boca Raton: CRC Press. 2010. xiii, 208. ISBN: 1-57444-111-6.

Thanner et al. 2010

THANNER, P.; W. PALFINGER: Qualitätssicherung von Carbonfaserteilen mittels Bildverarbeitung. In: *Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen*. Hrsg. von G. REINHART; M. ZÄH. Augsburg: Utz. 2010, S. 1–9. ISBN: 978-3-89675-098-3.

THEBEN et al. 2014

THEBEN, M.; I. SCHILL; H. STAMM; T. WOLF: Stahlmarkt 2014 - Stahl 2025: Quo

vadis? Stahlmarkt der Zukunft - Erfolgsstrategien im globalen Wettbewerb. Hrsg. von PRICEWATERHOUSECOOPERS AG. Frankfurt am Main.

Thumfart 2012

THUMFART, S.: Vision based Sensors enabling Automated Production of Composite Material. In: *SAMPE Symposium on Automation of Advanced Composites and its Technology*. Hrsg. von M. A. ERATH. München. 2012, S. 1–22. ISBN: 978-1-6227626-6-8.

Thumfart et al. 2013

THUMFART, S.; W. PALFINGER; M. STÖGER; C. EITZINGER: Accurate Fibre Orientation Measurement for Carbon Fibre Surfaces. In: *15th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. Hrsg. von R. WILSON; E. HANCOCK; A. BORS; W. SMITH. Bd. 1. Berlin: Springer. 2013, S. 75–82. ISBN: 978-3-642-40246-3.

Tilli et al. 2014

TILLI, J.; A. BRANDO; G. FANTONI: Gripping device for heavy and deformable materials handling: concept, design, selection and test. In: *24th CIRP Design Conference*. Hrsg. von CIRP. 2014, S. 373–378.

Timm 2010

TIMM, H.: Wo liegt der Bedarf für CFK im Automobilbau? Audi Leichtbaukompetenz, Neckarsulm: Audi AG.

Torstrick et al. 2011

TORSTRICK, S.; M. MEYER; M. WIEDEMANN: Endkonturnahe Fertigung von CFK-Bauteilen in hoher Stückzahl - Ziele des Technologieprojekts EVO in Stade. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 2. 1. Augsburg. 2011.

Tränkler et al. 1998

TRÄNKLER, H.-R.; E. OBERMEIER: *Sensortechnik; Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 1. Auflage. Berlin: Springer-Verlag. 1998. 1584 S. ISBN: 9-7835-4058-640-1.

Trejo 2005

TREJO, D.: *Preliminary quality control/quality assurance standards (criteria) for inspection and testing of FRP bars*. Bd. 9-1520-P1. College Station & Texas: Texas A & M University System. 2005. 15 S.

Literatur

Ullmann et al. 2010

ULLMANN, T.; T. SCHMIDT; S. HOFMANN; R. JEMMALI: International Symposium on NDT in Aerospace. DGZfP-Proceedings, Hamburg.

VDI 1983

VDI: *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung; Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. 3. Auflage des VDI-Taschenbuches T 77. Bd. 77. VDI-Taschenbücher. Düsseldorf: VDI-Verlag. 1983. 204 S. ISBN: 3-18-400605-0.

VDI 1989

VDI 2014-1, Hrsg. (1989): Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Grundlagen. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 1993b

VDI 2014-2, Hrsg. (1993): Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Konzeption und Gestaltung. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 2007

VDI 2180, Hrsg. (2007): Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit den Mitteln der Prozessleittechnik. VDI/VDE. Version 2. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 2004

VDI 2206, Hrsg. (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 1970

VDI 2411, Hrsg. (1970): Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI Verlag.

VDI 1995

VDI 2740-1, Hrsg. (1995): Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik - Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 2002

VDI 2740-2, Hrsg. (2002): Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik - Führungsgetriebe. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 1990

VDI 2860, Hrsg. (1990): Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen; Symbole. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 2011

VDI 3423, Hrsg. (2011): Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDMA 2009

VDMA 66412-1, Hrsg. (2009): Manufacturing Execution Systems (MES) - Kennzahlen. VDMA-Einheitsblatt. Version 1. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

VDI 1997

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Hrsg. (1997): Konstruktionsmethodik; Methodisches Entwickeln von Lösungskonzepten. VDI. Version 1. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.

Voit et al. 2017

VOIT, M.; G. REINHART: Innovative Verarbeitungstechnologien für die Faser-verbundfertigung. *Lightweight Design* 10. Jahrgang (2017) (2).

Völklein et al. 2006

VÖLKLEIN, F.; T. ZETTERER: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik; Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg Praxiswissen. Braunschweig: Springer Vieweg. 2006. 1 online resource. ISBN: 3-528-13891-2.

Vollmuth 2015

VOLLMUTH, J.: Schmalz zeigt Matrixgreifer für flächige Handhabung. *Konstruktionspraxis* (2015). URL: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/schmalz-zeigt-matrixgreifer-fuer-flaechige-handhabung-a-484030/>.

Weiland et al. 2015

WEILAND, F.; R. FREITAS; U. BEIER: Innovationen bei Materialien und Prozessen im Hubschrauberbau. In: *Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium*. Hrsg. von H. VOGGENREITER; M. KUPKE. Bd. 3. 3. Augsburg. 2015.

Weimer et al. 2006

WEIMER, C.; A. MIENE; E. VAN LANDUYT; V. KRAJENSKI; B. KÖHNKE; F. STAD-

Literatur

LER; S. PREUSSLER; M. GÖTTINGER; T. BISCHOFF; F. LÖHR: Prozessbegleitende Schadensanalyse (PROSA) - Ein wesentlicher Baustein für die kosteneffiziente Fertigung und Analyse von CFK-Strukturen. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT - LILIENTHAL-OBERTH E.V. Version DGLR-Jahrbuch Band III. Bonn.

Welling 1994

WELLING, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation. München: TU München. 1994.

Wendt 1992

WENDT, A.: Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation. München: TU München. 1992. 162 S.

Wiedemann et al. 2008

WIEDEMANN, M.; M. SINAPIUS: *Innovation Report 2008; Institute of Composite Structures and Adaptive Systems*. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 2008. 32 S. URL: http://www.dlr.de/fa/en/Portaldata/17/Resources/dokumente/2014/Instituts_Flyer_English_low.pdf (besucht am 29.03.2017).

Witten 2013

WITTEN, E., Hrsg. (2013): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites; Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 3. überarbeitete Auflage 2013. Frankfurt am Main: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 2013. 584 S. ISBN: 978-3-658-02754-4.

Wüllner 2013

WÜLLNER, A.: Intelligente textile Technologien für den Leichtbau. In: *Forum Intelligente Textilien - Smart- Leicht - Leuchtend*. Hrsg. von BAYERN INNOVATIV. Lindau: Bayern Innovativ GmbH. 2013, S. 48–57.

Yashan 2008

YASHAN, A.: Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren. Lehrstuhl für Fertigungstechnik. Dissertation. Saarbrücken: Universität Saarland. 2008. 103 S.

Zabel 2010

ZABEL, H.: *Kurzlehrbuch Physik*. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme. 2010. 220 S. ISBN: 978-3-13-146471-2.

Zäh et al. 2012

ZÄH, M.; U. LINDEMANN: Vorlesung Qualitätsmanagement; Qualität im Produktlebenszyklus. Unter Mitarb. von RIS, FABIAN KARL EBERHART; C. ZWICKER. München: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Anhang

Für ein vertieftes Verständnis liefert der nachfolgende Anhang weitere Informationen, die über das erforderliche Verständnis der Arbeit hinausgehen. Dabei werden in Abbildungen und Tabellen zusätzliche Ergebnisse und Modelle beschrieben. Die Verknüpfung erfolgt über Verweise an den entsprechenden Textstellen im Hauptteil der Arbeit.

Gemäß dem Aufbau der Arbeit werden die Wirkungsweisen eines kapazitiven Näherungssensors sowie eines elektrooptischen Sensors am Beispiel der CMOS-Kamera näher beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse des methodischen Vorgehens aus Kapitel 3 präsentiert. Bei der Umsetzung der identifizierten Maßnahmen wird der Handhabungsvorgang und die Bewertung zur Definition der Domänen durchgeführt. Nach einer Übersicht über die Ergebnisse der experimentellen Validierung werden die Berechnungsvorschriften der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgestellt.

A.1 Aufbau eines kapazitiven und elektrooptischen Sensors

Kapazitiver Näherungssensor

Sowohl leitfähige als auch nichtleitfähige Stoffe bewirken eine Änderung der Kapazität in einem Sensor (vgl. Abbildung A.1). Bei Anlegen leitfähiger Materialien an die Sondenelektrode (2) ergibt sich eine vergleichbare Reihenschaltung von Kondensatoren mit einer Erhöhung der Gesamtkapazität. Jedoch bewirkt auch ein nichtleitfähiges Material durch die Erhöhung der Permittivität eine Steigerung der Gesamtkapazität. An der Sondenelektrode (2), die aus den beiden elektrisch geladenen Elektrodenflächen E1 und E2 besteht, entsteht ein elektrisches Feld, wodurch sich bei einer Kapazitätsänderung die Kapazität des Kondensators verändert und der dahinter geschaltete Oszillator (5) zu schwingen beginnt. Zusätzlich zur Sondenelektrode wird eine Kompensationselektrode (3) zum Ausgleich von Schmutzpartikeln eingesetzt. Über den Oszillator werden die Veränderungen in ein Signal konvertiert und nach einem Gleichrichter (6) durch die Störimpulsausblendung (7) von Störsignalen befreit.

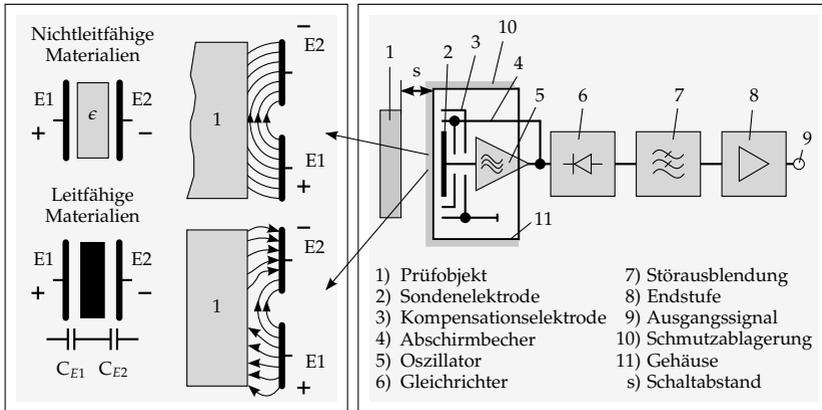


Abbildung A.1: Aufbau und Wirkungsweise eines kapazitiven Sensors (HERING 2012)

In der Endstufe (8) werden die Signale verstärkt und als Ausgangssignal (9) weitergegeben. Zusätzlich wird eine Versorgungsspannung für die Energieversorgung benötigt. Somit bewirkt die geänderte Kapazität eine Änderung der Ausgangsspannung, womit die Funktionalität durch das elektrische Signal weiterverarbeitet werden kann. (HESSE ET AL. 2011)

Optisches Kamerasystem

Die Funktionsweise ist gemäß dem physikalischen Effekt auf Fotodioden zurückzuführen. Das entstandene Bild der Kamera setzt sich aus einzelnen Pixelzellen zusammen, die in einer Zeile oder Matrix angeordnet durch eine Zeilen- und Spaltenadressierung direkt und in beliebiger Reihenfolge angesprochen werden können (HERING 2012; HESSE ET AL. 2011) (siehe Abbildung A.2, linker Abschnitt). Nach der Belichtungszeit durch die einfallende Strahlung wird die Ladung auf der Fotodiode (1) für jede Pixelzelle über den Auswahltransistor (2) als elektrisches Signal an den Speichertransistor (3) übertragen. Hiermit wird das Signal über den Spaltentransistor (4) weitergeleitet, bis es an einem Multiplexer endet. Nach der Signalaufnahme wird die Restladung durch das Zurücksetzen (5) für einen neuen Zyklus gelöscht. Für das Bild werden die Fotodioden in Zeile oder Matrix angeordnet und durch Zeilen- oder Spaltenadressierung direkt in beliebiger Reihenfolge angesprochen (HERING 2012). HESSE & SCHNELL (2011) formulieren als wesentliche Vorteile den geringen

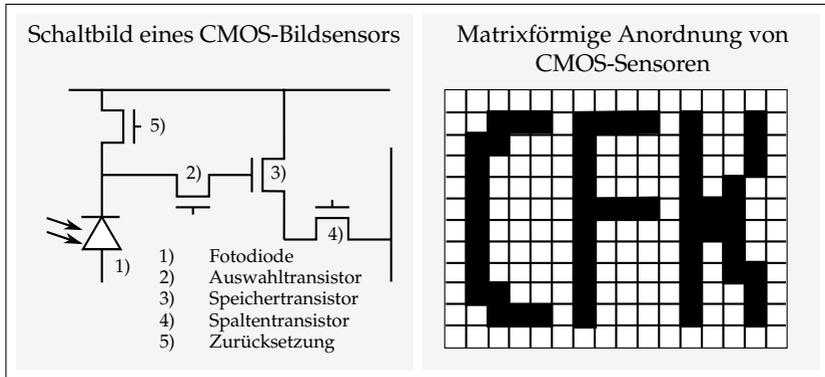


Abbildung A.2: Funktionsweise eines CMOS-Bildsensors und Anbindung der CMOS-Sensoren

Leistungsbedarf, eine geringe Stömpfindlichkeit, eine hohe Temperaturstabilität sowie eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit. CMOS-Kameras sind von großem Nutzen in der Mobilrobotik. Sie können sowohl physikalische Größen wie Abstände als auch Objektinformationen erfassen und sind auch in der Lage, Positionen (1D), Flächen (2D) oder räumlich ausgedehnte Objekte (3D) zu identifizieren und zu messen (HERING 2012).

A.2 Beschreibung der verwendeten Vorgehensmodelle

Münchener Produktkonkretisierungsmodell

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) baut u. a. auf dem Vorgehen nach VDI 2221 auf. Es gilt als Vorgehensmodell für einen Entwicklungsprozess, welcher sich an den Eigenschaften relevanter Produktmodellen orientiert (vgl. Abbildung A.3) (LINDEMANN 2009).

Der Anforderungs- und Lösungsraum stellen die Hauptkomponenten dar und werden weiterhin durch die Funktions-, Wirk- sowie Bauebene detailliert. Die einzelnen Bestandteile des Vorgehensmodell können wie folgt charakterisiert werden (PONN ET AL. 2011):

- *Anforderungsraum*: Technische Entwicklungsziele und geforderte Produkteigenschaften werden in Anforderungen formuliert. Zu Beginn des Ent-

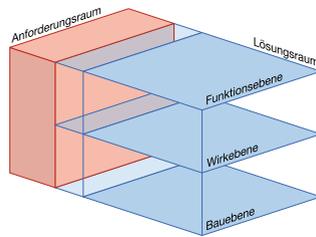


Abbildung A.3: Gliederung und Charakterisierung des Münchener Produktkonkretisierungsmodells (PONN ET AL. 2011)

wicklungsprojektes müssen die Anforderungen für die weitere Koordination der Entwicklungsaktivitäten geklärt werden. Anforderungen sind in den Entwicklungsschritten präsent und verlangen eine fortlaufende Erweiterung, Detaillierung sowie Adaption. Die Anforderungen sind wichtig für die Analyse und spielen in jeder weiteren Ebene eine Rolle.

- **Funktionsebene:** In dieser Ebene erfolgt die abstrahierte und zweckorientierte Darstellung des Produktes durch Funktionen. Das Denken in Funktionen ermöglicht eine Abkehr von konventionellen Lösungen und damit eine Entwicklung von neuen und innovativen Ansätzen. Funktionsmodelle sind Hilfsmittel, um die Zusammenhänge der einzelnen Funktionen zu identifizieren. Die Funktionsebene bildet die erste Konkretisierungsstufe im Lösungsraum.
- **Wirkebene:** In der zweiten Konkretisierungsstufe werden technischen Lösungsideen und -konzepte den Problemstellungen zugeordnet. Ein Wirkmodell zeigt die für die Funktion relevanten Aspekte der Lösung. Das Ziel dieser Ebene ist es, ein Gesamtkonzept zu entwickeln, dessen Qualität den späteren Produkterfolg bereits in diesem Entwicklungsstadium beeinflusst.
- **Bauebene:** Letztendlich muss auf Bauebene die finale Produktgestalt festgelegt werden. Das Baumodell als Ergebnis beinhaltet alle Bauteile und -gruppen sowie deren Wechselwirkungen in der Baustruktur. Die Komplexität der Produktgestaltung wird durch die notwendige Berücksichtigung spezifischer Anforderungen wie Fertigbarkeit, Montierbarkeit oder günstige Beschaffung erhöht.

In der praktischen Anwendung sind die verschiedenen Ebenen nicht isoliert zu betrachten. Vielmehr findet durch Iterationen und Sprünge ein Austausch zwischen den Ebenen statt.

Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel

Der von Ehrlenspiel entwickelte Vorgehenszyklus ist den Vorgehensmodellen zur Problemlösung auf Ebene der operativen Arbeitsschritte zuzuordnen. Das Modell nach Ehrlenspiel verlangt in erster Linie ein sequenzielles Vorgehen, kann jedoch auch iterativ sowie rekursiv verwendet werden (siehe Abbildung A.4). Der Vorgehenszyklus ist sowohl für die Entwicklung von Sachprodukten

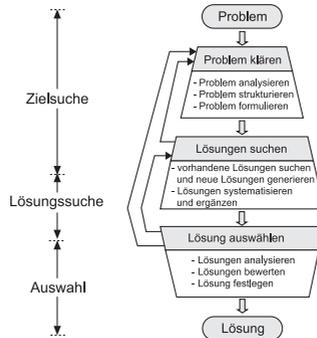


Abbildung A.4: Aufbau und Ablauf des Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel (LINDEMANN 2009)

als auch zur Prozessoptimierung anwendbar. Ferner lassen sich die einzelnen Prozessschritte näher charakterisieren:

- *Problem klären*: Dieser Prozessschritt beinhaltet die Erarbeitung der Grundlagen für die Zielformulierung, die Lösungssuche und die Bewertung der Lösungen sowie die strukturierte Darstellung und Formulierung der Informationen mittels Listen, Flussdiagrammen etc.
- *Lösungen suchen*: Die Lösungssuche ist ein Zusammenspiel zwischen Synthese – zur Generierung mehrerer und verschiedenartiger Lösungen für die Problemstellung – und Analyse.
- *Lösung auswählen*: Inhalt dieses Schrittes ist die Analyse und die Bewertung der sich ergebenden Lösungen in Abhängigkeit von den bei der Problemklärung erarbeiteten Anforderungen. Den Anschluss bildet die Auswahl einer (oder mehrerer) Lösung(en) auf Basis der Bewertung.

A.3 Methodisches Vorgehen zur qualitätskonformen Handhabung

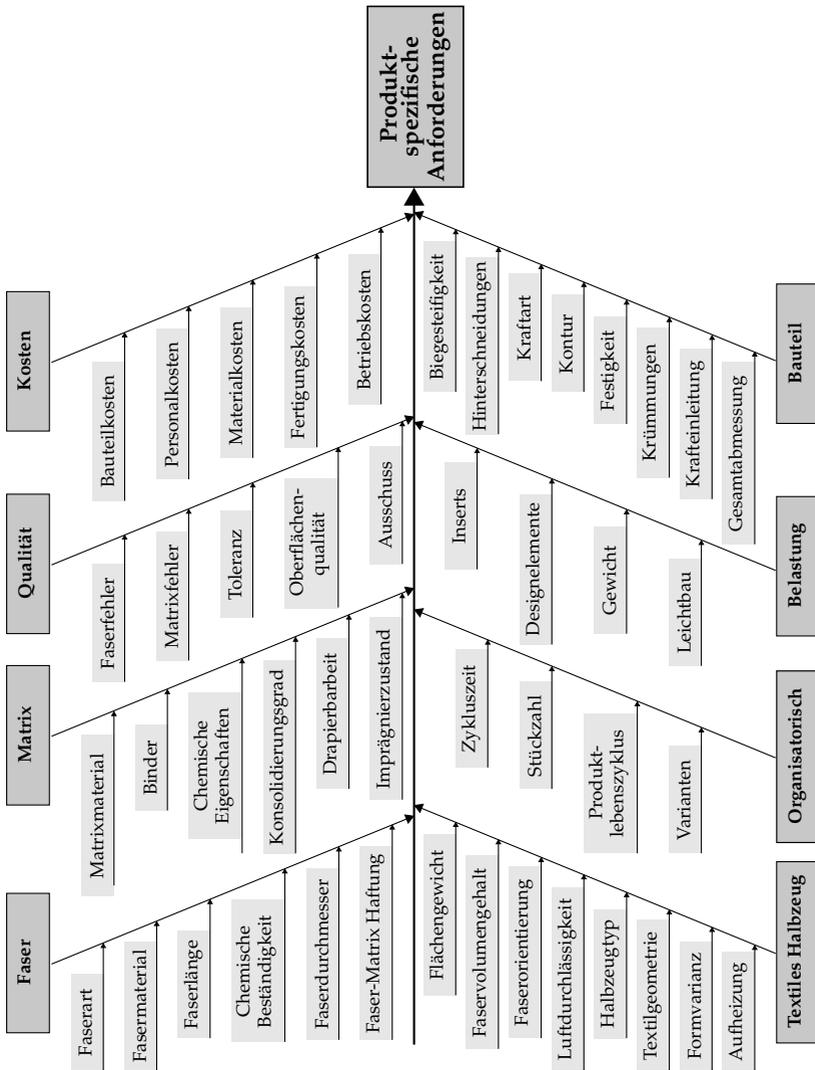


Abbildung A.5: Übersicht und Klassifizierung der produktspezifischen Einflussgrößen

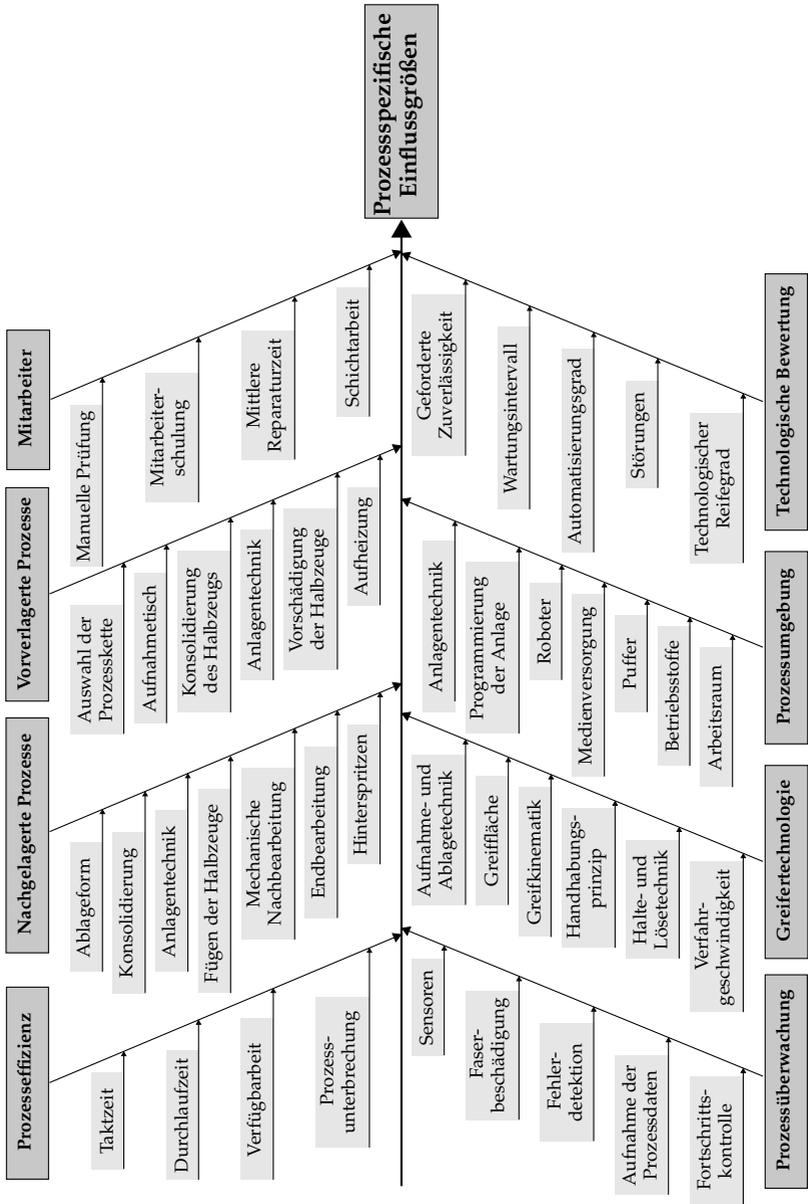


Abbildung A.6: Übersicht und Klassifizierung der prozessspezifischen Einflussgrößen

Anhang

Nr.	Anforderung	Beschreibung	Zahlenwerte			Einheit
			min.	gen.	max.	
1.	Funktionalität					
1.1	Qualitätskonforme Handhabung	Keine Qualitätseinbußen durch den Handhabungsschritt				
1.2	Textilbewegung	Minimale Textilbewegung und geringe Wechsel der Wirkflächen				
1.3	Sicheres Halten	Permanente kontrollierte Kraftwirkung auf das Textil				
1.4	Zuverlässige Kontrolle	Detektion aller Prozessfehler durch ein robustes Sensorsystem				
1.5	Konturvariantes Greifen	Handhaben unterschiedlicher Konturen (min. 12 Greifpunkte / dm ²)				
1.6	Fehlerkorrektur	Korrektur einer falschen Aufnahme	-8	0	+8	mm
1.7	Standardisierung	Einsatz standardisierter industrieprobter Sensorkomponenten				
1.8	Integrierbarkeit	Einfache Integration und Montierbarkeit in den Greifer				
1.9	Form und Größe des Textils	Einhalten der maximalen Geometrien		0	±1	mm
2.	Leistungsfähigkeit					
2.1	Minimale Taktzeit	Minimale Erhöhung der Taktzeit durch den Prüfvorgang		10		s
2.2	Kleine Losgrößen	Hohe Variantenvielfalt und häufige Wechsel der Geometrien				
2.3	Reproduzierbarkeit	Hoher Automatisierungsgrad und eine wirtschaftliche Systemauslastung				
3.	Qualität					
3.1	Positioniergenauigkeit	Exaktes Ablegen in die Form	-2	0	+2	mm
3.2	Textilkräfte	Minimierung der Kräfte auf das Textil				
3.3	Parallele Faserorientierung	Vermeidung eines Faserverzugs	-1,5	0	1,5	°
3.4	Keine Textilverschiebungen	Vermeidung von Welligkeiten durch aufstehende Textilien				
3.5	Verunreinigungen	Keine Fremdstoffe im Textil				
3.6	Unversehrtheit des Textils	Keine ungewollte Strukturveränderung				
3.7	Verformung der Wirkfläche	Definiertes Verformen der Wirkfläche beim Ablegen				
3.8	Geringe Textilumformung	Minimierung der Textilumformung beim Ablegen				
3.9	Definiertes Greifen	Exaktes Greifen während der Handhabung				
4.	Wirtschaftlichkeit					
4.1	Geringe Betriebskosten	Minimaler Maschinenstundensatz auch mit Sensorintegration			X	€
4.2	Geringer Ausschuss	Reduktion der fehlerhaften Lagen				
4.3	Minimaler Verschnitt	Materialeffizientes Zuschneiden				
4.4	Max. Beschaffungskosten	Maximale Investitionskosten			20000	€
4.5	Ressourceneffizienz	Minimierung des Energie- und Betriebsmittelverbrauchs				

Tabelle A.1: Auflistung und Sammlung aller wesentlichen Anforderungen

Fragestellung: "Mit welcher Intensität beeinflussen sich die Einflussgröße a und die Prozessanforderung b gegenseitig?"		Prozessanforderungen																								
		Funktionalität				Leistungsfähigkeit				Qualität				Wirtschaftlichkeit												
		Schonende Handhabung	Textilbewegung	Sicheres Halten	Zuverlässige Kontrolle	Konkurranztaugliches Greifen	Standardisierung	Form und Größe des Textils	Geräte Taktzeit	Kleine Losgrößen	Fehlerausregelung	Reproduzierbarkeit	Positioniergenauigkeit	Textilkrafte	Parallele Faserrichtung	Keine Textilverschiebung	Vereinreinigungen	Unversehrtheit des Textils	Verformung der Wirkfläche	Definiertes Greifen	Geringe Betriebskosten	Geringer Ausschuss	Minimaler Verschleiß	Geringe Beschaffungskosten	Ressourceneffizienz	
Prozessspezifische Einflussgrößen	Prozess-effizienz	Taktzeit	1	1	1	0	2	1	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	
		Durchlaufzeit	1	1	1	0	2	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
		Verfügbarkeit	0	0	1	1	0	2	0	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0
	Nachgelagerte Prozesse	Prozessunterbrechung	0	2	1	1	0	0	1	2	1	2	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0
		Ablageform	2	0	1	2	1	0	2	0	0	0	2	0	2	1	1	1	2	2	1	0	1	1	0	0
		Konsolidierung	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		Anlagentechnik	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fügen der Halbzeuge	0	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nachbearbeitung	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
		Endbearbeitung	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Vorgelagerte Prozesse	Hinterspritzen	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Auswahl Prozesskette	1	2	1	1	1	0	2	2	1	2	2	1	0	2	1	0	0	0	2	1	2	2	2	2
		Aufnahmetisch	2	1	2	2	1	1	2	0	0	1	1	1	0	2	1	1	2	2	0	0	0	0	1	0
		Konsolidierung des Halbzeugs	2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mitarbeiter	Anlagentechnik	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0
		Vorschädigung Halbzeug	2	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
		Aufheizung	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Prozess-überwachung	Manuelle Prüfung	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
		Mitarbeiterschulung	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
		Mittlere Reparaturzeit	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
		Schichtarbeit	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sensoren	0	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	0	0	0	1	0	1	0	1
	Greifer-technologie	Faserbeschädigung	2	1	1	2	2	1	2	1	0	2	1	1	1	2	1	0	2	1	2	0	1	1	0	0
		Fehlerdetektion	2	2	2	2	2	1	1	0	2	1	1	1	2	1	2	2	0	0	1	0	1	0	0	0
		Aufnahme Prozessdaten	1	2	2	2	1	2	1	0	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0
		Fortschrittskontrolle	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
		Aufnahme- und Ablegetechnik	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	0	1	2	2	0	1	0	1	2
Prozess-umgebung	Greiffläche	2	2	2	2	2	2	2	0	1	1	2	2	2	1	0	1	2	2	0	0	1	0	0	0	
	Greifkinematik	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	
	Handhabungsprinzip	2	2	2	2	1	2	2	0	1	1	2	2	1	2	0	2	2	2	2	1	1	1	0	0	
	Halte- und Losetechnik	2	2	1	2	1	2	2	0	1	1	2	2	1	1	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	
	Anlagentechnik	0	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	1	2	1	0	2	1	
	Anlagenprogrammierung	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	Roboter	0	1	1	0	0	1	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	
	Medienversorgung	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Technologische Bewertung	Puffer	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	Betriebsstoffe	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	Arbeitsraum	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zuverlässigkeit	0	1	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	Wartungsintervall	0	0	0	1	1	2	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Technologische Bewertung	Automatisierungsgrad	0	1	1	1	1	2	1	1	0	2	2	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	
	Störungen	0	1	1	1	1	0	2	0	2	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
	Reifegrad	0	1	1	1	0	1	0	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	

Tabelle A.2: Verknüpfungsmatrix zur gewichteten Gegenüberstellung der prozessspezifischen Einflussgrößen und Prozessanforderungen

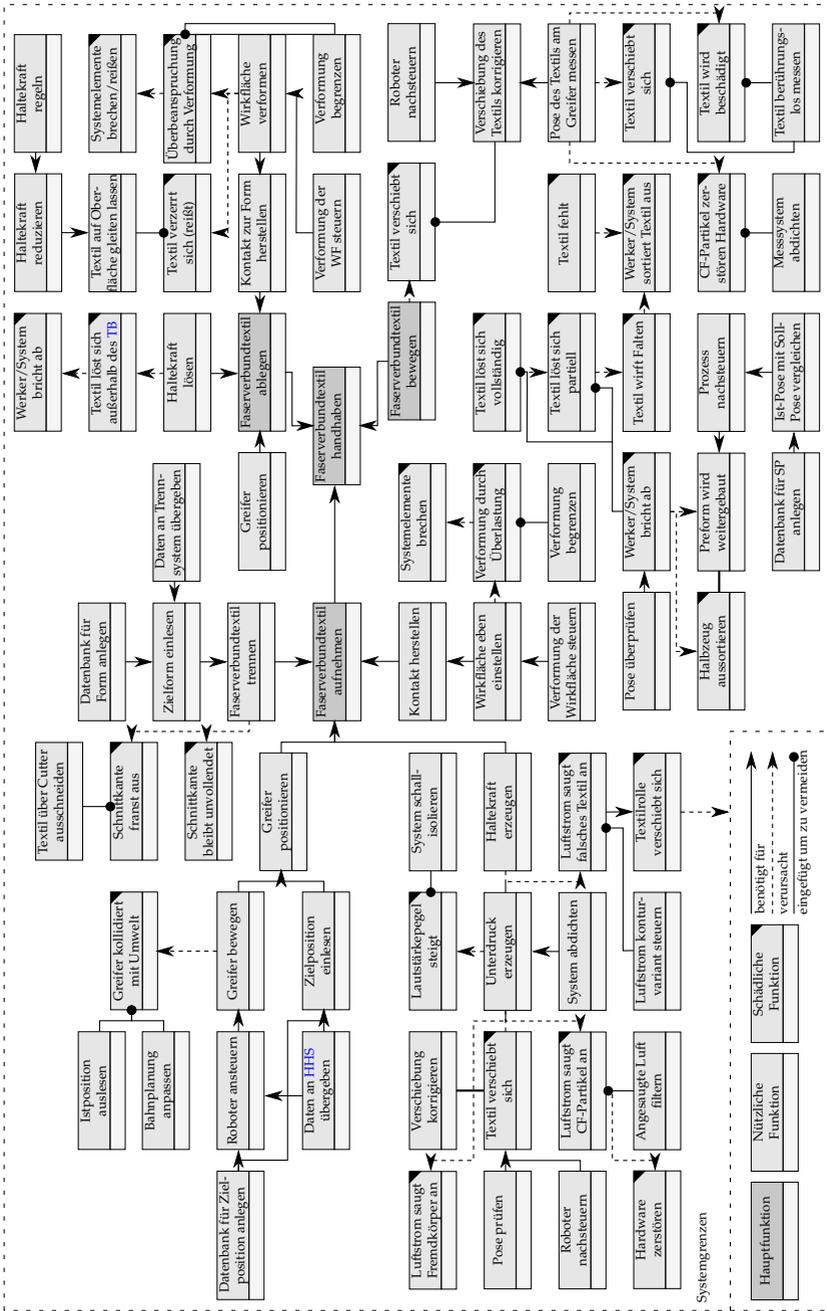
Anhang

Fragestellung: "Mit welcher Intensität beeinflussen sich die Einflussgröße a und die Prozessanforderung b gegenseitig?"		Prozessanforderungen																										
		Funktionalität				Leistungsfähigkeit				Qualität				Wirtschaftlichkeit														
		Schonende Handhabung	Textilbewegung	Sicheres Halten	Zuverlässige Kontrolle	Konturvariables Greifen	Standardisierung	Form und Größe des Textils	Geringe Taktzeit	Kleine Losgrößen	Fehlerausregelung	Reproduzierbarkeit	Positioniergenauigkeit	Textilkräfte	Parallele Fasorientierung	Keine Textilverfälschung	Venureinigungen	Unversehrtheit des Textils	Verformung der Wirkfläche	Geringe Textildumformung	Definiertes Greifen	Geringe Betriebskosten	Geringer Ausschuss	Minimierter Verschmit	Geringe Beschaffungskosten	Ressourceneffizienz		
Faser	Faserart	0	1	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	2	2	2	1	2	1	2	2	0	1	2	0	0		
	Fasermaterial	1	1	1	2	2	0	2	0	0	1	0	0	2	2	2	0	2	1	2	0	0	0	2	1	0	0	
	Faserlänge	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Faserdurchmesser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Matrix	Faser-Matrix-Haftung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chem. Beständigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Matrixmaterial	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Binder	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chem. Eigenschaften	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Konsolidierungsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Drapierbarkeit	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	Imprägnierbarkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	Qualität	Faserfehler	0	1	0	1	1	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		Matrixfehler	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0
Toleranz		0	1	0	0	1	0	2	0	0	2	2	2	1	1	1	0	1	1	2	1	2	1	2	2	2	0	
Oberflächenqualität		0	2	0	0	1	0	2	0	0	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	
Kosten	Ausschuss	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	
	Bauteilkosten	0	0	0	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	2	1	1	1	0	
	Personalkosten	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	Materialkosten	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	0	
	Fertigungskosten	2	1	0	1	0	2	1	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	0	1	1	0	
	Betriebskosten	2	2	0	1	0	2	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	0	
Textiles Halbzeug	Flächengewicht	2	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
	Faservolumengehalt	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Faservorientierung	2	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Luftdurchlässigkeit	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Halbzeugtyp	1	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Textilgeometrie	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Formvarianz	1	1	0	0	2	2	0	1	2	0	2	0	2	0	0	0	1	2	2	0	1	1	1	1	1	0	
Organisatorisch	Aufheizung	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zykluszeit	1	1	1	2	0	1	0	2	1	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	Stückzahl	0	1	1	0	1	2	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
	Produktlebenszyklus	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	Varianten	0	1	0	0	1	2	2	1	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1	0	1
Belastung	Inserts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Designelemente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Gewicht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Leichtbau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bauteil	Biegesteifigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Hinterschneidungen	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Kraftart	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Kontur	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	2	0	0	
	Festigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Krümmungen	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	1	2	1	1	0	0	1	0	0	
	Krafteinleitung	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gesamtabmessung	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	2	0	0		

Tabelle A.3: Verknüpfungsmatrix zur gewichteten Gegenüberstellung der produktspezifischen Einflussgrößen und Prozessanforderungen

Nr.	Prozessanforderung	Abgeleitete Funktion	K1	K2
1	Sicheres Halten	Unabhängig von Luftdurchlässigkeit und Flächengewicht das textile Halbzeug sicher halten	X	X
2	Positioniergenauigkeit	Das textile Halbzeug positionsgenau in die Form ablegen	X	X
3	Definierte Aufnahme des Textils	Das textile Halbzeug gleichmäßig und mit flächiger Krafteinleitung greifen	X	X
4	Definierte Verformung der Wirkfläche	Die Wirkfläche im benötigten minimalen Umformgrad definiert an die Form anpassen	X	X
5	Zuverlässige Kontrolle	Die eingesetzten Prüfmittel zur Kontrolle der Qualität zuverlässig verwenden	X	X
6	Fehlerausregelung	Mit den entwickelten Maßnahmen die weitere Fehlerverbreitung stoppen	X	
7	Geringer Ausschuss	Materialeffizient produzieren, um einen möglichst geringen Verschnitt zu generieren		
8	Unversehrtheit des Textils	Durch eine schonende Handhabung und geeignete Auswahl der Berührflächen keine Beschädigung zum Textil verursachen	X	X
9	Integrierbarkeit	Die final identifizierten Maßnahmen so umsetzen, dass sie in ein bestehendes System integrierbar ist		

Tabelle A.4: Lastenheft mit den priorisierten Anforderungen



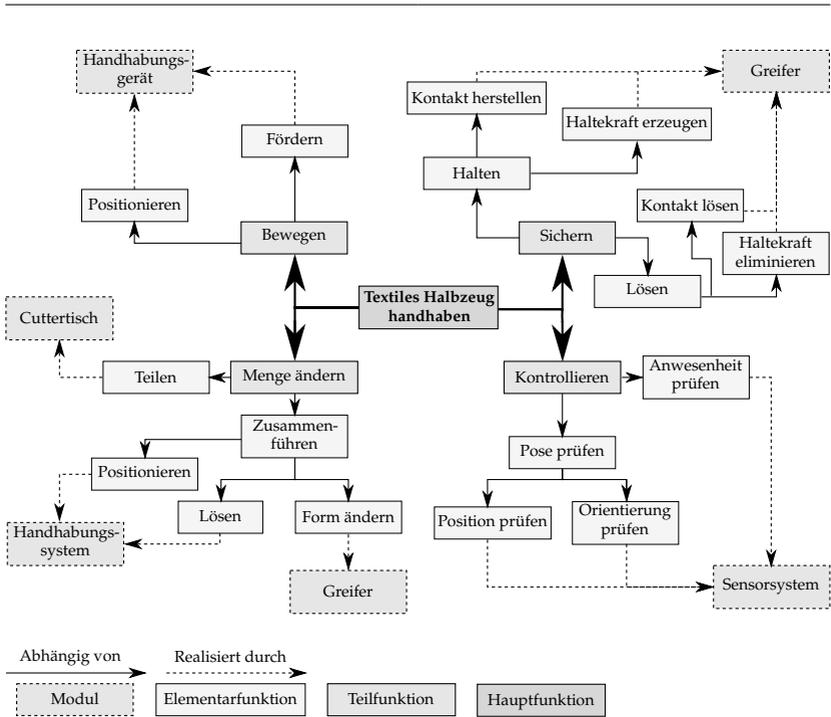


Abbildung A.8: Funktionsstrukturierung des Handhabungsszenarios textiler Halbzeuge

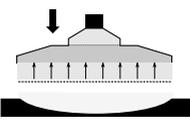
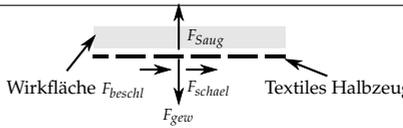
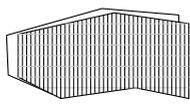
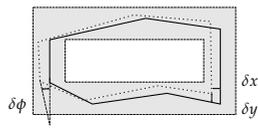
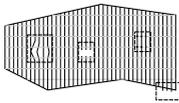
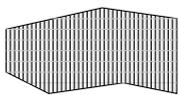
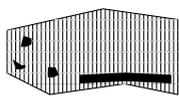
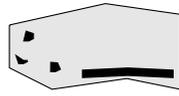
Messaufgabe: Einhaltung der Prozessfähigkeit	
Technische Problemstellung	Physikalische Beschreibung des Problems
 <p>Prozessbedingte Unterbrechungen an der Wirkfläche des Greifers</p>	 <p>Detektion prozessbedingter Unterbrechungen an der Wirkfläche des Greifers</p>
Messaufgabe: Geometrie	
Technische Problemstellung	Physikalische Beschreibung des Problems
 <p>Unbekannte Position des textilen Halbzeugs</p>	 <p>Aufnahme der konturvarianten Randkurve und Abgleich mit der Soll-Kontur</p>
Messaufgabe: Beschädigung	
Technische Problemstellung	Physikalische Beschreibung des Problems
 <p>Eingebrachte Beschädigungen im Textil</p>	 <p>Prüfung der Textilloberfläche hinsichtlich vorliegender Unregelmäßigkeiten und Defekte</p>
Messaufgabe: Fremdkörper	
Technische Problemstellung	Physikalische Beschreibung des Problems
 <p>Auftreten unerwünschter Fremdkörper während des Prozesses</p>	 <p>Detektion von Materialien unterschiedlicher Beschaffenheit vor dem Ablegeprozess</p>

Tabelle A.5: Formulierung der technischen Problemstellung und Ableitung der Messaufgaben aus den schädlichen Funktionen

Physikalischer Effekt	Auswahlkriterien						Entscheidung	Erklärung und Verweis
	Kontur	Beschädigung	Fremdkörper	Prozess	Nutzbarkeit	Anwendbarkeit		
Wirbelstrom-Effekt	-	+	-	+	+	+	✓	(BARDL ET AL. 2014; HERING 2012; KOCHAN 2012; YASHAN 2008)
Hall-Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(HESSE ET AL. 2011; RUHM 2010)
Effekt der Kapazität	-	-	-	+	+	+	✓	(SCHANZ 1988; SCHLEMMER 1996; SCHÜRMAN 2007)
Effekt der Induktion	-	-	-	+	+	+	✓	(SCHÜRMAN 2007; TRÄNKLER ET AL. 1998)
Piezoelektrischer Effekt	-	+	-	+	+	+	✓	(DELORME ET AL. 2012; KESSEL ET AL. 2012)
Resistiver und piezoresistiver Effekt	-	-	-	-	+	-	-	(RAUSCH 2012)
Pyroelektrischer Effekt	+	-	-	+	+	+	✓	(HESSE ET AL. 2011; MINCH ET AL. 2014; TRÄNKLER ET AL. 1998)
Fotoelektrischer Effekt	+	+	+	+	+	+	✓	(HESSE ET AL. 2011; MIENE 2009)
Elektrooptischer Effekt	+	+	+	+	+	+	✓	(HESSE ET AL. 2011; LEMME 1990; MIENE 2009; SCHLEMMER 1996)
Gauss-Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(CZICHOS ET AL. 2012; HESSE ET AL. 2011)
Effekt des spezifischen Widerstands	+	+	+	+	+	+	✓	(HERING 2012; SCHÜRMAN 2007; ZABEL 2010)
Magnetorestriktiver Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(LEMME 1990)
Magnetoresistiver Effekt	-	-	-	+	+	+	✓	(CZICHOS ET AL. 2012; HESSE ET AL. 2011)
Thermoelektrischer Effekt	-	+	+	-	+	+	✓	(BUDZIER & GERLACH 2011; TRÄNKLER ET AL. 1998; VÖLKLEIN ET AL. 2006)
Thermowiderstands Effekt	+	+	+	+	+	+	✓	(VÖLKLEIN ET AL. 2006)
Temperatureffekte bei Halbleitern	-	-	-	-	-	-	-	(HESSE ET AL. 2011)
Potenziometrischer Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(TRÄNKLER ET AL. 1998)
Amperometrischer Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(TRÄNKLER ET AL. 1998)
Konduktometrischer Effekt	-	-	-	-	-	-	-	(TRÄNKLER ET AL. 1998)
Gaslöslichkeit	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Gastransport zur Festkörperoberfläche	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Adsorption und Chemisorption	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Reaktionen mit absorbierten Spezies	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Reaktion des Gases mit dem Festkörper	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Mischphasenfehlordnung	-	-	-	-	-	-	-	(BAUMANN 2010; LEMME 1990)
Schallwellen	-	-	-	+	+	+	✓	(HESSE ET AL. 2011; TRÄNKLER ET AL. 1998)
Doppler Effekt	-	-	-	-	+	-	-	(HESSE ET AL. 2011; KOCHAN 2012)
Röntgenstrahlung	-	+	-	+	+	-	-	(KOCHAN 2012)
UV-Licht, sichtbares Licht, Infrarot	+	-	-	+	+	+	✓	(KOCHAN 2012)
Mikrowellenstrahlung	+	-	-	+	+	+	✓	(HESSE ET AL. 2011)
Radiofrequenzen	-	-	-	-	+	-	-	(FRANKE ET AL. 2006)

Legende: + geeignet - nicht geeignet ✓ positive Entscheidung

Tabelle A.6: Vollständige Bewertung der physikalischen Effekte

Wirbelstromeffekt	Funktionsweise: Durch ein magnetisches Wechselfeld wirkt im Prüfkörper ein Wirbelstrom, der dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt und die Bewegung hemmt. Der Wirbelstrom tritt kreisförmig, in sich geschlossen auf.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Positionsprüfung Schwingungsprüfung Ausdehnungsmessung Rundlauferfassung	 Linienförmig (L)	Berührungslose und verschleißfreie Erfassung der Schichtdicke des Prüfkörpers (bspw. Wirbelstromsonde)
	Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Häufige Anwendung für Messungen an statischen und rotierenden Objekten auf Unwuchten, Vibration und Verschleiß zur Maschinenüberwachung, Einsatz in vielen Branchen der Produktionstechnik.		
Kapazitiver Effekt	Funktionsweise: Für jeden Kondensator stellt sich je nach materialabhängiger Permittivität eine unterschiedliche Kapazität ein. Im Wechselstromkreis lassen sich berührungslos Materialien aufgrund eines imaginären Blindwiderstandes unterscheiden.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Füllstandmessung Anwesenheitsprüfung Inhaltskontrolle	 Punktförmig (P)	Beginnende Schwingung des Sensors bei Annäherung (nicht)metallischer Materialien an die aktive Zone an der Sensoroberfläche (bspw. Näherungsschalter)
	Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Anwendungsbereich zum Erkennen von Stapelhöhen, Materialstärken, Zählaufgaben; kleine Schaltabstände realisierbar (15 mm bis 50 mm)		
Piezoelektrischer Effekt	Funktionsweise: Unter Einwirkung äußerer Kräfte oder Drücke verformen sich piezoelektrische Materialien, wodurch gleichzeitig eine elektrische Spannung entsteht. Umgekehrt lassen sich durch Anlegen elektrischer Spannungen Verformungen und Schwingungen (bei Wechselspannungen) erzielen.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Druckmessung	 Punktförmig (P)	Anwesenheitsprüfung beim Anliegen des Objekts an der aktiven Fläche des Sensors mit resultierender Spannung (bspw. Drucksensor)
	Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Verwendung für dynamische Drücke mit hoher Messfrequenz, auch für Hochtemperatureinsätze und in Mikroskopanwendungen; Sonderanwendung als Piezofolie		
Pyroelektrischer Effekt	Funktionsweise: Bei Temperaturänderungen entstehen in pyroelektrischen Materialien Oberflächenladungen mit einer resultierenden Spannung. Als Materialarten werden feste und flüssige Kristalle, Keramiken sowie polymere Kunststoffstoffe unterschieden. Alle pyroelektrischen Materialien weisen auch den piezoelektrischen Effekt auf.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Anwesenheitsprüfung	 Punktförmig (P)	Unterscheidung von Objekten auf einer piezoelektrischen Oberfläche nach Temperaturerhöhung und Messung der Differenz
		 Flächig (F)	Zweidimensionale Prüfung von Objekten unterschiedlicher Temperaturen im Raum (bspw. Bewegungsmelder)
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Einsatz in der Sicherheitstechnik (bspw. Identifikation von Personen), als Temperaturfühler sowie zur Messung von Schadstoffen			

Tabelle A.7: Detaillierung der für die Prüfung textiler Halbzeuge geeigneter physikalischen Effekte (I/III)

Fotolektrischer Effekt	Funktionsweise: Beim fotolektrischen Effekt wird durch Strahlung ein Photon von einem Elektron absorbiert, wodurch das Elektron aus seiner Bindung gelöst wird. Es wird zwischen dem äußeren und inneren Photoeffekt, sowie der Photoionisation unterschieden.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Objekterkennung Abstandserfassung Farbmessung Temperaturerkennung Lichtmessung Werkzeugkontrolle Anwesenheitsprüfung	 Punktformig (P)	Resultierende Spannung bei Bestrahlung des Elements, optional mit Hilfsspannung bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke (bspw. Fotomultiplier, Lichtschranke)
		 Linienformig (L)	Messung von Entfernungen nach dem Prinzip der Triangulation mit einer positionsempfindlichen Fotodiode (bspw. Lichttaster)
	 Flächig (F)	Erweiterung der Lichtschranken für den Einsatz in Sicherheitsanwendungen (bspw. Lichtvorhang, Lichtgitter)	
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Breiter Anwendungsbereich im Bereich des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik, der Robotik sowie in der Sicherheitstechnik.			
Elektrooptischer Effekt	Funktionsweise: Elektrooptische Sensoren (bzw. auch optoelektronische Sensoren) arbeiten mit Hilfsenergie im sichtbaren oder infraroten Bereich. Photonen einer Strahlungsquelle werden mittels lichtempfindlicher Elemente erfasst (bspw. Fototransistor) und ausgewertet. Hohe Analogie zur Fotoelektronik		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Objekterkennung Abstandserfassung Anwesenheitsprüfung	 Punktformig (P)	Resultierende Spannung bei Bestrahlung des Elements, optional mit Hilfsspannung bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke (bspw. Einweg- oder Reflexlichtschranke)
		 Linienformig (L)	Messung von Entfernungen mit einem lichtempfindlichen Element (bspw. Lichttaster, Mehrstrahllichtschrankensystem, Lichtgitter)
	 Flächig (F)	Erweiterung auf Visionssensoren zur Detektion physikalischer Größen mit anschließender Bildverarbeitung (bspw. CCD- CMOS-Sensoren)	
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Hohe Verbreitung für die Objekterkennung nichtmetallischer Elemente, Herausforderung des Einsatzes durch die Schmutz- und Feuchteempfindlichkeit sowie optische Störquellen			
Spezifischer Widerstand	Funktionsweise: Für jedes Material stellt sich abhängig von der Länge und dem Querschnitt beim Anlegen einer Spannung ein spezifischer Widerstand ein.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Objekterkennung Anwesenheitsprüfung	 Flächig (F)	Durch die geeignete Kombination und Anordnung einer gitterartigen Struktur lassen sich flächige Objekte detektieren.
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Hohe Verbreitung für die Objekterkennung nichtmetallischer Elemente, Herausforderung des Einsatzes durch die Schmutz- und Feuchteempfindlichkeit sowie optische Störquellen			

Tabelle A.8: Detaillierung der für die Prüfung textiler Halbzeuge geeigneter physikalischen Effekte (II/III)

Anhang

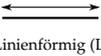
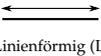
Magnetoresistiver Effekt	Funktionsweise: Der magnetoresistive Effekt umschreibt die Änderung des elektrischen Widerstands eines Materials durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes. Dabei kann der Effekt bei magnetischen und nicht-magnetischen Materialien verwendet werden.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Füllstandmessung Längenmessung	 Linienförmig (L)	Messung von Entfernungen nach dem Prinzip der Triangulation mit einer positionsempfindlichen Fotodiode (bspw. Lichttaster)
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Breiter Anwendungsbereich im Bereich des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik, der Robotik sowie in der Sicherheitstechnik.			
Thermoelektrischer Effekt	Funktionsweise: Werden gemäß dem Seebeck-Effekt bei verschiedenen Leitern unterschiedliche Temperaturen angelegt, kann eine Spannung gemessen werden. Aufgrund des Temperaturunterschieds ist die Elektronendichte an der warmen Seite geringer als an der kalten Seite, woraus der Potenzialunterschied resultiert.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Temperaturmessung Materialbestimmung	 Linienförmig (L)	Mögliche Umsetzung durch die thermische Anregung flächiger Objekte und anschließender Auswertung
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Einsatz zur Durchflussmessung von Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturmessung;			
Thermowiderstands-Effekt	Funktionsweise: Nach Anlegen einer Spannung an Objekte liegt eine elektrische Feldstärke an, die die Elektronen beschleunigt. Dabei wird der resultierende Strom durch den Widerstand begrenzt. Je nach Material liegen unterschiedliche Widerstände an, wodurch eine Unterscheidung getroffen werden kann.		
	Messaufgaben	Prüfmodus	Beispielhafte Umsetzungslösungen mit Kurzbeschreibung
	Temperaturmessung	 Flächig (F)	Umsetzung durch die thermische Anregung flächiger Objekte und Erfassung der unterschiedlicher Widerstände
Anwendungsgebiete und Besonderheiten: Standardmäßiger Einsatz zur sehr exakten Temperaturmessung bei hoher Stabilität, Einsatz auch für schwierige Umgebungsbedingungen (hoher Schmelzpunkt, aggressiver Substanzen)			

Tabelle A.9: Detaillierung der für die Prüfung textiler Halbzeuge geeigneter physikalischen Effekte (III/III)

Problemformulierung	Schädliche Funktion	Wärdestrom	Kapazität	Induktion	piezoelektrisch	pyroelektrisch	foelektrisch	elektroptisch	spez. Weidenstand	magnetoresistiv	Thermoelektrisch	Thermowiderstand
Kontrolle, ob das Halbzeug sicher am Greifer gehalten wird	Textil löst sich vollständig											
	Textil wirft Falten											
	Textil verschiebt sich											
	Textiltülle verschiebt sich											
	Textil löst sich außerhalb des TB											
Kontrolle, ob das Halbzeug definiert aufgenommen wird	Luftstrom saugt falsches Textil an											
	Schnittkante frast aus											
Kontrolle, ob das Halbzeug definiert auf der Wirkfläche (WF) des Greifers verformt werden kann	Luftstrom saugt CF-Partikel an											
	Textil verzerrt sich (reißt)											
	Textil wirft Falten											
Textil wird beschädigt												

Prozess:

Fremdkörper:

Geometrie:

Beschädigung:

Abbildung A.9: Morphologischer Kasten für die Zuordnung der schädlichen Funktionen zu den Sensorklassen 219

Modul	Aufnahmetisch			Handhabungssystem/ Greifer					Ablageform	
	Luftstrom saugt falsches Textil an	Textil verzerrt sich (reißt)	Textil verschiebt sich	Schnittkante franst aus	Textil wirft Falten	Luftstrom saugt CF-Partikel an	Textil löst sich vollständig	Textil löst sich außerhalb des TB	Textil wird beschädigt	
Schädliche Funktion										
Sensorklassen										
Wirbelstromprüfung (L)		✓					✓	✓	✓	✓
Kapazitiver Sensor (P)							✓	✓		
Induktiver Sensor (P)							✓	✓		
Piezoelektrischer Sensor (P)		✓					✓	✓		✓
Pyroelektrischer Sensor (P)							✓	✓		✓
Pyroelektrischer Sensor (F)	✓				✓			✓		
Fotoelektrischer Sensor (P)							✓			
Fotoelektrischer Sensor (L)				✓						
Fotoelektrischer Sensor (F)	✓	✓		✓	✓					✓
Elektrooptischer Sensor (P)								✓		
Elektrooptischer Sensor (L)				✓						
Elektrooptischer Sensor (F)	✓	✓		✓	✓					✓
Elektr. Widerstandssensor (F)	✓	✓		✓	✓					✓
Magneto-resistiver Sensor (L)								✓		
Thermoelektrischer Sensor (L)		✓								✓
Thermowiderstandssensor (F)	✓	✓			✓					✓
Gesamt:	5	7	5	5	7	5	10	9	7	

Legende: (P): Punktförmig
(L): Linienförmig
(F): Flächig

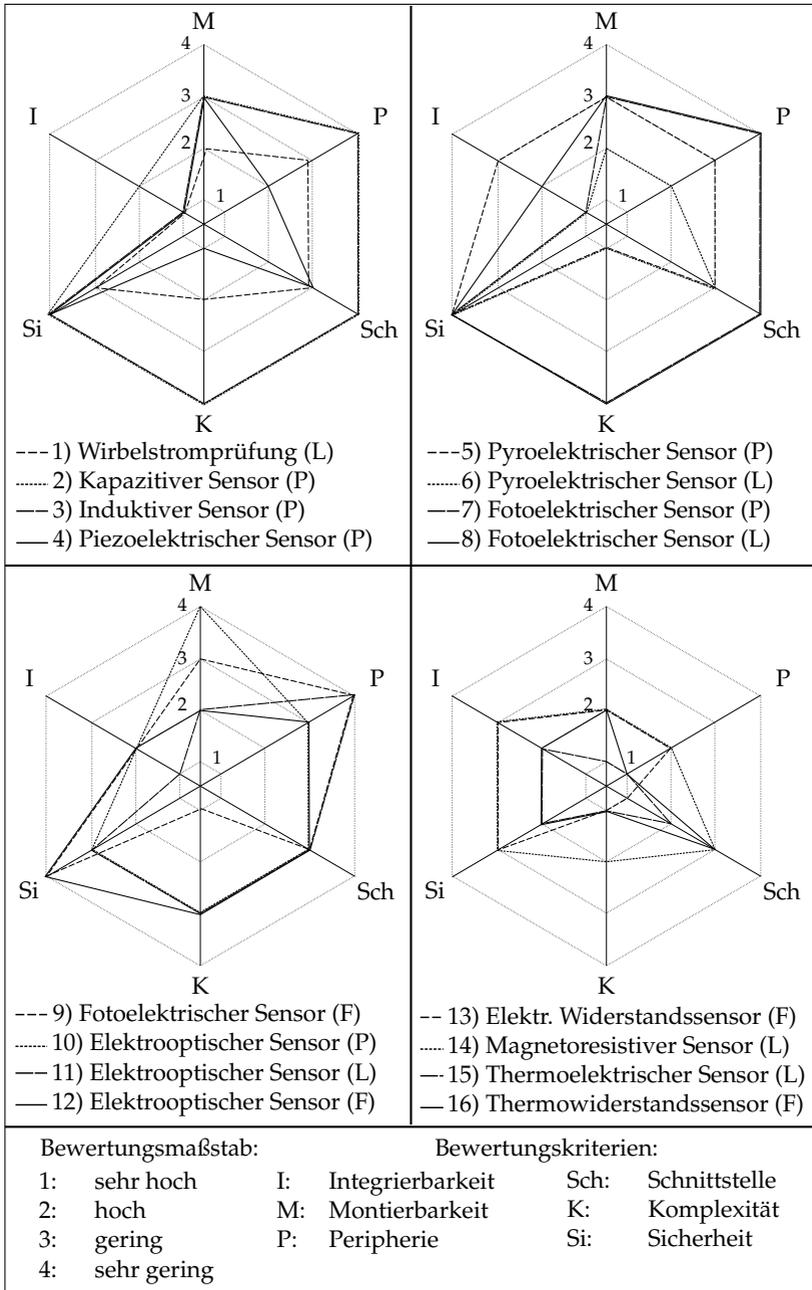


Tabelle A.10: Bewertung der Einzellösungen anhand charakteristischer Kriterien zur technischen Umsetzbarkeit

Allgemeine Informationen			
Sensorklasse: CMOS-Kamera		Modul: Peripherie	
Aufgabe: Positions- und Fehlererkennung des textilen Halbzeugs			
Schnittstelle		Montierbarkeit	
Elektrische Anbindung:	<ul style="list-style-type: none"> Datenübertragung via Ethernet Standardschnittstelle zur Datenverarbeitung 	Abmessungen (ca.):	Keine Restriktionen
Peripherie:	<ul style="list-style-type: none"> Anbindung im Arbeitsbereich des Roboters Einkabellösung 	Montageort:	Externe Anbindung im Verlauf der Roboterbahn
Beschreibung des Sensors:	<ul style="list-style-type: none"> Flächige Bildaufnahme mittels CMOS-Sensor 	Wirkweise:	Bildoptische Erfassung des Textils
		Montagerestriktion:	Senkrechte Bildaufnahme auf die Wirkfläche
Sicherheit		Integrierbarkeit	
Schutzart (mindestens):	IP66 (DIN 1993)		
Spezielle Informationen			
Schädliche Funktion	Detaillierte Aufgabe:		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Textil wirft Falten</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Textil verschiebt sich</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Luftstrom saugt falsches Textil an</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Schnittkante franst aus</div>	<p>Nach der Aufnahme des textilen Halbzeugs, wozu nicht die exakte Position bekannt sein muss, erfolgt die Ermittlung der Textilgeometrie auf der Wirkfläche des Greifsystems. Hierbei können neben der Randkurve auch mögliche Falten, Ausfransungen der Kontur auch falsche Geometrien detektiert werden.</p> <p>Je nach anschließender Strategie können die Daten in Form einer Steuerung, Regelung oder ausschließlich zur Dokumentation der Geometriedaten verwendet werden. Zur Aufnahme der Textildaten ist auf eine ausreichend hohe Auflösung der Kamera zu achten.</p>		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Luftstrom saugt CF-Partikel an</div>	Mögliche Partikel oder Fremkörper auf der Wirkfläche oder am Textil können ebenfalls ermittelt werden.		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Textil verzerrt sich (reißt)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Textil wird beschädigt</div>	<p>Durch den Einsatz von CMOS-Sensoren können mit einer ausreichenden Auflösung auch Unregelmäßigkeiten im Textil aufgenommen und in der nachgeschalteten Auswertung ausgelesen werden.</p>		

Abbildung A.11: Detaillierung der gewählten elektrooptischen Sensorlösung anhand unterschiedlicher Kriterien

A.4 Kapitel 4

Gegenüberstellung der Domänen und Anforderungen	Greifsystem	Sensorik	Zentrale Steuereinheit	Peripherer Aufbau	Datenverarbeitung und Visualisierung
Mechanische Anforderungen					
Montagegerechte Auslegung	✓			✓	
Einfache Anbindung der weiteren Komponenten	✓			✓	
Kompakte Leichtbaukonstruktion	✓			✓	
Integration der Sensorik in die Wirkfläche	✓	✓			
Flexible Verformung der Wirkfläche	✓				
Kompakte Bauweise	✓			✓	
Endanschläge als Überlastschutz	✓			✓	
Filtersystem gegen CF-Partikel	✓			✓	
Erweiterbarkeit des Greifsystems	✓			✓	
Elektrotechnische Anforderungen					
Kompakte Bauweise	✓		✓		
Anbindung aller elektrischen Komponenten	✓	✓	✓		
Dezentrale Peripherien			✓	✓	
Bereitstellung der benötigten Schnittstellen		✓	✓	✓	
Kommunikation zu anderen Steuerungen			✓		✓
Dezentrale Energieversorgung			✓	✓	
Einfache Bedienung und Betrieb des Systems			✓		
Schutz vor leitfähigen Stäuben	✓	✓	✓		
Einhaltung der gängigen Normen	✓	✓	✓		
Informationstechnische Anforderungen					
Kompatibilität zu allen benötigten Programmen		✓	✓		✓
Einhaltung der gängigen Normen					✓
Kompatibilität zu anderen Programmiersprachen		✓			✓
Einfache Visualisierung der Prozessparameter					✓
Redundante Sicherheitskreise			✓		✓
Dokumentation aller aufgenommenen Daten		✓			✓
Feinprogrammierbare Schnittstellen		✓			✓
Gesamt:	I(13)	III(9)	II(11)	IV(9)	V(8)

Paarweiser Vergleich der Domänen

	I)	II)	III)	IV)	V)
I) Greifsystem		✓	✓	✓	✓
II) Sensorik			✓	✓	✓
III) Zentrale Steuereinheit				✓	✓
IV) Peripherer Aufbau					✓
V) Datenverarbeitung und Visualisierung					

Tabelle A.11: Einordnung und Auswahl der domänenspezifischen Komponenten

A.5 Kapitel 5

Beschreibung		Programmpunkt		Prozesszeit				
Nr	Startpunkt	Endpunkt	Start	Ende	mit Prüfung BM 1 [s] BM 2 [s]	ohne Prüfung BM 1 [s] BM 2 [s]		
1	Aufnahme des Textils							
2	Startpunkt Textilaufnahme	Aufnahmepunkt textiles Halbzeug	P1	P4	LIN	8,2 2,1		
3	Öffnung HM und Beaufschlagung ND		B2	-	-	2,5 2,5		
4	Verweilzeit nach der Aufnahme		B3	-	-	1,0 1,0		
5	Aufnahmepunkt Textil	Startpunkt Textiltransport	P4	P5	LIN	8,2 2,1		
6	Transport des Textils							
7	Startpunkt Textiltransport	Position Konturprüfung textiles Halbzeug	P5	P7	LIN	7,5 1,9		
8	Durchführung Positionskontrolle		B6	-	-	2,0 2,0		
9	Position Prüfung textiles Halbzeug	Startpunkt Drapierform	P7 / P5	P9	LIN	15,5 3,9		
10	Positionskorrektur		B8	-	-	1,0 1,0		
11	Ablegen des Textils							
12	Startpunkt Drapierform	Ablageposition (vor Erstkontakt)	P9	P10	LIN	12,5 3,1		
13	Ablageposition (vor Erstkontakt)	Endposition Drapiervorgang	P10	P13	LIN	3,0 3,0		
14	Verschluss HM und Reduktion AD		B11	-	-	2,5 2,5		
15	Verweilzeit nach dem Drapieren		B12	-	-	1,0 1,0		
16	Endposition Drapiervorgang	Startpunkt Drapierform	P13	P14	LIN	13,0 3,3		
17	Startpunkt Drapierform	Startpunkt Textilaufnahme	P14	P1	LIN	20,2 5,1		
Gesamt:					98,1	34,3	92,3	30,6

Legende: P: Punkt B: Befehl

BM 1: Betriebsmodus 1 (5 % der maximalen Geschwindigkeit)

BM 2: Betriebsmodus 1 (20 % der maximalen Geschwindigkeit)

PTP: Point-to-Point

LIN: lineare Bewegung

HM: Hubmagnet

AD: Ansaugdruck

ND: Niederdruck

Tabelle A.12: Charakterisierung des Ablaufs des Handhabungsvorgangs in der Versuchsanlage

Anhang

Einflussgrößen Versuchsreihen	Verweilzeit nach der Textilaufnahme [s]				Verweilzeit nach dem Drapiervorgang [s]				Zeit zur Durchführung des Drapiervorgangs [s]			
	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,0	2,5	3,0	3,5
Versuchsreihe 1	✓					✓					✓	
Versuchsreihe 2		✓				✓				✓		
Versuchsreihe 3		✓			✓						✓	
Versuchsreihe 4	✓					✓					✓	
Versuchsreihe 5		✓				✓					✓	
Versuchsreihe 6		✓				✓			✓			
Versuchsreihe 7		✓				✓					✓	
Versuchsreihe 8		✓				✓					✓	
Versuchsreihe 9		✓				✓					✓	
Versuchsreihe 10		✓			✓						✓	
Versuchsreihe 11	✓					✓					✓	
Versuchsreihe 12		✓				✓					✓	
Versuchsreihe 13		✓			✓					✓		
Versuchsreihe 14	✓					✓				✓		
Versuchsreihe 15	✓					✓					✓	
Versuchsreihe 16		✓			✓					✓		
Versuchsreihe 17	✓					✓					✓	
Versuchsreihe 18		✓				✓				✓		
Versuchsreihe 19		✓				✓				✓		
Versuchsreihe 20		✓				✓				✓		
Gesamt:	6	14			4	16			1	7	12	
Legende:	✓ Mindestdauer für die Erfüllung einer fehlerfreien positonsgenauen Aufnahme/Ablage											

Tabelle A.13: Versuchsreihen zur Ermittlung der Zeitdauer prozesstypischer Einflussgrößen

A.6 Kapitel 6

Nr.	Kriterium	Beschreibung
Faserstruktur		
1	Faserrichtung	Abgleich der Faserrichtung mit der Kontur und Fokus auf Parallelität
2	Beulen, Blasen	Mögliche Rückstände durch Saugabdrücke oder verschobene Struktur
3	Falten	Aufstellung der Fasern zu einer räumlichen Struktur
4	Lücken, Fisheyes	Einbringen von Öffnungen und Zwischenräumen
5	Spalten	Fehlen von einzelnen eingesaugten Fasern
Randkontur		
6	Versicherung	Unvorhergesehene Verschiebung innerhalb der Kontur
7	Ausfransung	Zerstörung der Kontur durch ungeordnete Textilfasern.
8	gerade Kanten	Ausbildung von Kurven (bspw. S-Kurve) entlang der Konturlängen
Fremdkörper		
9	Folien	Rückstände durch abgelöste Folienreste auf der Wirkfläche
10	Kunststoff	Rückstände durch die additiv gefertigte Greiferstruktur
11	Fuzzballs	Rückstände durch zurückfallende Faserreste

Tabelle A.14: Detaillierung der Fehlerursachen anhand unterschiedlicher Kategorien und Kriterien

Größen	Nr	Berechnung	Einheit	Szenario I		Szenario II		Szenario III	
				Zweischichtbetrieb	Dreischichtbetrieb	Zweischichtbetrieb	Dreischichtbetrieb	Zweischichtbetrieb	Dreischichtbetrieb
Eingangsrößen	E0			275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00
Wiederbeschaffungswert Greifsystem	E1	$\Sigma(E3 - E8)$	€						27 000,00
Wiederbeschaffungswert Sensorik	E2	$\Sigma(E9 - E11)$	€						40 000,00
Hardware Greifsystem (0,5 m x 0,5 m)	E3		€	40 000,00	40 000,00	40 000,00	40 000,00	40 000,00	60 000,00
Kinematikeinheit (z. B. Industrieroboter)	E4		€	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	20 000,00
Anwendungssoftware	E5		€	20 000,00	20 000,00	20 000,00	20 000,00	20 000,00	25 000,00
Schutzvorrichtungen und Umzäunung	E6		€	25 000,00	25 000,00	25 000,00	25 000,00	25 000,00	80 000,00
Engineering Greifsystem	E7		€	80 000,00	80 000,00	80 000,00	80 000,00	80 000,00	50 000,00
Montage und Inbetriebnahme Greifsystem	E8		€	50 000,00	50 000,00	50 000,00	50 000,00	50 000,00	2 000,00
Hardware Sensorik	E9		€						20 000,00
Engineering Sensorik	E10		€						5 000,00
Montage und Inbetriebnahme Sensorik	E11		€						302 000,00
Wiederbeschaffungskosten des HHS	B1	E1+E2	€	275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00	275 000,00	12 080,00
Umrüstkosten bei anderem Bauteil	B2	B1·N1	€/a						12 080,00
Wartungskosten und Einstellungskosten	B3		€/a	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	11 000,00	3 000,00
Energiekosten	B4		€/a	3 000,00	3 000,00	3 000,00	3 000,00	3 000,00	2 000,00
Raumkosten	B5		€/a	2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00	45 833,33
Kalk Zinssatz	B6	B1/N7	€/a	45 833,33	45 833,33	45 833,33	45 833,33	45 833,33	24 160,00
Kalk. Abschreibung	B7	B1·N4	€/a	22 000,00	22 000,00	22 000,00	22 000,00	22 000,00	1,00
Personaleinsatz	B8		[MA]	0,25	0,25	1,00	1,00	1,00	75,00
Stundensatz Personal	B9		€/h	50,00	75,00	50,00	75,00	75,00	3,00
Schichten	B10		[-]	2,00	3,00	2,00	3,00	3,00	0,00
Bauteilausschuss	B11		[%]	12,00	12,00	0,00	0,00	0,00	205,65
Taktzeit für eine Preform (6 Lagen)	B12	6·N2, 6·N3	s	183,45	183,45	183,45	183,45	183,45	15,00
Taktzeiten pro Stunde	B13	3600/B12·(1-B11)	Stück/h	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	18,00
Maschinenstundensatz	B14	$\Sigma(E9 - E11)/N5$	€/h	21,83	14,55	21,83	14,55	14,55	75
Personalkostensatz	B15	B8·B9	€/h	12,5	18,75	50	75	18,75	8,00
Materialausschusskosten	B16	XXX	€/h	24,00	24,00	8,00	8,00	8,00	2,98
Stückkosten pro Preform	SK	$\Sigma(E9 - E11)/N13$	€/Stück	3,43	3,37	4,70	5,74	5,74	100 832
Erreichbare Stückzahlen	SZ	3600/B12·N5·(1-B11)	Stück/a	66 313	99 470	75 356	113 034	113 034	h/a
Inbetriebnahmefaktor	N1		[-]	0,04					N5
Taktzeiten pro Lage (BM II ohne Prüfung)	N2	30,575	s						N6
Taktzeiten pro Lage (BM II mit Prüfung)	N3	34,275	s						N7
Kalk Zinssatz	N4	8	%						N8
									20
									€/kg

A.7 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstanden am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) sowie nachfolgend in der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten. Die erarbeiteten Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

Studierende(r)	Titel der Studienarbeit
Bauer, T	Entwicklung und Umsetzung eines flexiblen Handhabungssystems zur Untersuchung der Ablegegenauigkeit trockener Faserverbundtextilien
Helmts, J-H	Bewertung und Simulation von Prozessketten zur Fertigung thermoplastischer Faserverbundbauteile hinsichtlich Technologie und Ressourceneffizienz
Hofer, M	Analyse der Prozesssicherheit und -qualität eines sensorbasierten Greifsystems zum roboterunterstützten Handhaben von textilen Faserverbundhalbzeugen
Gruber, K	Simulation und Benchmark einer innovativen Prozesskette zur kosteneffizienten Fertigung thermoplastischer Faserverbundbauteile
Jedelhauser, C	Entwicklung und Anwendung eines Qualitätssicherungssystems für hochautomatisierte Prozesse der Faserverbundfertigung
Kiefer, L	Entwicklung eines sensorunterstützten, formflexiblen Greifers zum prozesssicheren Ablegen formlabiler Faserverbundtextilien
Mayr, M	Konzeption, Konstruktion und Aufbau eines flexiblen Handhabungssystems zum automatisierten Ablegen von Faserverbundhalbzeugen
Messmann, U	Identifikation und Auswahl einer geeigneten Sensorik zur automatisierten Handhabung formlabiler CFK-Textilien
Rieder, M	Entwicklung und Inbetriebnahme eines sensorbasierten Handhabungssystems zum Ablegen von Faserverbundtextilien

Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung zur Erstellung dieser Arbeit.

A.8 Verwendete Softwareprodukte

Bezeichnung	Kontakt
CATIA V5	Dassault Systems Munich, Messerschmittstraße 7, 80992 München
Halcon	MVTec Software GmbH, Arnulfstraße 205, 80634 München
Inkscape	–
Kuka KL	KUKA Roboter GmbH, Zugspitzstraße 140, 86165 Augsburg
LaTeX	–
Microsoft Office	Microsoft Deutschland GmbH, Walter-Gropius-Straße 5, 80807 München
Microsoft Visual Studio	Microsoft Deutschland GmbH, Walter-Gropius-Straße 5, 80807 München
Tecnomatix Plant Simulation	Siemens PLM, 5800 Granite Parkway, Suite 600, 75024 Plano TX USA
Matlab Simulink	MathWorks, Adalperstraße 45, 85737 Ismaning
TwinCAT 3 Beckhoff	Beckhoff Automation GmbH, Oppelner Str. 5, 82194 Gröbenzell
3D Create Visual Components	Visual Components GmbH, Landsberger Strasse 302, 80687 München