

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

**Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung
von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung**

Dipl.-Ing. (FH)
Gerhard Straßer

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: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

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

Die Dissertation wurde am 06.07.2011 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
09.11.2011 angenommen.

Gerhard Straßer

**Greiftechnologie für die automatisierte
Handhabung von technischen Textilien
in der Faserverbundfertigung**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 256

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2012

ISBN 978-3-8316-4161-1

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

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.

Es ist nicht genug zu wissen –
man muss auch anwenden.

Es ist nicht genug zu wollen –
man muss auch tun.

Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts. Sie haben mir die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht. Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart möchte ich mich ausdrücklich für die wohlwollende Förderung sowie großzügige Unterstützung bei der Umsetzung der Arbeit und für seinen prägenden Einfluss auf meinen parallelen Werdegang bedanken. Herrn Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich weitergehend für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Drechsler, dem Inhaber des Lehrstuhls für Carbon Composites der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit herzlich bedanken. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.h.c. Hans-Eberhard Schurk, dem Präsident der Hochschule Augsburg, der mich maßgeblich zu dem Schritt einer Promotion ermutigt hat.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlichst bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts sowie ausdrücklich auch bei allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt hierbei dem Leiter der mechanischen Werkstatt am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Herrn Kurt Hartmann, der zusammen mit seinem Team tatkräftig an der Realisierung der Versuchsaufbauten beteiligt war. Frau M.Sc Claudia Ehinger, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Johannes Scharer, Herrn Dipl.-Ing. Rüdiger Spillner und Herrn Dipl.-Ing. Christian Thiemann danke ich für die enge, konstruktive Zusammenarbeit und die vielen fruchtbaren Diskussionen.

Nicht zuletzt gilt mein aufrichtiger Dank meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widme, und meiner gesamten Familie, die mir die Möglichkeit und die Freiräume sowie die notwendige Unterstützung entgegengebracht haben, um diese Arbeit zu realisieren. 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.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
1.1 Zukunftsperspektiven für die Produktion am Standort Deutschland.....	1
1.2 Faserverstärkte Kunststoffe	3
1.2.1 Potenzial der Werkstoffgruppe.....	3
1.2.2 Herstellungsprozesse und derzeitige Defizite.....	5
1.3 Analyse der produktionstechnischen Aufgabenstellung.....	8
1.3.1 Handhabungseigenschaften formlabiler Bauteile	8
1.3.2 Aufgabenstellung der automatisierten Handhabung textiler Halbzeuge in der Faserverbundfertigung	9
1.4 Zielsetzung und Handlungsfelder.....	11
1.5 Vorgehen und Gliederung der Arbeit	13
2 Stand der Wissenschaft und Technik	15
2.1 Abgrenzung und Fokussierung.....	15
2.2 Prozess- und systemtechnische Analyse.....	15
2.2.1 Begriffe, Definitionen und Einteilung	15
2.2.2 Relevante Teilfunktionen und Systeme	19
2.2.3 Struktur und Klassifikation eines Greifsystems	20
2.2.4 Flexibilisierung von Greifsystemen.....	23
2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien .	26
2.3.1 Erarbeitete Konzepte und realisierte Systeme	26
2.3.2 Anwendbarkeit für die Handhabung technischer Textilien	36
2.4 Entwicklung von Greifsystemen	37
2.4.1 Entwicklungsmethoden für Greifsysteme.....	37

2.4.2	Spezifische Vorgehensmodelle zur Entwicklung von Greifsystemen für formlabile Bauteile	38
2.4.3	Anwendbarkeit für die Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien	39
2.5	Zusammenfassung des Handlungsbedarfs und Fokussierung der Zielsetzung	41
3	Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien.....	43
3.1	Randbedingungen für die Erarbeitung eines methodischen Vorgehens...	43
3.2	Methodisches Vorgehen	44
3.2.1	Adaption bestehender Entwicklungsmodelle und Definition eines methodischen Vorgehens	44
3.2.2	Detaillierung des Vorgehens	47
3.2.3	Ebenen des Entwicklungsprozesses und spezifische Entwicklungswerkzeuge	51
3.2.4	Beschreibung des Referenzszenarios	53
3.3	Analyse der Aufgabenstellung anhand einer Funktionsstrukturierung	54
3.4	Anforderungsanalyse.....	55
3.4.1	Materialspezifische Einflussgrößen	55
3.4.2	Produktspezifische Einflussgrößen	61
3.4.3	Prozessspezifische Einflussgrößen.....	62
3.4.4	Analyse der Flexibilitätsanforderungen	64
3.4.5	Definition eines Anforderungssystems für Greifsysteme zum Absortieren technischer Textilien.....	65
3.5	Erarbeitung eines Greifprinzips	67
3.5.1	Sammlung potenzieller und Auswahl anwendbarer physikalischer Prinzipien.....	67

3.5.2	Experimentelle Evaluierung anwendbarer Prinzipien	70
3.5.3	Bewertung und Auswahl eines Greifprinzips	79
3.6	Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit	86
4	Konzeption und Umsetzung eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems.....	87
4.1	Rahmen und Zielsetzung der Betrachtung.....	87
4.2	Funktionsorientierte Modularisierung eines hochflexiblen Greifsystems.....	87
4.3	Konzeption der Einzelmodule	90
4.3.1	Allgemeines	90
4.3.2	Auswahl einer Verschlussaktuatorik	90
4.3.3	Gestaltung der Abschlussplatte.....	94
4.3.4	Konzeption eines Vakuumsystems	101
4.3.5	Auswahl und Auslegung eines Vakuumerzeugers.....	102
4.3.6	Steuerungs- und Sensorsystem	106
4.3.7	Auswahl eines Trägersystems.....	112
4.3.8	Konzeption eines integrierten Schutzsystems	113
4.4	Gesamtkonzept eines Greifsystems	115
4.4.1	Konzept eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien	115
4.4.2	System- und Prozessmodellierung zur Auslegung von Spezifikationsgrößen und Prozessparametern	116
4.5	Umsetzung eines Funktionsmusters zur Absicherung des Greiferkonzepts.....	122
4.5.1	Notwendigkeit und Zielsetzung der Absicherung	122
4.5.2	Effiziente Gestaltung des Funktionsmusters	123

4.5.3	Grundlegende Validierungsuntersuchung	124
4.6	Prototypische Realisierung des Greifsystems	126
4.6.1	Randbedingungen und Realisierungsgrundlagen	126
4.6.2	Mechanischer Aufbau.....	126
4.6.3	Steuerungstechnik	128
4.6.4	Dynamische, zuschnittsbasierte Positionierung des Greifers	130
4.6.5	Dynamische Differenzdruckregelung.....	135
4.7	Zusammenfassendes Fazit.....	136
5	Experimentelle Validierung des Greifsystems	137
5.1	Validierungsansatz und -szenarios	137
5.2	Versuchsumgebung und eingesetzte Messtechnik	137
5.3	Ziel- und Untersuchungsgrößen	139
5.4	Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse.....	141
5.4.1	Grundlegende Funktionalität.....	141
5.4.2	Flexibilität	144
5.4.3	Untersuchung auftretender Durchströmungszustände und möglicher Optimierungen.....	145
5.4.4	Prozessphase Abheben	149
5.4.5	Prozessphase Transport	154
5.4.6	Prozessphase Ablegen	158
5.4.7	Prozesssicherheitsanalyse.....	160
5.4.8	Prozesszeitanalyse	164
5.4.9	Energieverbrauchsanalyse.....	168
5.5	Zusammenfassende Betrachtung der Anwendbarkeit	170

6 Analyse der Systemrelevanz	171
6.1 Technische Bewertung anhand potenzieller Szenarios der industriellen Nutzung.....	171
6.1.1 Kleinst-Serienfertigung	171
6.1.2 Variantenreiche Kleinserienfertigung.....	172
6.1.3 Voll-automatisierte Serienfertigung	173
6.2 Wirtschaftliche Bewertung	175
6.2.1 Rahmenbedingungen der wirtschaftlichen Bewertung	175
6.2.2 Berechnung statischer Amortisationszeiten der Automatisierungsinvestitionen	178
6.2.3 Berechnung der Montagestückkosten.....	178
6.3 Weitere mögliche Einsatzfelder und Anwendungen	181
6.3.1 Einfacher Transport – Pick&Place	182
6.3.2 Absortieren formlabiler Bauteile	183
6.3.3 Ab stapeln bzw. Stapeln	184
6.3.4 Stapelweise Vereinzeln.....	185
6.3.5 Weitere mögliche Anwendungen	186
6.4 Zusammenfassende Bewertung der Systemrelevanz.....	186
7 Zusammenfassung und Ausblick	187
8 Literaturverzeichnis	191
9 Anhang.....	217

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

Abkürzung/Akronym	Bedeutung
1D, 2D, 3D	ein- , zwei-, dreidimensional
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
Abb.	Abbildung
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design (dt.: rechnergestützter Entwurf)
CF	Carbon Fibre (dt.: Kohlenstofffaser)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CPLD	Complex Programmable Logic Device (dt.: beliebig/frei programmierbarer Logik Baustein)
DE	Deutschland
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIP	Dual-Inline-Package (dt.: zwei parallel angeordnete Reihen – Bezeichnung für Schalter auf Platinen)
DRT	Driven Rotary Tool (dt.: angetriebenes Rundmesser)
dt.	deutsch
et al.	et alii (dt.: und andere)
etc.	et cetera (dt.: und so weiter)
e. V.	eingetragener Verein

Abkürzungsverzeichnis

FAST	Fabric Assurance by Simple Testing (einfache Prüfmethode zur Absicherung textiler Erzeugnisse)
FEM	Finite Elemente Methode
FGW	Form-Gedächtnis-Werkstoff
FPGA	Field Programmable Gate Array (dt.: anwendungsfeld-bezogene programmierbare Gatter-Anordnung)
FVK	Faserverbundkunststoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
Gl.	Gleichung
GUI	Graphical User Interface (dt.: grafische Benutzeroberfläche)
HMI	Human-Machine Interface (dt.: Mensch-Maschine Schnittstelle)
HS	Handhabungssystem
I/O	Input/Output (dt.: Eingang/Ausgang)
ISO	International Standardization Organisation (dt.: Internationale Standardisierungsorganisation)
ITF	International Transport Forum (dt.: Weltverkehrsforum)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (Technische Universität München)
KS	Koordinatensystem
LCD	Liquid Crystal Display (dt.: Flüssigkristallbildschirm)
MA	Mitarbeiter
MAG	Multi-Axial-Gelege
MRF	Magneto Rheologische Flüssigkeit
MVM	Münchener Vorgehensmodell

NASA	National Aeronautics and Space Administration (dt.: Nationale Luft- und Raumfahrt Behörde; USA)
NFS	Niederdruckflächensauger
N.N.	Nomen Nominandum (dt.: unbekannte Person)
NWA	Nutzwertanalyse
o. ä.	oder ähnliche(s)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (dt.: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt.: Erstausrüster – wird oft im Zusammenhang mit großen Fahrzeug- und Luftfahrzeugherstellern verwendet)
OSG	obere Spezifikationsgrenze (Kennwert der FMEA)
PAC	Programmable Automation Controller (dt.: programmierbare Automatiksteuerung)
Pick&Place	feststehender Ausdruck für Aufnahme, Transport und Ablage von Handhabungsgütern ohne Veränderung des Speicherzustandes
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PK	Personalkosten
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
Prepreg	Preimpregnated Fibre (dt.: vorimprägnierte Faser)
PVC	Poly-Vinyl-Chlorid (Kunststoff für Bodenbeläge)
segm.	segmentiert(er)
sequ. Pref.	sequentielles Preforming
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point (dt.: Werkzeugbezugspunkt)

Abkürzungsverzeichnis

TRG	Technologie-Reifegrad
TRL	Technology Readiness Level (dt.: siehe TRG)
UD	Uni Direktional (bezogen auf die Faserorientierung)
US(A)	United States (of America) (dt.: Vereinigte Staaten)
USG	untere Spezifikationsgrenze (Kennwert der FMEA)
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
versch.	verschiebbar
vgl.	vergleiche
WP	Wirkprinzip
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	$\text{m/s}^2, \%$	Beschleunigung Greifersystem
A_{AB}	m^2	Flächenbedarf Absortieranlage
A_G	m^2, mm^2	Greif- bzw. Saugfläche
A_{HS}	m^2	Greiferfläche
A_T	m^2, mm^2	Fläche des Textilzuschnitts
A_O	m^2, mm^2	Öffnungsfläche
AZ_S	a	statische Amortisationszeit
B	$\text{mN} \cdot \text{cm}^2$	Biegesteifigkeit (des Textils)
c_F	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Fluids
c_p	-	Prozesspotentialkennzahl (FMEA)
c_{pK}	-	Prozessfähigkeitskennzahl (FMEA)
d	mm	Öffnungsdurchmesser (Abschlussplatte)
E	-	Energiewert des Optimierungsverfahrens
E_Z	h/a	jährliche Nutzungszeit
ES	€	jährlicher Erlösvorteil
e	V	Regelabweichung
f	-	Öffnungsverhältnis NFS
$f_{g,i}$	-	Gewichtung (Nutzwertanalyse)
$f_{z,i}$	-	Zielwert (Nutzwertanalyse)
F_G	N	Gewichtskraft Textilzuschnitt
F_{GF}	N	Gewichtskraft Fixiereinrichtung

Verzeichnis der Formelzeichen

F_H	N	Haltekraft
F_{HF}	N	Haltekraft Federwaage
F_N	N	Normalkraft
$F_{N, max}$	N	maximale Normalkraft
F_{NF}	N	Normalkraft Fixiereinrichtung
F_Q	N	Querkraft
$F_{Q, max}$	N	maximale Querkraft
F_R	N	Reibkraft
F_S	N	Vorspannkraft
F_T	N	Trägheitskraft
F_V	N	Verhakungskraft
g	m/s ² , N/kg	Erdbeschleunigung
G	g/m ² , kg/m ²	Flächenmasse
i	-	Instandhaltungssatz
k	€m ²	Raumkostensatz
K_A	€a	kalkulatorische Abschreibung
K_B	€a	jährliche Betriebskosten
K_E	€a	jährliche Energiekosten
K_I	€a	jährliche Instandhaltungskosten
K_M	€h	Montagekosten
K_{MH}	€a	Maschinenstundensatz
K_{P-A}	€a	jährliche Personalkosten Absortieren
K_{P-B}	€a	jährliche Personalkosten Anlagenbetreuung
K_{Per-A}	€h	Personalkostensatz Absortieren

K_{Per-B}	€/h	Personalkostensatz Anlagenbetreuung
K_R	€/a	jährliche Raumkosten
K_{ST}	€/Stck	Montagestückkosten
K_{WB}	€, T€	Wiederbeschaffungswert
K_Z	€/a	kalkulatorische Zinsen
l_x, l_y, l_Δ	mm	Öffnungsmittenabstände verschiedener Bohrungsmuster
L_P	dB	unbewerteter Schallpegel
$L_{ÜG}$	mm	Grenzüberhangslänge
m_T	g, kg	Masse des textilen Zuschnitts
M, N	-	Koeffizienten der Durchströmungsgleichung für Textilien
n, n_{offen}	-	Anzahl geöffneter Bohrungen
$n_{\text{geschl.}}$	-	Anzahl geschlossene Bohrungen
n_{MA-A}	-	Anzahl Mitarbeiter Absortieren
n_{MA-B}	-	Anzahl Mitarbeiter Anlagenbetreuung
n_{St}	-	Jahresstückzahl
n_{Vak}	-	Anzahl Vakuumerzeuger
N_D	a	Nutzungsdauer des Systems
N_L	Stck/h	Nettoleistung des Systems
$N_{TNW, i}$	-	Teilnutzwert einer Alternative i (NWA)
$N_{GNW, i}$	-	Gesamtnutzwert einer Alternative i (NWA)
OSG, USG	mm	obere/untere Spezifikationsgrenze (FMEA)
P_e	W, kW	elektr. Leistungsaufnahme
P_{eA}	W, kW	elektr. Leistungsaufnahme Schließaktorik

Verzeichnis der Formelzeichen

P_{eR}	W, kW	elektr. Leistungsaufnahme Roboterkinematik
P_{eS}	W, kW	elektr. Leistungsaufnahme Steuerungssystem
P_{eV}	W, kW	elektr. Leistungsaufnahme Vakuumerzeuger
p_i	Pa, mbar	Innendruck Greifsystem an der Abschlussplatte
p'_i	Pa, mbar	Innendruck Greifsystem im Reinraum
p_H	Pa, mbar	Handhabungsdruck
p_Z	Pa, mbar	Zwischendruck
p_{OO}	Pa, mbar	Umgebungsdruck
P_L	%	Leistungslevel Vakuumerzeuger
r_B	-	Anisotropie Biegesteifigkeit
$r_{LÜG}$	-	Anisotropie Grenzüberhangslänge
$r_{\mu D}$	-	Anisotropie Reibungsverhalten
R	mm/s, m/s	Luftdurchlässigkeit oder Permeabilität
R_{200Pa}	mm/s, m/s	Luftdurchlässigkeit bei 200 Pa Differenzdruck
R_B	mm/s, m/s	Luftdurchlässigkeit im Betrieb
R_p, R_T, R_U	Ω	Widerstände im elektr. Ersatzschaltbild (Platte, Textil und Unterlage)
s	mm	orthogonaler Abstand einer Bohrungsmitte zur Zuschnittskante
\bar{s}	mm	mittlerer orthogonaler Abstand aller Bohrungs- mitten zur Zuschnittskante
s_G	mm	kumulierter orthogonaler Abstand aller Boh- rungsmitten zur Zuschnittskante
S	-	Sicherheitsfaktor
t_A	mm	Dicke Abschlussplatte
t_T	mm	Dicke Textil

$T_{\varepsilon=2\%}$	s	Beruhigungszeit (Regelgröße innerhalb 2%-Toleranzband)
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
U_{ERZ}	V	Steuerspannung am Vakuumzeuger
U_P, U_T, U_U	V	Spannungen im elektr. Ersatzschaltbild (Platte, Textil und Unterlage)
U_{Sen}	V	Ausgangsspannung Drucksensor
\dot{V}	m ³ /min, l/s	Volumenstrom
\dot{V}_{ERZ}	m ³ /min, l/s	erforderlicher Volumenstrom Vakuumzeuger
\dot{V}_{Ges}	m ³ /min, l/s	Gesamtvolumenstrom durch das Greifermodul
\dot{V}_n	m ³ /min, l/s	Volumenstrom durch Abschlussplatte eines Greifermoduls
\dot{V}'	m ³ /min, l/s	Fehlluftstrom durch den Reinraum
w	V	Führungsgröße Regelkreis
x_Z	mm	Position Greifer in x-Richtung
x'_Z	mm	Position Fixiervorrichtung in x-Richtung
x, y, z	-	Raumrichtungen Koordinatensystem
z_Z	mm	Position Greifer in z-Richtung
z'_Z	mm	Position Fixiervorrichtung in z-Richtung
α_G	°	Grenzwinkel: Bestimmung des Abklappverhaltens
δ	-	Standardabweichung
ε	°	Bewegungswinkel Greifsystem
ε_D	%	Dehnung
φ	°	Neigungswinkel Greifsystem
η	N*s/m ²	Dynamische Viskosität

Verzeichnis der Formelzeichen

ν	m^2/s	Kinematische Viskosität
$\zeta_{E, A}$	-	Verlustkoeffizienten für Ein- und Ausströmen
ρ_F	kg/m_3	Fluiddichte
ρ_T	kg/m_3	Textildichte
μ	-	Mittelwert
μ_D	-	minimaler dynamischer Reibungskoeffizient
μ_H	-	Haftreibungskoeffizient
Δh	V	Überschwingweite (Druckregelung)
Δp	Pa, mbar	Differenzdruck
Δp_B	Pa, mbar	Betriebsdifferenzdruck
Δp_{ERZ}	Pa, mbar	erforderlicher Differenzdruck Vakuumerzeuger
Δp_{Ges}	Pa, mbar	Gesamt-Differenzdruck
Δp_H	Pa, mbar	Handhabungsdifferenzdruck
Δp_i	Pa, mbar	Innendifferenzdruck
Δp_P	Pa, mbar	Differenzdruck an der Abschlussplatte
Δp_T	Pa, mbar	Differenzdruck am Textil
Δp_U	Pa, mbar	Differenzdruck an der Unterlage
Δp_V	Pa, mbar	Druckverlust
$\Delta p_{V, HS}$	Pa, mbar	Druckverlust gesamtes Handhabungssystem
$\Delta t_{A, T, L}$	s	Taktzeit: Aufnahme, Transport, Ablage
Δt_{AL}	s	Taktzeit Ablösen
Δx	mm	Zuglänge bei Querkraft
$\Delta x_{T, L}$	mm	Verschiebung x-Richtung bei Transport/Legen
$\Delta y_{T, L}$	mm	Verschiebung y-Richtung bei Transport/Legen

Δz	mm	Zuglängen bei Normalkraft
$\Delta z_{A, L}$	mm	senkrechter Abstand bei Abheben (A) und Ablegen (L)
\dots_A	-	Indizes Abhebephase
\dots_L	-	Indizes Ablegephase
\dots_T	-	Indizes Transportphase

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Zukunftsperspektiven für die Produktion am Standort Deutschland

Der Produktionsstandort Deutschland steht vielfältigen Herausforderungen, so genannten Megatrends, gegenüber, deren Bewältigung essentiell für die nachhaltige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit nationaler Unternehmen und des damit verbundenen gesellschaftlichen Wohlstands ist (REINHART ET AL. 2010A, ABELE & REINHART 2011). Dabei subsummiert die fortschreitende Globalisierung Risiken und Chancen zugleich: Zum einen vergrößern sich hierdurch die Absatzmärkte für deutsche Konsum- sowie Investitionsgüter zunehmend (GEHLE-DECHANT ET AL. 2010). Weitergehend führt der anhängige Anstieg des Transport- und Reiseaufkommens zu einer Stärkung wichtiger Schlüsselbranchen wie der Automobil- und der Luftfahrtindustrie (EUROPEAN COMMISSION 2009, ITF 2010). Zum anderen stehen die produzierenden Unternehmen durch den weltweiten Wettbewerb unter einem enormen Kostendruck, der hinsichtlich der hohen Lohnkosten nicht selten in der Verlagerung von Wertschöpfung und somit letztlich auch in den Abbau von Arbeitsplätzen mündet (LOOS 2001, REINHART & HAGEMANN 2007) (vgl. *Abbildung 1*).

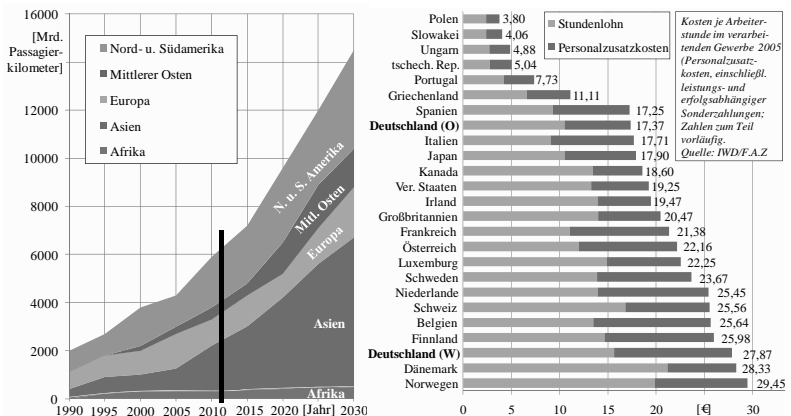


Abbildung 1: Links: Entwicklung und Prognose des internationalen Passagieraufkommens im Luftverkehr in Anlehnung an OECD 2008; Rechts: Lohnkostenvergleich im verarbeitenden Gewerbe in Anlehnung an ALTMANN 2007

1.1 Zukunftsperspektiven für die Produktion am Standort Deutschland

Welche Zukunftsperspektiven ergeben sich aus diesem Szenario für die industrielle Produktion als zweitgrößten Arbeitgeber Deutschlands hinter dem Dienstleistungssektor und mit großer Breitenwirksamkeit (ABELE & REINHART 2011, REINHART & HAGEMANN 2007)? Die reine Rationalisierung der Herstellungsprozesse mittels Automatisierung kann hierbei durch erhöhte Produktivität nur temporäre Wettbewerbsvorteile sichern und bildet daher lediglich die Basis für eine zukunftsweisende Lösung (REINHART & HAGEMANN 2007, BREUN & SUSANEK 2006). Vielmehr birgt die Konzentration auf Spitzentechnologien und neuartige Materialien sowie die Fokussierung auf hochwertige, komplexe Produkte und Wertschöpfungsanteile mit hohem Qualitäts- und Qualifikationsanspruch das Potenzial für nachhaltiges Wachstum (SOMMERLATTE 2001, GÖSCHEL 2006, BREUN & SUSANEK 2006). Innovation ist daher unverzichtbar, wobei diese gleichermaßen auf Produkt- wie auf Produktionsebene darzustellen ist, um durch Brancheninnovation langfristig für günstige Marktchancen zu sorgen (HOFFMANN ET AL. 2006, ZÄH ET AL. 2006, REINHART & HAGEMANN 2007). In der Fertigungskette dominieren nach wie vor personalintensive Montageprozesse die Kosten und auch die Qualität von Erzeugnissen (REINHART 2006, LOTTER & WIENDAHL 2006). Maßgeblich führen hierbei Faktoren wie hohe Variantenvielfalt, kleine Losgrößen und kurze Produktzyklen zu einer unzureichenden Automatisierung sowie Rationalisierung, da die resultierenden Flexibilitätsanforderungen an die Montageanlagen hinsichtlich komplexer Produkte nicht wirtschaftlich erfüllt werden können (PETERS 2008, FELDMANN & SLAMA 2001, MICHALOSA ET AL. 2010, REINHART 2009). Will man den erheblichen, produzierenden Teil der Wertschöpfungskette langfristig in Deutschland halten, so gilt es die Flexibilität der Montage im Allgemeinen und der Anlagentechnik wie beispielsweise Handhabungseinrichtungen im Besonderen zu erhöhen.

Vor dem skizzierten Hintergrund ist derzeit kaum eine Technologie von ähnlicher Relevanz wie die Herstellung von Faserverbundkunststoffen (FVK). Im aktuellen Umfeld treffen mehrere ökonomische, ökologische und gesellschaftspolitische Strömungen zusammen und potenzieren dabei die technischen Möglichkeiten der neuen Werkstoffgruppe besonders in deren Anwendung zur Senkung des Energiebedarfs durch Leichtbaustrukturen beim Transport von Personen und Gütern (DUFLOU ET AL. 2009, NEITZEL & MITSCHANG 2004, DRECHSLER 2008). Während die Innovation auf Produktebene in den letzten Jahrzehnten vorangetrieben wurde, liegt die zur Verfügung stehende Produktionstechnik für die montage- und handhabungsintensive Herstellung speziell komplexer, langfaserverstärkter Erzeugnisse weit zurück (REINHART ET AL. 2010B, DRECHSLER 2008, VOGGENREITER 2010; vgl. *Abschnitt 1.2*). Das Bestreben, den

internationalen Wettbewerb in diesem Umfeld positiv für den Standort Deutschland mit seiner etablierten Automobil-, Luftfahrt- aber auch Windenergieindustrie zu gestalten, resultiert somit in einem Zwang zur effizienten Automatisierung der Prozessketten. Die vorliegende Arbeit soll hierbei einen Beitrag im Bereich der Greiftechnik zur automatisierten Handhabung von textilen Faserverbund-Halbzeugen leisten, da diese Vorgänge zu einem maßgeblichen Teil manuell durchgeführt werden und aufgrund vieler Einzelprozesse von erheblicher Relevanz für die Verkettung der Fertigungsschritte sind. Zu einem besseren Verständnis der Randbedingungen führen die folgenden Abschnitte in die Herstellung von FVK-Strukturen ein und leiten daraus die dieser Arbeit zugrundeliegende Motivation ab. Auf der Basis einer Analyse der produktionstechnischen Aufgabenstellung werden im Folgenden notwendige Handlungsfelder definiert sowie die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit formuliert.

1.2 Faserverstärkte Kunststoffe

1.2.1 Potenzial der Werkstoffgruppe

Die Begriffe *Faserverstärkter Kunststoff* und *Faserverbundkunststoff (FVK)* bezeichnen nach NEITZEL & MITSCHANG (2004) und REYNE (2008) die synergetische Kombination von mindestens zwei nicht-mischbaren Materialien – *Faser* als Verstärkungsmittel und *Matrix* als Bettungs- oder Bindemittel – zu einem heterogenen Werkstoff. Im industriellen Sprachgebrauch haben sich auch weitere Begriffe wie *Composite(-Werkstoff)* für die gesamte Werkstoffgruppe etabliert, welche sich wie folgt in vielfältiger Weise untergliedern lässt (EHRENSTEIN 2006, FLEMMING ET AL. 1995, BAIER 2008):

- Art der Faser in endlich (*Kurzfaser*) und endlos (*Langfaser*)
- Faserwerkstoff (anorganisch, organisch, metallisch, Natur, ...)
 - *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)*
 - *Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)*
 - *Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)*
- Matrixwerkstoff (u. a. in *thermo-* und *duroplastische Verbünde*)

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich langfaserverstärkte Kunststoffe behandelt, da sich Anwendung und Herstellung grundsätzlich von Kurzfaserverbünden unterscheiden, welche meist in Spritzgießtechnik hergestellt werden.

Die Besonderheit, dass der Werkstoff erst während der Fertigung entsteht, ist die Grundlage für die hervorragenden Eigenschaften dieser Materialgruppe, da

1.2 Faserverstärkte Kunststoffe

sowohl die Wahl der Faser-Matrix-Kombination als auch deren geometrischer Aufbau individuell an den Anwendungsfall angepasst werden kann (BAIER 2008). Die hochfesten Fasern nehmen die eingeleiteten Lasten (ausgenommen Druckspannungen) auf, wohingegen die Matrix diese vor äußeren Einflüssen schützt und deren Anordnung im Verbund fixiert (NEITZEL & MITSCHANG 2004). Neben den vielfältigen positiven Eigenschaften, wie beispielsweise Korrosionsbeständigkeit, zeichnen sich FVK durch hohe Zugfestigkeit sowie Steifigkeit aus und ermöglichen bei werkstoffgerechter Bauteilkonstruktion Gewichtseinsparungen von 25 % gegenüber Aluminium- und 50 % gegenüber Stahl-Strukturen (EHRENSTEIN 2006, NEITZEL & MITSCHANG 2004; vgl. *Abbildung 2*). Aufgrund dieses enormen Leichtbaupotenzials steigt die Nachfrage nach FVK auf der Basis neuer Anwendungsfelder stetig, wie *Abbildung 2* am Beispiel der Kohlenstofffaser deutlich zeigt (vgl. auch KARL 2010).

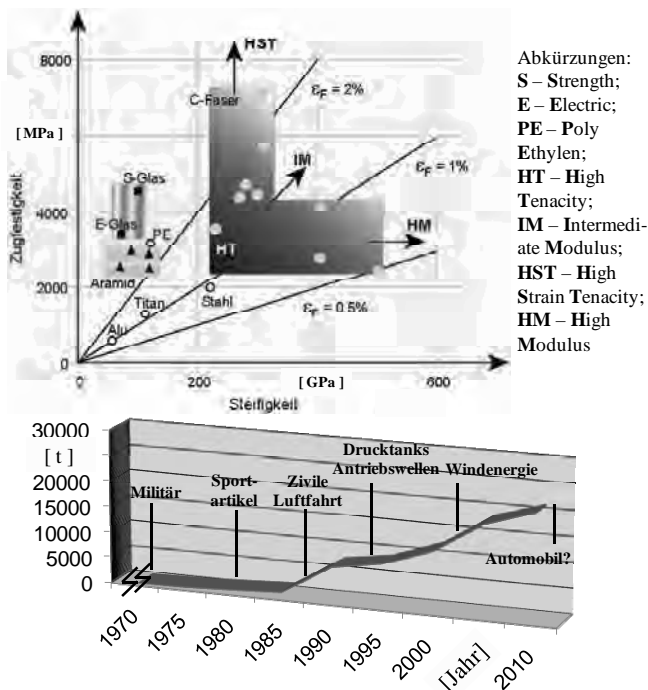


Abbildung 2: Eigenschaften typischer Verstärkungsfasern im Vergleich zu metallischen Werkstoffen (oben; DRECHSLER 2006) und Anstieg des Bedarfs an Kohlenstofffasern in Abhängigkeit neuer Anwendungen (unten; in Anlehnung an NEITZEL & MITSCHANG 2004)

Während derzeit insbesondere die Luftfahrt die industrielle Anwendung dieses Werkstoffes in Verkehrsflugzeugen und Hubschraubern vorantreibt (SCHEITLE 2008, VOGGENREITER 2010, PANTELAKIS ET AL. 2009), was zu zweistelligen Wachstumsraten in den letzten Jahren führte, steht nun die automobiler Serienfertigung auf der Basis etablierter Kleinserienbeispiele im Sportwagensegment kurz vor dem Einstieg in die Technologie (REITHOFER 2010, BUCHNER & FREI 2008, PUDENZ 2010, DURST 2008). Wie eingangs dargestellt, hängt der nachhaltige Nutzen, der für den Standort Deutschland aus dem Potenzial der Werkstoffgruppe zu generieren ist, erheblich von der Geschwindigkeit ab, mit der die Produktionstechnik der erbrachten Produktinnovation folgen kann.

1.2.2 Herstellungsprozesse und derzeitige Defizite

So unterschiedlich die Automobil-, Windenergie- oder auch die Luft- und Raumfahrtbranche in ihren Anforderungen und Fertigungsstrategien hinsichtlich Taktzeit sowie Ausbringung auch sind, das jeweilige Potenzial faserverbundbasierter Werkstoffe wird maßgeblich durch die fehlende Automatisierung der Herstellungsverfahren und die damit verbundenen Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitseinschränkungen reduziert (WULFSBERG ET AL. 2010, VERDENHALVEN 2008, BOTH ET AL. 2010). Eine Betrachtung derzeitiger Herstellungsprozesse soll im Folgenden Ursachen und Ansatzpunkte bezüglich der bestehenden Defizite aufzeigen.

Derzeit existieren vielfältige Prozessketten zur Herstellung von FVK-Strukturen auf Basis einzelner Fasern bzw. Faserbündel, so genannter Rovings (vgl. *Abbildung 3*). Nach DRECHSLER (2006) kann grundsätzlich zwischen Prepreg- und Preform-Technik unterschieden werden. Während Erstere harzgetränkte oder auch vorimprägnierte Halbzeuge als Ausgangsstoffe für Fliess- oder Drapier-Prozesse nutzt, basiert Preforming auf „trockenen“, textilen Halbzeugen, welche erst nach dem Umformen mit Harz infiltriert werden (ERMANNI 2007). Je nach Produktgeometrie, Stückzahl, Lastfällen und Bauweise empfehlen sich unterschiedliche Verfahrensvarianten, wobei diejenigen ohne textile Vorprozesse den entscheidenden Nachteil haben, dass die Faserorientierung nicht gerichtet erfolgen kann.

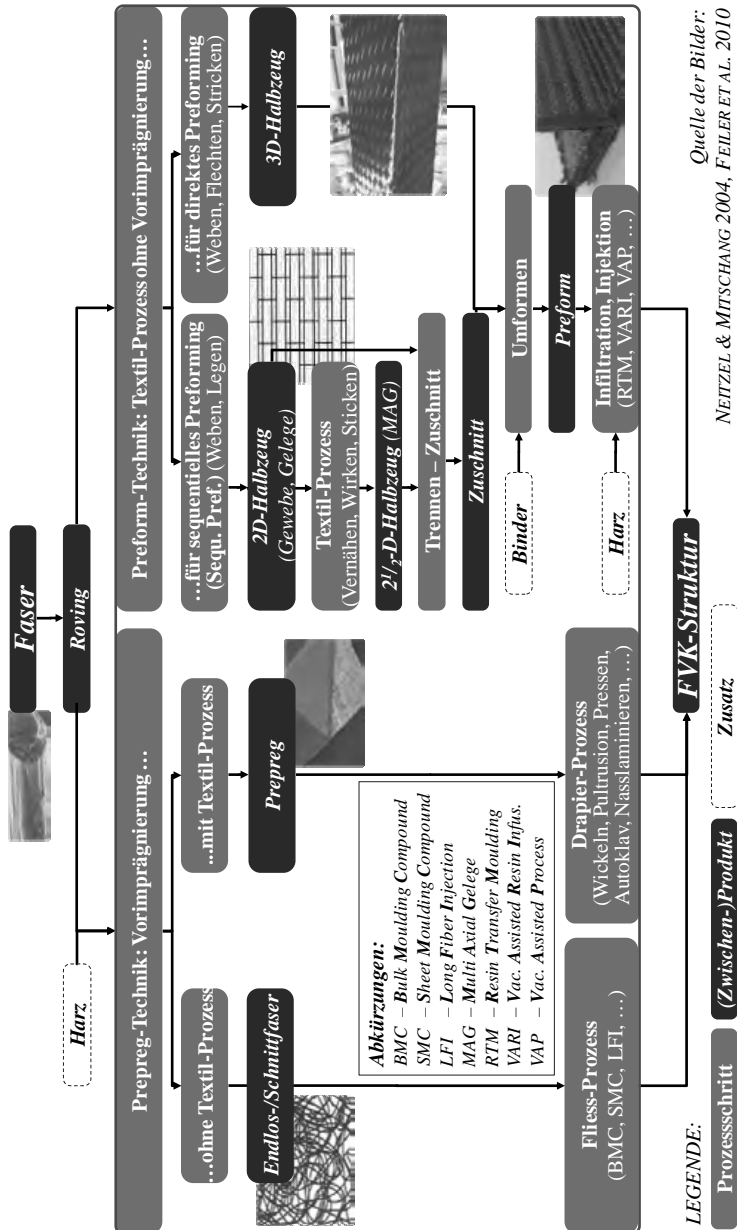


Abbildung 3: Mögliche Prozessketten zur Herstellung von FVK-Strukturen

Preforming-Prozessketten verfügen trotz kleinerer Faservolumengehalte über wesentliche Vorteile, die derzeit zu einem Trend in der Anwendung trockener, textiler Halbzeuge führen (CHOKRI 2008, BOTH ET AL. 2010):

- hohe geometrische Gestaltungsfreiheitsgrade durch angepasste Verfahren (Hohlprofile durch Flechten, Schalelemente durch Sequ. Pref.)
- Kostenvorteile durch Reduktion von investitionsintensiver Anlagentechnik (Tapeleger, Autoklav) und von Lagerungsaufwand (keine Kühlung) (OSTHUS 1996, MILLS 2001, PANTELAKIS ET AL. 2009)
- hohe Ausbringungspotenziale (Legeraten) durch Sequ. Pref.
- vergleichsweise gute Automatisierbarkeit der Einzelprozesse u. a. auf der Basis von Textilmaschinen (Halbzeugherstellung, Zuschnitt, Infiltration)
- gute Recyclingfähigkeit durch Harzfreiheit bis zum Ende der Prozesskette

Trotz dieser positiven Aspekte begleiten bedeutende Defizite die Herstellung von FVK-Strukturen auf der Basis textiler Halbzeuge (REINHART ET AL. 2010C). Neben den hohen Werkstoffkosten, speziell kohlenstoffbasierter Ausgangsmaterialien, ist die fehlende Automatisierung der gesamten Prozesskette das bedeutendste Hemmnis (VERDENHALVEN 2008, VOGGENREITER 2010, WULFSBERG ET AL. 2010, GREB ET AL. 2010, POTLURI & ATKINSON 2003). Die Dominanz manueller Vorgänge kann hierbei u. a. auf verschiedene Randbedingungen zurückgeführt werden:

- bisher kaum Automatisierungsdruck bei Nischenprodukten und Kleinserien in High-Tech-Branchen (z. B. Militär, Luft-/Raumfahrt, Sportartikel, Motorsport)
- vielfältige Prozessketten mit komplexen Einzelprozessen und neuartigen Werkstoffen sowie Halbzeugen
- fehlende Verkettung der Einzelprozesse in Werkstattfertigungen
- hohe Qualitätsanforderungen bei komplexen Prozessen (z. B. Raumfahrt)
- Die extreme, prinzipbedingte Variantenvielfalt selbst in der Serienproduktion führt zu hohen Flexibilitätsforderungen, da ein Bauteil aus unterschiedlichsten Zuschnitten (Geometrie und Halbzeugart) besteht.

Zusammenfassend ist die effiziente und qualitätsbewusste Darstellung der Prozesskette für FVK-Strukturen insbesondere abhängig von der Entwicklung und Bereitstellung automatisierter Handhabungseinrichtungen für technische Textilien, die den dargestellten Randbedingungen genügen (POTLURI & ATKINSON 2003). Bis dato existieren im industriellen Umfeld kaum entsprechende Lösungen (SZIMMAT 2007, GUTSCHE 1993, SARHADI 1990, SELIGER ET AL. 2003, FEILER ET AL. 2010, SAADAT & PING 2002).

1.3 Analyse der produktionstechnischen Aufgabenstellung

1.3.1 Handhabungseigenschaften formlabiler Bauteile

Eine Analyse der produktionstechnischen Randbedingungen soll im Folgenden die Aufgabenstellung bei der automatisierten Handhabung technischer Textilien in der Faserverbundfertigung herausarbeiten. Hierzu sind zunächst das Handhabungsgut und dessen Eigenschaften zu betrachten, wobei textile Halbzeuge aus handhabungstechnischer Sicht maßgeblich als *flächige formlabile Bauteile* einzuordnen sind. Nach HOßMANN (1992) haben bei Bauteilen dieser Klasse insbesondere die Formmerkmale Auswirkungen auf das Automatisierungskonzept. Flächenförmige Körper weisen demnach ein kleines Längen-Breiten-Verhältnis in Bezug auf das Dicken-Längen-Verhältnis auf (DIESS 1986, DIESS 1988). Aus der Literatur sind bisher die Begriffe *nicht-formstabil* (MILBERG ET AL. 1987, SCHNEIDER 1999, MILBERG & HOßMANN 1989), *forminstabil* bzw. *formlabil* (REINHART 1988), *biegeschlaff* (WARNECKE & FRANKENHAUSER 1986) und *biegeweich* (JODIN 1991) bekannt (engl.: *limp* oder *non-rigid*; TAYLOR & TAYLOR 1990, SELIGER ET AL. 2003), welche üblicherweise undifferenziert verwendet werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der präzisere Begriff *formlabil* in Anlehnung an GÖTZ (1991) angewendet und bezeichnet Körper, welche unter Einfluß von Schwerkraft, Reibungs- oder Fügekraften und -momenten eine Verformung durch Stauchung, Streckung, Biegung, Verdrehung oder Volumenänderung in einer oder mehreren Dimensionen erfahren. Eine Auswahl an flächigen formlabilen Bauteilen sind u. a. Folien, Teppiche, dünne Bleche, Leder und Textilien (GUTSCHE 1993, SAADAT & PING 2002). Für den geringen Automatisierungsgrad bei der Handhabung derartiger Bauteile existiert eine Vielzahl von Ursachen (GÖTZ 1991, KROCKENBERGER 1995, JODIN 1991), welche im Hinblick auf die Faserverbundfertigung wie folgt konkretisiert werden können:



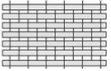
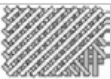
- geringe Biegesteifigkeit um eine oder zwei Flächenachsen
- schwer vorhersehbare Verformung und damit Schwerpunktlage bei punktueller Einleitung der Greifkraft
- niedriger Elastizitätsmodul, kleine Drucksteifigkeit, sensible Oberfläche
- geringe Verfügbarkeit zuverlässiger Automatisierungskomponenten

Flächige formlabile Materialien sind demnach insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass ihnen während der Handhabung durch das Werkzeug eine definierte Form aufgeprägt werden muss (HOßMANN 1992). Eine prozesssichere Handhabung wird folglich von einer flächigen Krafteinleitung über die gesamten Abmessungen des Objekts hinweg begünstigt, um den Ordnungszustand durch geometrische Bestimmtheit aufrecht zu erhalten.

1.3.2 Aufgabenstellung der automatisierten Handhabung textiler Halbzeuge in der Faserverbundfertigung

Eine detaillierte Analyse auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse bzgl. formlabiler Materialien lässt die Konkretisierung hinsichtlich der auftretenden textilen Halbzeuge und resultierenden Handhabungsprozesse bei der Herstellung von FVK zu. Im Hinblick auf die Vielzahl an möglichen Prozessketten sowie der in *Abschnitt 1.2.2* getroffenen Potenzialeinschätzung und der Einschränkung auf flächige Körper, fokussiert sich die folgende Betrachtung auf 2D-Halbzeuge für sequentielles Prefoming (vgl. *Abbildung 3*). Die hierbei angewendeten Halbzeuge lassen sich in die Gruppe der *technischen Textilien* einordnen und werden innerhalb dieses vielschichtigen Bereichs mehrheitlich als *Faserverbund-, Verstärkungs- oder Composite-Textilien* bezeichnet (DENNINGER 2009, BYRNE 2000, WULFHORST 1998). Neben dem vielfältigen, zum Einsatz kommenden Werkstoffspektrum zeichnet sich diese Materialgruppe durch eine Fülle an möglichen Darstellungsformen aus (vgl. *Abschnitt 1.2.1*), welche in Folge der textiltechnischen Verarbeitung entstehen (vgl. auch DRECHSLER 1992). Die wichtigsten Vertreter sind in *Tabelle 1* aufgeführt (DIN 1969, DIN 2007, NEITZEL & MITSCHANG 2004).

Tabelle 1: Verbreitete 2D- und 2¹/₂D-Halbzeuge der Faserverbundfertigung

Textiles Halbzeug	Beschreibung	Beispiel(e)			
Gewebe (engl.: woven fabric)	Rechtwinklig verkreuzte Fadensysteme – Kette und Schuß		Atlas- bindung 1/4		Kreuz- körper- bindung 1/3
Gelege (engl.: non crimp fabric)	Anordnung nicht ondulierter Faserbündel – meist durch dünnen Webfaden fixiert		Unidirektionales Gelege (lediglich dünne Webfäden zur Fixierung)		
Multi-Axial-Gelege (MAG)	Mehrlagige, meist vernähte Anordnung von Gelegen		Quatrxiales Gelege aus unterschiedlichen Rovingsstärken		

Aus der Literatur und *Abbildung 3* lassen sich, bezogen auf diese Halbzeuge in der Faserverbundfertigung, auftretende Handhabungsprozesse ableiten (SARHADI 1990, SZIMMAT 2007, GUTSCHE 1993). Diese fokussieren sich einerseits auf einen Vereinzelungsprozess nach dem automatisierten Zuschnitt, wobei unterschiedlichste Konturen von der Oberfläche des Schneidtisches aus einem flächigen Verbund zu entnehmen sind (*Absortieren*). Andererseits werden auch folgende Transportprozesse (*Pick&Place*) der einzelnen Textilien zu weiteren Arbeitsstationen thematisiert (vgl. auch *Abschnitt 2.2*). Schließlich kann durch Auflegen, Drapieren und Fixieren der Halbzeuge die *Montage* zu einem

1.3 Analyse der produktionstechnischen Aufgabenstellung

Preform erfolgen. In der Literatur sowie aus der Analyse derartiger Produktionsumgebungen bei Herstellern von Faserverbundstrukturen ergibt sich durchweg, dass derzeit kaum automatisierte Handhabungssysteme eingesetzt werden. SZIMMAT (2007) beispielsweise konstatiert, basierend auf einer umfassenden Befragung, dass 80 % der Handhabungsschritte nicht automatisiert sind und das Absortieren vom Schneidisch sogar ausschließlich manuell erfolgt. Die Ursache für diesen Sachverhalt ist vorwiegend im Fehlen geeigneter Greifsysteme zu suchen, welche, additiv zu den aufgezeigten Handhabungseigenschaften formlabiler Materialien, folgenden Besonderheiten von textilen Flächenkörpern gerecht werden müssen (SARHADI 1990, JODIN 1991, KOCH 1992, ONO 2000, STEPHAN 2001, GREB ET AL. 2009):

- schwer erfassbare, inhomogene Materialeigenschaften (Anisotropie)
- hohe Luftdurchlässigkeit
- Materialbeschädigung durch klassische Greiftechnologien (z. B. Nadel)
- kleine Losgrößen bei hoher Varianten- und Werkstoffvielfalt
- z. T. erhebliche Ausmaße der Zuschnitte von mehreren Quadratmetern bei willkürlicher Konturierung
- undefinierte Verhakungskräfte an Flächen und Kanten (v. a. durch Schneidprozesse) führen zu Prozessunsicherheiten

Insbesondere beim Absortieren von einem Schneidisch erhöhen vor diesem Hintergrund noch weitere Forderungen den Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellung, da die Greifkraft zum einen sehr schonend und möglichst flächig wirken muss. Zum anderen darf die Flächenausdehnung der Krafteinleitung nicht über die Grenzen des zu vereinzelnden Zuschnitts hinausgehen, um nicht angrenzende Zuschnitte oder Abfallteile zu beeinflussen. Die prinzipbedingte Konturvielfalt bei Faserverbundbauteilen erfordert folglich ein flächenselektiv arbeitendes Greifsystem als Grundlage der Prozessautomatisierung (STRABER 2010A).

Der derzeitige Einsatzfokus von Faserverbundstrukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie verschärft dies weitergehend. Zunächst sind die Qualitätsansprüche in diesem Bereich, bezogen auf sowohl Material- und Strukturintegrität der Textilien, als auch auf Prozesssicherheit und -nachverfolgbarkeit, extrem hoch (MERSMANN 2011, REINHART ET AL. 2009B). Weitergehend potenzieren sich durch das Produktionsportfolio – kleine Stückzahlen und viele unterschiedliche, komplexe Bauteile – die Variantenvielfalt an zu handhabenden Zuschnitten und damit die geforderte Flexibilität des Greifsystems (REINHART ET AL. 2010D). Während in diesem Bereich derzeit noch vorwiegend mit einlagigen Materialsystemen gearbeitet wird, lässt die aktuelle Planung der automobilen

Serienproduktion von Faserverbundbauteilen aufgrund wesentlich höherer Stückzahlen und Erzeugungsleistungen einen Trend zur mehrlagigen Verarbeitung und Handhabung erkennen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Herausforderungen für die automatisierte Handhabung von textilen Halbzeugen in der Faserverbundfertigung konstatieren (REINHART & STRABER 2011):

- Die erhebliche geometrische Produkt- und Halbzeugdiversifikation bei kleinen Stückzahlen sowie die Verarbeitung vielfältiger Werkstoff- und Halbzeugvarianten resultiert in hohen Flexibilitätsforderungen.
- Durch die komplexen Handhabungseigenschaften der formlabilen Körper werden spezialisierte Technologien und Systeme benötigt. In Bezug auf den zentralen Prozessschritt des Absortierens vom Schneidisch werden explizit Greifsysteme benötigt, die in der Lage sind, die Haltekraft flächenselektiv aufzubringen.
- Der Einsatz in Hochtechnologie-Branchen erfordert hohe Prozesssicherheit, insbesondere im Hinblick auf die Werkstoff- und Strukturintegrität, sowie hohe Reproduzierbarkeit bei steigenden Ausbringungsleistungen.

1.4 Zielsetzung und Handlungsfelder

Die dargestellte Aufgabenstellung zeigt auf, dass bisher kaum automatisierte Greifsysteme zur Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung eingesetzt werden. Die vielfältigen technischen Hindernisse und Herausforderungen, in Verbindung mit dem erläuterten Potenzial für den Hochtechnologie-Standort Deutschland, rechtfertigen eine wissenschaftliche Betrachtung der Zusammenhänge im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

Als globale Herausforderung lässt sich somit die Automatisierung von Handhabungsprozessen für technische Textilien auf der Basis hochflexibler Greifsysteme formulieren. Die daraus abgeleitete wissenschaftliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung einer Entwicklungssystematik für derartige Greifsysteme sowie die darauf basierende Realisierung eines hochflexiblen Greifers zur Handhabung technischer Textilien in der Faserverbundfertigung (vgl. *Abbildung 4*).

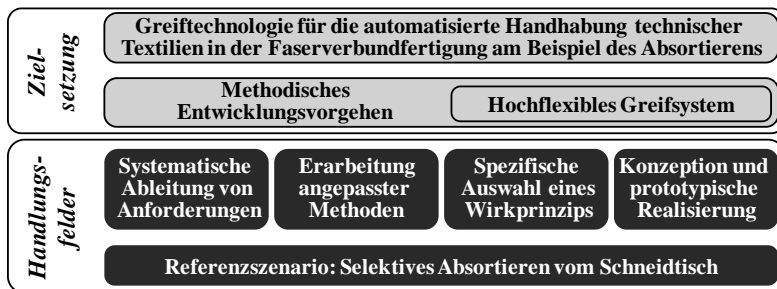


Abbildung 4: Zielsetzung und resultierende Handlungsfelder der Arbeit

Im Einzelnen soll neben einem derartigen, prototypischen System insbesondere ein entsprechendes methodisches Entwicklungsvorgehen entstehen, welches über das zu erforschende System hinaus auf ähnliche Anwendungsfälle übertragbar ist und somit einen nachhaltigen Mehrwert schafft. Der Fokus liegt hierbei auf der fundierten Auswahl des einzusetzenden Greifprinzips und der strukturierten Konzeption des Greifsystems. Zum einen kann somit eine Realisierungsstudie erzeugt werden, welche als Grundlage für analoge Fragestellungen zur Verfügung steht und zum anderen dem Entwickler ein wissenschaftlich fundiertes Vorgehen an die Hand gegeben werden.

Als erstes Handlungsfeld ergibt sich folglich die systematische Ableitung von Anforderungen aus dem anvisierten produktionstechnischen Einsatzfeld des Greifsystems, auf dessen Basis weitergehend die Konzeption und prototypische Realisierung durchzuführen sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dies anhand eines ausgewählten Referenzszenarios erarbeitet, indem im Umfeld der Luftfahrtindustrie das automatisierte, selektive Absortieren technischer Textilien von einem Schneidtisch umgesetzt wird. Anhand dieses herausfordernden Beispiels werden im Laufe der Arbeit angepasste Vorgehensmethoden für die Entwicklung einer entsprechenden Greiftechnologie zur automatisierten Handhabung erforscht und ein hochflexibles Greifsystem umgesetzt. Neben dem Greifsystem entsteht somit ein Entwicklungsleitfaden in Form eines methodischen Vorgehens.

1.5 Vorgehen und Gliederung der Arbeit

Abbildung 5 zeigt das gewählte Vorgehen innerhalb der vorliegenden Arbeit. Nach der bereits in diesem Kapitel erörterten Aufgabenstellung und Zielsetzung wird im folgenden *Kapitel 2* der Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf flexible Greifsysteme für formlabile Materialien und deren Entwicklung dargestellt. Durch die Betrachtung bereits realisierter Systeme und deren Anwendungsbereiche sollen einerseits mögliche Prinzipien und Konzepte gesammelt und andererseits die Defizite bestehender Lösungen im Hinblick auf die Anwendung für technische Textilien herausgearbeitet werden, um das zu erforschende Entwicklungsvorgehen zu schärfen. Durch die Strukturierung der vielfältigen Ansätze und Applikationen entsteht weitergehend eine umfassende Sammlung an Greifsystemen für formlabile Bauteile als Nachschlagewerk und Ideenspeicher für den Entwickler. Den wissenschaftlichen Kern der Arbeit bildet die methodische Entwicklung des Greifsystems, wobei in *Kapitel 3* das allgemeingültige Vorgehen bis zur Auswahl eines Wirkprinzips beschrieben wird, auf dessen Basis in *Kapitel 4* ein hochflexibles Greifsystem zu konzipieren und prototypisch zu realisieren ist. Um die Einsatzfähigkeit des realisierten Systems und somit letztlich auch die Anwendbarkeit der Methode zu validieren, wird in *Kapitel 5* zunächst eine experimentelle Untersuchung anhand des zugrundeliegenden Referenzszenarios durchgeführt. Darauf aufbauend wird in *Kapitel 6* über die technische Betrachtung der Anforderungserfüllung hinaus die Relevanz des Greifsystems analysiert. Hierbei ist zu untersuchen, inwiefern das System auch auf andere Anwendungsfelder übertragbar ist. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf der Basis der technischen Leistungsfähigkeit gibt Aufschluss über mögliche weitere Einsatzfelder.



Abbildung 5: Vorgehen und Gliederung der vorliegenden Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Abgrenzung und Fokussierung

Der definierten Zielsetzung entsprechend, wird im folgenden Kapitel der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der einzelnen Handlungsfelder erarbeitet (vgl. *Abbildung 4*). Hierzu ist der technologische Status bei Greifsystemen für entsprechende Materialgruppen in der Forschung sowie im industriellen Umfeld zu klären und die Ursachen für eine derzeit unzureichende Lösung des Automatisierungsbedarfs abzuleiten. Auf Basis einer prozess- und systemtechnischen Analyse wird zunächst der erforderliche Betrachtungsraum abgegrenzt und entsprechend fokussiert. Durch die strukturierte Darstellung der Ergebnisse soll letztendlich aber auch ein Überblick über mögliche Ansätze zu Greifsystemen und -prinzipien für flächige, formlabile Materialien erarbeitet werden. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Einsatzflexibilität der Technologien. Über diese Betrachtung hinaus werden weitergehend existierende Methoden zur Entwicklung und Konzeption analysiert, um darauf aufbauend in den folgenden Kapiteln eine spezifische Vorgehensweise bei der Etablierung der benötigten automatisierten Greifsysteme zur Handhabung von Faserverbundhalbzeugen zu erforschen.

2.2 Prozess- und systemtechnische Analyse

2.2.1 Begriffe, Definitionen und Einteilung

Handhaben ist nach der VDI-Richtlinie 2860 (VDI 1990) eine Teilfunktion des Montierens und kann, wie auch das *Kontrollieren*, als Nebenfunktion zum Hauptbestandteil des Montagevorgangs, dem *Fügen*, betrachtet werden (WARNECKE & SCHRAFT 1990B). LOTTER & WIENDAHL 2006 erweitern den Montagevorgang noch um die Teilbereiche *Justieren* und mehrere Sonderoperationen, wie das Markieren oder Reinigen, sehen jedoch die Kerngebiete in den Vorgängen des Fügens nach DIN (2003A) und des Handhabens. Im Allgemeinen folgt der Begriff der Montage der Definition in der VDI-Richtlinie 2860, in welcher ihm „die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen“ zugeordnet werden (VDI 1990).

Der begriffliche Ursprung des Handhabens ist eindeutig in der menschlichen Hand zu sehen und versinnbildlicht in der automatisierten Werkstückhandhabung

die Substitution der menschlichen Hand durch technische Mittel (WARNECKE & SCHRAFT 1990A). Nach der VDI-Richtlinie 2860 ist Handhaben „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem ohne beabsichtigte Veränderung am Objekt selbst“. Über die Orientierung und Position eines Körpers ist dessen räumliche Anordnung definiert. Als geometrisch bestimmt wird ein Körper bezeichnet, wenn sowohl seine Form als auch seine Abmessungen bekannt sind, was insbesondere bei formlabilen Bauteilen Auswirkungen auf die Art der Handhabung hat (vgl. auch Abschnitt 1.3.1). Handhaben schließt folgende Teilfunktionen ein (VDI 1990):

- *Speichern* (Halten von Mengen)
- *Mengen verändern*
- *Bewegen* (Schaffen und Verändern einer definierten räumlichen Anordnung)
- *Sichern* (Aufrechterhalten einer definierten räumlichen Anordnung)
- *Kontrollieren*

Aus diesen Definitionen lässt sich eine Einteilung und Strukturierung der relevanten Vorgänge erarbeiten, welche den funktionalen Rahmen der vorliegenden Arbeit umfasst (vgl. Abbildung 6).

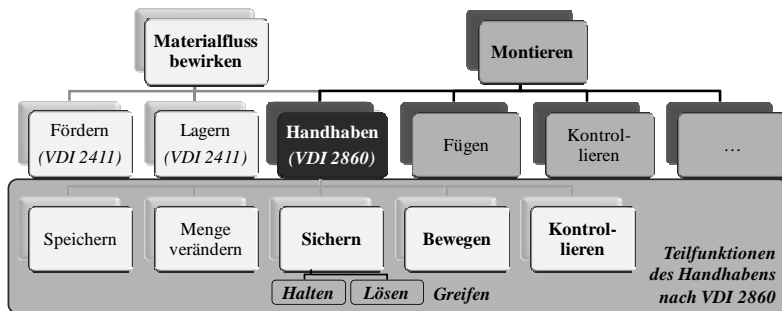


Abbildung 6: Einteilung Montage und Handhabung in Anlehnung an VDI (1990), VDI (1970) und LOTTER & WIENDAHL (2006) (REINHART ET AL. 2010E)

Neben dieser, von der Montage geprägten, Sichtweise kann das Handhaben aus einem logistischen Blickwinkel zusammen mit dem Fördern und Lagern als Teil des Vorgangs *Materialfluss bewirken* angesehen werden (VDI 1970, WARNECKE & SCHRAFT 1990A, VDI 1990). In Anlehnung an die gebräuchliche Definition eines Prozesses als „gerichteter Ablauf eines Geschehens“ (vgl.

MITTELSTRAß ET AL. 2004), wird als *Handhabungsprozess* im Rahmen dieser Arbeit die determinierte Verknüpfung relevanter Teilfunktionen verstanden.

Die VDI-Richtlinie 2860 definiert zudem auch die aufgeführten Teilfunktionen des Handhabens und weist ihnen Elementarfunktionen zu (VDI 1990):

Speichern ist demnach als Handhabungsaufgabe zu sehen, wenn es sich auf geometrisch bestimmte Körper unter definierten Orientierungsbedingungen bezieht. Streng genommen ist somit nur das geordnete Speichern dem Handhaben zuzuordnen, da hier Orientierung und Position der Körper in allen Freiheitsgraden definiert sind. Das Vorliegen zugeschnittener, formlabiler Bauteile auf einem Schneidtisch sowie das Aufbewahren in einem Lagerungssystem sind somit als geordnetes Speichern zu identifizieren. Flächige Bauteile können hierbei, insbesondere in der Textilindustrie, mehrlagig vorliegen, wodurch die in *Abbildung 7* aufgeführten Fälle zu unterscheiden sind (GUTSCHE 1993, SZIMMAT 2007, SPIEGELMACHER 1991, KROCKENBERGER 1995, SCHNEIDER 1999). Durch Handhabungsprozesse kann der Speicherzustand der Bauteile verändert (u. a. *Absortieren*, *Abstapeln*) oder unter Veränderung der Position belassen werden (*Pick&Place*).

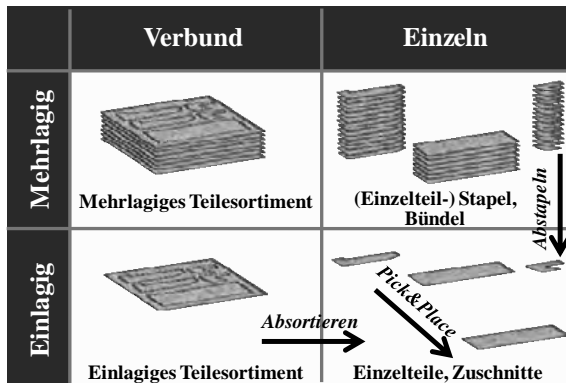


Abbildung 7: Geordnetes Speichern von flächigen Bauteilen und ausgewählte Handhabungsprozesse

Im Falle eines mehrlagigen Speicherns kann der verwendete Werkstoff der einzelnen Lagen differieren, während eine Variation der Bauteilkontur bei formlabilen Bauteilen zu einem ungeordneten Speichern führen würde, was sich negativ auf die Automatisierbarkeit der Handhabungsprozesse auswirkt (GÖTZ 1991, GUTSCHE 1993). Das geordnete Speichern ist oftmals Teil des logistischen Prozesses der *Bereitstellung*, in welchem SCHNEIDER (1999) alle

diejenigen Maßnahmen zusammenfasst, die nötig sind, um das zu verarbeitende Bauteil in der richtigen Konfiguration zur Verfügung zu stellen. GÖTZ (1991) stellt weiterhin die folgenden Bereitstellungsmöglichkeiten für flächige Bauteile vor, welche technischen Umsetzungen der oben definierten geordneten Speichervarianten darstellen:

- gestapelt
- vereinzelt, nacheinander
- vereinzelt, gleichzeitig (Magazin)
- als Coil (Basis Halbzeugrolle)

Auch *Mengen verändern* unterliegt als Handhabungsfunktion der Restriktion definierter Orientierungsbedingungen und kann in die Elementarfunktionen *Teilen* und *Vereinigen* gegliedert werden. SZIMMAT (2007) sieht im Hinblick auf die Verarbeitung formlabiler Bauteile das Teilen in den Ausprägungen *Abteilen*, *Zuteilen* und *Verzweigen* als deutlich größere Herausforderung. Das *Vereinzeln* ist nach VDI-Richtlinie 2860 (VDI 1990) das Abteilen mit der Zielmenge 1, während *Sortieren* in diesem Zusammenhang als übergeordneter Begriff für die Veränderung einer Menge unterschiedlicher Körper in Abhängigkeit von Merkmalsklassen Anwendung findet. Für das automatisierte Vereinzeln zugeschnittener Bauteile aus dem flächigen Verbund auf einem Schneidtisch (vgl. linke Spalte in *Abbildung 7*) wird in der Literatur oftmals der Begriff des *Abräumens* verwendet (SZIMMAT 2007). Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnet der treffendere Ausdruck *Absortieren* diesen Vorgang (vgl. auch *Abbildung 7*).

Sichern dient nach der VDI-Richtlinie 2860 dem Erhalten definierter räumlicher Zustände bzw. Anordnungen und kann dauerhaft (*Fügen*, nach DIN 2003A) oder vorübergehend sein (*Handhaben*, nach VDI 1990). Mögliche Wirkprinzipien sind Kraft-, Stoff- und Formschluss. Die Elementarfunktionen *Halten* und *Lösen* beschreiben die zugrundeliegenden Handhabungsvorgänge beim Sichern, während *Spannen* und *Entspannen* davon abgeleitete Begriffe darstellen und beim Auftreten einer kraftschlüssigen Verbindung Gebrauch finden.

Der Vorgang *Greifen* ist als solches nicht in der VDI-Richtlinie 2860 definiert. Vielmehr bildet es einen Überbegriff der beiden Elementarfunktionen Halten und Lösen unter der Teilfunktion Sichern. In Anlehnung an BARTHELMEß (1987) und STEPHAN (2001) ist folgende Definition sinnvoll:

„*Greifen* beschreibt den Prozess zur Herstellung einer festen oder in bestimmten Freiheitsgraden beweglichen Verbindung zwischen einem Bezugssystem und dem zu bewegenden Bauteil.“

Einrichtungen zum Greifen in einem Handhabungsgerät werden im Allgemeinen als *Greifer* oder als *Greifsystem* bezeichnet (WARNECKE & SCHRAFT 1990A) und bestehen meist aus mehreren Subsystemen neben dem vorrangigen Wirksystem (WOLF & STEINMANN 2005, vgl. auch *Abschnitt 2.2.3*). Zu unterscheiden sind weiterhin die Begriffe *Haltekraft* und *Greifkraft*: Während die Haltekraft dem Aufrechterhalten eines Griffes dient, beschreibt die meist größere Greifkraft, die während eines Greifvorgangs aufzubringende Kraft. Angelehnt an den englischen Begriff „end effector“ bzw. „end of arm tooling“ werden an Industrierobotern befestigte Greifsysteme auch als *Endeffektoren* bezeichnet (HESSE ET AL. 2004, SEEGRÄBER 1993).

Das Verändern der räumlichen Anordnung von Körpern wird durch die Teilfunktion *Bewegen* beschrieben und kann anhängig von den zu verändernden Freiheitsgraden in die Elementarfunktionen *Drehen* und *Verschieben* bzw. einer Kombination dieser beiden unterteilt werden (VDI 1990).

Kontrollieren, als wichtige Teilfunktion aller Fertigungsschritte, ist in der Handhabungstechnik eine Hilfsfunktion mit den Ausprägungen *Prüfen* oder *Messen* (VDI 1990). Insbesondere in Verbindung mit dem Speichern und Sichern werden hierbei Anwesenheit, Anzahl, Identität, Orientierung oder Position mittels geeigneter Sensoren kontrolliert. Relevant wird dies besonders, wenn Körper aus einem undefinierten in einen definierten Ordnungszustand überführt werden. Um hinsichtlich der Aufgabenstellung relevante Teilfunktionen und Subsysteme zu ermitteln, ist im Folgenden eine Analyse des Betrachtungsraumes durchzuführen.

2.2.2 Relevante Teilfunktionen und Systeme

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird, basierend auf der dargestellten Ausgangssituation, insbesondere der Prozess des *Absortierens* von einem Schneidstück betrachtet. Vor- und nachgelagert sind die Prozesse *Zuschneiden* und *Lagern* zu berücksichtigen, da davon ausgegangen wird, dass überwiegend keine direkte Weiterverarbeitung (z. B. Montage, Fügen) der formlabilen Zuschnitte durch das Absortiersystem erfolgt (KÖHLER 1993, FAILLI & DINI 2004, SZIMMAT 2007). Während das *Zuschneiden* mit der Funktion *Trennen* (DIN 1985) oder *Zerteilen* (DIN 2003B) als Fertigungsverfahren nach DIN (1985) als Haupt- oder Primärprozess zu sehen ist, bilden das Absortieren und Lagern Neben- bzw. Sekundärprozesse (SCHNEIDER 1999, REINHART 2006). *Abbildung 8* zeigt die Zusammenfassung relevanter Systeme, Funktionen und Prozesse.

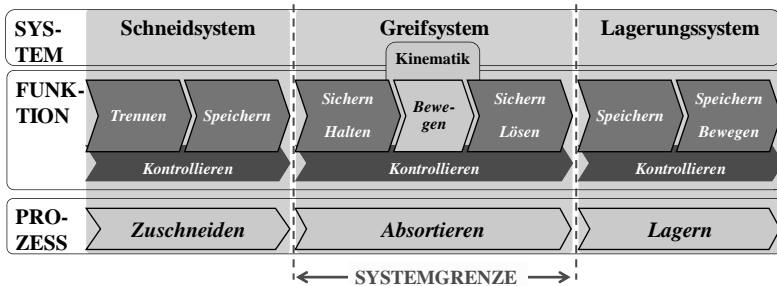


Abbildung 8: Analyse des Betrachtungsraumes hinsichtlich relevanter Prozesse und Systeme sowie abgeleiteter Funktionen

Absortieren setzt sich demnach aus den Handhabungsfunktionen Sichern (Halten und Lösen) sowie Bewegen zusammen und überführt den Zuschnitt aus dem Zustand „geordnetes Speichern im Schneidsystem“ in die analoge Situation im Lagerungssystem. Die Kinematikeinrichtung erfüllt beispielsweise in Form eines mehrachsigen Portalsystems oder Industrieroboters die Funktion Bewegen und manipuliert dabei das vom Greifsystem gesicherte Bauteil (LOTTER & WIENDAHL 2006, HESSE 1993). Im Lagerungssystem kann der Zuschnitt lediglich gespeichert oder auch zusätzlich durch entsprechende Verkettungseinrichtungen bewegt werden. Wie im *Abschnitt 2.2.1* erläutert, ist die Funktion Kontrollieren auch in der vorliegenden Prozesskette als notwendiger Vorgang über die Systemgrenzen hinweg zu sehen.

2.2.3 Struktur und Klassifikation eines Greifsystems

Greifsysteme bilden innerhalb einer Handhabungseinrichtung das Ende der kinematischen Kette und können in funktionale Teilsysteme untergliedert werden. Je nach den Anforderungen der Greifaufgabe müssen mehrere Funktionen in einen Greifer integriert werden, was ein komplexes technisches System zur Folge hat. *Abbildung 9* zeigt eine Übersicht möglicher Subsysteme und deren Funktion. In der Literatur existieren diverse Strukturierungen und zugehörige Bezeichnungen parallel, so dass die aufgezeigte Gliederung der Teilsysteme als Konvention für die vorliegende Arbeit zu sehen ist.

Subsystem	Funktion
Wirk-/ Haltesystem	<ul style="list-style-type: none"> • Einleitung der Haltekraft in das Werkstück durch Kraft-, Form- oder Stoffschluss
Antriebssystem & Kinematik	<ul style="list-style-type: none"> • Wandeln und Umsetzen der zugeführten (elektrischen, fluidischen) Energie
Trag- system	<ul style="list-style-type: none"> • Basisbaugruppe zur Aufnahme der Subsysteme und Anbindung des Kinematiksystems
Steuerungs- system	<ul style="list-style-type: none"> • Einheit zur Beeinflussung der Haltekräfte und Greifbewegungen (auf Basis von Sensordaten)
Sensor- system	<ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Sensoren zur Erfassung relevanter Informationen
Schutz-/ Sicherheitssystem	<ul style="list-style-type: none"> • System zur Vermeidung von Beschädigungen des Greifers bzw. Greifgutes und zum Schutz Dritter

Abbildung 9: Subsysteme einer Greifeinrichtung (in Anlehnung an VDI 1995, HESSE ET AL. 2004, HESSE 2006, SEEGRÄBER 1993, REINHART 2006)

Die zentrale Baugruppe eines Greifsystems ist das Wirk- bzw. Haltesystem, da es in direktem Kontakt mit dem gegriffenen Werkstück steht. Es stellt somit die Grundfunktionen hinsichtlich der Übertragung von statischen, dynamischen und prozessbedingten Kräften sowie Momenten infolge des Handhabungsvorgangs sicher (BÖGER 1998). Obwohl hierzu in der Literatur oftmals nur Elemente mechanischer Greifer wie Finger oder Backen aufgeführt werden (WOLF & STEINMANN 2005, SEEGRÄBER 1993), sind darunter explizit auch die entsprechenden Einrichtungen differierender Prinzipien zu verstehen (z. B. Sauger eines Unterdruckgreifers). Eine Sonderstellung nehmen Systeme zum berührungslosen Greifen ein, da sie in der Lage sind, elektrostatische, magnetische oder fluidische Haltekräfte ohne mechanischen Kontakt zu übertragen (ZHANG 1999, HÖPPNER 2002, SCHILP 2007).

Greifsysteme werden im Allgemeinen nach dem zugrundeliegenden Prinzip klassifiziert. Es besteht eine Vielzahl unterschiedlicher Einteilungen, in welchen die verwendete Verbindungsart (z. B.: VDI 1990, HESSE 1991, BECKER 1993) oder das physikalisch-technische Greifprinzip (z. B.: VDI 1995) als Ordnungskriterium herangezogen wird, wobei stets einzelne ursächliche Grundprinzipien unterschieden werden. *Abbildung 10* zeigt eine zusammenfassende Klassifizierung unter Verwendung verschiedener Ebenen mit kausalem Zusammenhang. So können Greifsysteme übergeordnet nach der Verbindungsart eingeteilt werden, die auf einem physikalischen Effekt beruht. Dieser kann als Wirkung einer grundsätzlichen physikalischen bzw. technischen Ursache gesehen werden. So erzeugt beispielsweise *Luftstromgreifen* unter Verwendung des

2.2 Prozess- und systemtechnische Analyse

Bernoulli-Prinzip einen *Ansaugeffekt*, der letztlich zwischen Haltesystem und Werkstück zu einem *Kraftschluss* führt. Obwohl das eingesetzte Grundprinzip aus physikalischer Sicht die Ursache darstellt, wird es in der bestehenden Literatur begrifflich meist als *Wirkprinzip* eines Greifsystems bezeichnet (HESSE ET AL. 2004), was in der vorliegenden Arbeit analog übernommen wird.

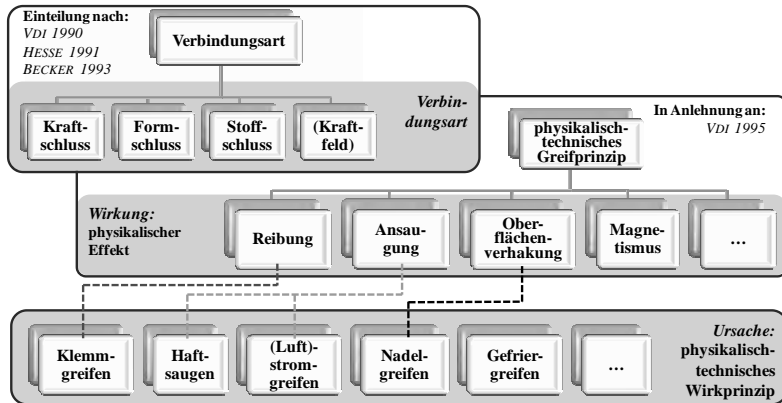


Abbildung 10: Mögliche Klassifizierungen von Greifsystemen

In Bezug auf formlabile Materialien existieren von MONKMAN (1995), TAYLOR (1995) und STEPHAN (2001) spezielle Einteilungen, die sich auf das angewendete physikalisch-technische Grundprinzip, also auf das *Wirkprinzip* beziehen. *Abbildung 11* zeigt eine zusammenfassende Übersicht dieser Klassifikation und ordnet den Wirkprinzipien spezifische Symbole zu, die im Folgenden Verwendung finden (vgl. *Abschnitt 2.3*).

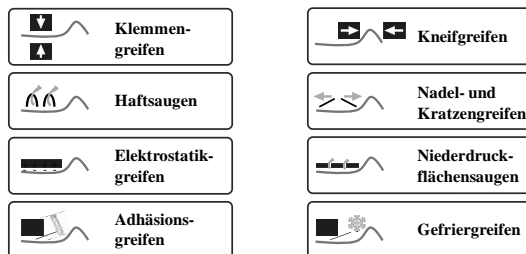


Abbildung 11: Physikalisch-technische Grundprinzipien (Wirkprinzipien) zum Greifen von formlabilen Materialien

Weitere Gliederungsaspekte bilden nach HESSE ET AL. (2004) die Anzahl der Greifeinheiten oder -punkte (einfach, mehrfach), die geometrische Ausdehnung

der Krafteinleitung (punktuell, flächig), das Halteverfahren (unterstützend, klemmend, haftend, baggernd) sowie das Einsatzgebiet (z. B. Weltraum) oder Einsatzszenario (z. B. Pick&Place).

2.2.4 Flexibilisierung von Greifsystemen

Die Forderung nach hoher Greiferflexibilität legt eine Betrachtung des Begriffes *Flexibilität* und der grundsätzlichen Flexibilisierungsansätze in Bezug auf die Greiftechnik nahe. Es stellt sich die Frage, welche Bedeutung und Ausprägung die Anpassungsfähigkeit in Zusammenhang mit automatisierten End-Effektoren einnimmt und wie diese erreicht werden kann.

Losgelöst von technischen Belangen werden die Begriffe *Flexibilität* und *Anpassungsfähigkeit* synonym verwendet und bezeichnen die Fähigkeit zu einem dementsprechenden Verhalten (DUDEN 2007). In der Produktionstechnik bestehen mehrere Projektionen des Zusammenhangs, da einerseits Organisationsstrukturen, Abläufe sowie Prozesse und andererseits Anlagen flexibel gestaltet werden können, was sich innerhalb eines Unternehmens oder Produktionssystems zu der Fähigkeit zur Bewältigung komplexer Umweltsituationen addiert und somit einen wichtigen strategischen Erfolgsfaktor darstellt (KALUZA & BEHRENS 2005). Im Gegensatz dazu steht der Begriff der Wandlungsfähigkeit, welcher nach HARTMANN (1996) als „*Fähigkeit eines Systems zur aktiven, schnellen Anpassung der Strukturen auf zeitlich nicht vorhersehbar wechselnde Aufgaben aus eigener Substanz (Anpassungsfähigkeit) in Verbindung mit der Fähigkeit zur evolutionären Entwicklung der Strukturen bei zeitlich konstanten oder längerfristig vorhersehbar wechselnden Anforderungen aus eigener Substanz (Entwicklungsfähigkeit)*“ zu sehen ist und damit eine Erweiterung um den Aspekt der autarken Entwicklungsfähigkeit über den determinierten Flexibilitätsrahmen hinaus darstellt.

Im Bereich der Montagetechnik wird Flexibilität von SCHMIDT (1992) als „*Anpassbarkeit eines Systems an die Veränderungen hinsichtlich Art und Menge der zu produzierenden Produkte, der Produktionsanforderungen sowie der Produktionsbedingungen*“ definiert. Übertragen auf einen Greifer bedeutet sie „*die Eigenschaft für verschiedene Anwendungen selbstanpassungsfähig zu sein*“, womit der Hauptfokus auf der Formenvielfalt der Werkstücke liegt (HESSE ET AL. 2004). Formlabile Materialien im Allgemeinen und technische Textilien im Besonderen weisen dahingehend eine extreme Vielfalt an unterschiedlichen Konturen und Werkstoffen auf (vgl. *Abschnitt 1.3*), variieren somit extrem in der Art des Handhabungsgutes.

Flexibilität lässt sich unterschiedlich in Greifsystemen abbilden. HESSE ET AL. (2004) und HESSE (1991) unterscheiden zwischen *Universalgreifern* (Anpassung ohne Veränderung des Gesamtsystems) und *Spezialgreifern* (Anpassung der Zusammensetzung bzw. des Aufbaus), während BAUER (2002) eine ähnliche Einteilung nach *Wechselsystemen* und *anpassungsfähigen Systemen* vorschlägt. Weitergehend existieren Unterscheidungen in *rekonfigurierbare* (Anpassung durch Veränderung des Systems) und *modulare Greifsysteme* (Anpassung durch Austausch von Subsystemen), welche manuell oder automatisiert adaptiert werden können (MONKMAN ET AL. 2007). Zusammengefasst kann die Flexibilität eines Greifsystems nach *Abbildung 12* strukturiert werden.

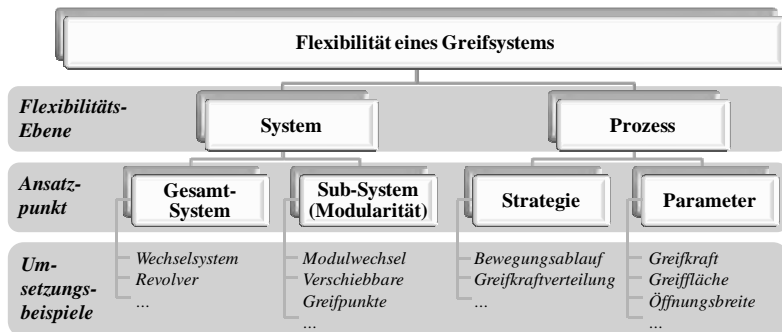


Abbildung 12: Ausprägungen der Flexibilität eines Greifsystems und beispielhafte Umsetzungsmöglichkeiten

Neben dem System bietet zudem auch der Greifprozess die Möglichkeit, eine Anpassungsfähigkeit zu erreichen. Ansatzpunkte sind zum einen die Greifstrategie (BAUER 2002), welche den Ablauf des Vorgangs festlegt, und zum anderen die angewandten Parameter. Auf Systemseite können entweder das gesamte Greifsystem (z. B. Schnellwechselsysteme) oder einzelne Subsysteme für die Ausprägung der Flexibilität verantwortlich sein. Beispiele für letztere Variante sind konfigurierbare Greifpunkte (MÜCKE 2003, MONKMAN ET AL. 2007) oder modulare Baukastensysteme (N.N. 2001A, N.N. 2001B, MONKMAN ET AL. 2007).

Die in *Abbildung 18* unterschiedenen Flexibilisierungstendenzen der später analysierten Greifer für formlabile Materialien lassen sich in die Klassifikation von *Abbildung 12* einordnen. So bilden verschiebbare Greifpunkte und -flächen (*Feld 2, Abbildung 18*) Ansätze im Bereich des Subsystems (Rekonfigurierbarkeit), während einzeln ansteuerbare Segmente (*Feld 4, Abbildung 18*) den Parameter Greiffläche ohne Veränderungen am System anpassen.

Im Allgemeinen ist jedoch nicht ausschließlich die Fähigkeit eines Systems zur Anpassung an veränderte Randbedingungen als Flexibilität zu verstehen, sondern zusätzlich der aufzubringende Aufwand für die Umsetzung der Anpassung zu bewerten. An dieser Stelle ist die Definition eines *Flexibilitätsgrades* sinnvoll, der sich aus den beiden Faktoren *Tragweite* (systemtechnische Tiefe des Ansatzpunktes) und *Aufwand* zusammensetzt und die *Anpassungsfähigkeit* oder *Rekonfigurierbarkeit* beschreibt. Ein Greifsystem ist damit als hochflexibel zu betrachten, wenn die Tragweite hoch und der dafür notwendige Adaptionen aufwand gering ist. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs sind die unterschiedlichen Ausprägungen in *Abbildung 13* entsprechend strukturiert und exemplarisch auf verbreitete Umsetzungsbeispiele für Klemmgreifer angewendet.

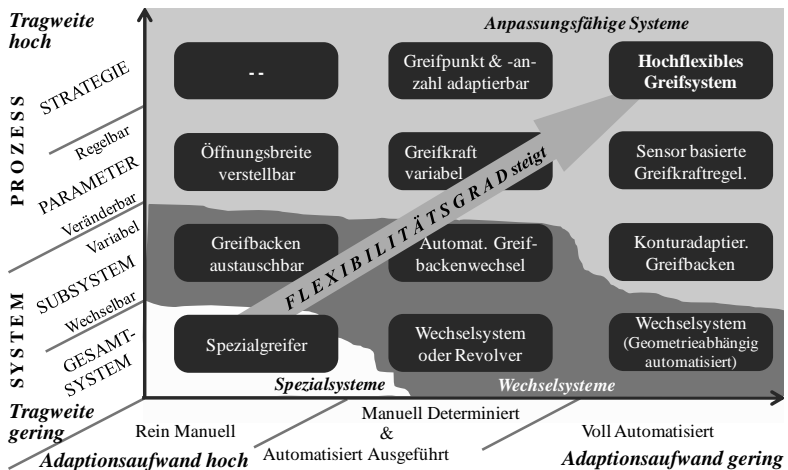


Abbildung 13: Flexibilitätsgrad von Greifsystemen

Ein *hochflexibles Greifsystem* zeichnet sich daher durch die Option aus, automatisiert die Greifstrategie sowie die zugehörigen Parameter adaptieren zu können ohne systemtechnische Veränderungen vornehmen zu müssen. Für unterdruckbasierte Greifsysteme (DUNKMANN & SCHMIERER 2005) oder Klemmgreifer (SCHUNK GMBH & CO. KG 2009) existieren hierzu Ansätze zur Regelung des Parameters Greifkraft. Abgebildet auf das Handhaben technischer Textilien bedeutet dies, dass abhängig von den material- und geometriespezifischen Eigenschaften des Handhabungsguts die Greiffläche, die Greifkraft und der Bewegungsablauf, optimale Greifpunkte sowie die Greifkraftverteilung selbsttätig angepasst werden. Erste Ansätze in diesem Zusammenhang liefern DINI (1993), CEGLAREK ET AL. (2001) oder CHEN & BURDICK (1993) mit der Entwicklung von

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

Algorithmen, die auf Basis der Geometrieinformationen von Greifer und Greifgut die optimale Konfiguration oder angepasste Greifpunkte eines End-Effektors berechnen.

Eine detaillierte und strukturierte Analyse der bisher bestehenden Ansätze für automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien soll im Folgenden den systemtechnischen Status sowie technologische Möglichkeiten herausarbeiten, um einerseits anhand der Defizite die Aufgabenstellung zu konkretisieren und andererseits Lösungsvarianten aufzuzeigen.

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

2.3.1 Erarbeitete Konzepte und realisierte Systeme

In der Verarbeitungstechnik für formlabile Materialien wurde seit den frühen 1980`er Jahren eine Vielzahl von Greiferkonzepten und -systemen zur automatisierten Handhabung derartiger Bauteile erarbeitet (TAYLOR 1994, TAYLOR 1996). In der Literatur bestehen hierzu einige Überblick schaffende Arbeiten, die jedoch jeweils auf einen Teilbereich fokussieren. SAADAT & PING (2002) zeigen, basierend auf der branchenübergreifenden Analyse von 96 wissenschaftlichen Veröffentlichungen, verschiedene End-Effektoren zur Handhabung von formlabilen Bauteilen auf, wobei neben linearen (z. B. Elektroverkabelung) und dreidimensionalen (z. B. Lebensmittelhandling) insbesondere flache, zweidimensionale Körper den Hauptbestandteil der Applikationsanwendungen bilden (76 %). Die Analyse zeigt weitergehend den Anwendungsfokus derartiger Systeme, indem 58 % der Lösungen dem Bereich der Textilindustrie entstammen, während die verbleibenden Anlagen zu gleichen Teilen der Automobil-, Luftfahrt und Schuhindustrie zugeordnet werden können. Mit Beschränkung auf das Vereinzeln und Bewegen von formlabilen Flächengebilden schafft auch SZIMMAT (2007) eine strukturierte Zusammenfassung realisierter Anlagen, wobei eine Studie im Rahmen dieser Arbeit ergibt, dass keinerlei automatisierte Absortiersysteme im industriellen Umfeld zur Verfügung stehen und daher dieser Prozessschritt bei allen 39 befragten Unternehmen manuell gestaltet wird. Exemplarische Lösungen für die industrielle Handhabung formlabiler Bauteile diskutieren WÖGERER ET AL. (2005) und unterteilen die Applikationen in thematische Gruppen nach Erscheinungsform und Branchenanwendung des Produkts. NEWELL ET AL. (1996) präsentieren das Ergebnis einer Literaturrecherche für den Anwendungsbereich

von Prepreg-Materialien, wobei neben Handhabungs- und Greifsystemen auch weitere Fertigungsschritte betrachtet werden. TAYLOR (1990) stellt weitergehend exemplarisch Greifer und deren Prinzipien für die Manipulation von formlabilen Bauteilen für Schuhe, Bekleidungstextilien und Verbundstrukturen vor (vgl. auch TAYLOR ET AL. 1991, GRAY & CALDWELL 1996, TAYLOR ET AL. 1990). Auch in HENRICH & WÖRN (2000) werden diesbezügliche Ansätze adressiert, während sich die Arbeiten von STEPHAN (2006) und MONKMAN (1995) lediglich auf die einsetzbaren Wirkprinzipien beschränken, ohne deren technische Umsetzung zu diskutieren.

Zusammenfassend stellt sich der in den oben genannten Arbeiten dargelegte Stand der Wissenschaft und Technik als ausgesprochen vielschichtig in Bezug auf die aufgezeigten Anwendungen dar. Neben unterschiedlichen, zumeist branchenspezifisch eingesetzten Materialien und den abgebildeten aufgabenspezifischen Vorgängen, wie Ab stapeln oder Pick&Place, sind differierende systemtechnische Reifegrade zu beachten. Im Hinblick auf eine tragfähige Analyse der Anwendbarkeit eines bestehenden Konzeptes oder Systems zum hochflexiblen Absortieren von technischen Textilien kann auf Basis dieser Arbeiten keine Aussage getroffen werden.

Insofern werden im Folgenden relevante Lösungen strukturiert aufgezeigt und hinsichtlich der grundsätzlichen, in *Abschnitt 1.3.2* definierten Anforderungen an das Absortieren diskutiert. Es sollen hierbei für den Entwickler ein schnell erfassbarer, strukturierter Überblick über relevante Vorarbeiten sowie bestehende Lösungsvarianten entstehen und, bezogen auf die vorliegende Arbeit, Ansätze für die zugrunde liegende Aufgabenstellung erörtert werden. Der Betrachtungsrahmen der Recherche erstreckt sich über voll- und teilautomatisierte Konzepte (Konzepte und Patente) sowie Systeme (Forschungsdemonstrator und Industrieapplikation) zum Handhaben flächiger (nach GÖTZ 1991), formlabiler Bauteile, wobei die Einsatzflexibilität eines der zentralen Kriterien darstellt. Das Vereinzeln von textilen Materialien sowie die Handhabung technischer Textilien stellen hierbei den inhaltlichen Schwerpunkt dar. Gemäß der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird lediglich die technische Umsetzung des Greifsystems betrachtet, da diese den Kern des Handhabungssystems bildet, während die eingesetzte Kinematik zur Bewegung des Greifers oder zusätzliche, externe Sensorsysteme nicht berücksichtigt werden. Erstere sind vielfältig am Markt verfügbar und letztere werden ausführlich in ORTH (2008) dargestellt (siehe auch Forschungsarbeiten von GRIES ET AL. 2010).

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

Die Einordnung relevanter Systeme wird hinsichtlich des Handhabungsmaterials, des angewendeten Handhabungsprozesses (vgl. auch *Abbildung 7*) und dem Evolutionsgrad vorgenommen. *Tabelle 2* zeigt zusammenfassend die getroffene Kategorisierung.

Tabelle 2: Kategorien zur Einordnung relevanter Systeme

Merkmal	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4
Anwendung Handhabungsprozess, bei dem das System angewendet wird	Pick&Place Automatisiertes Bewegen und Orientieren (ohne Sonderfunktionen)	Abstapeln Vereinzeln aus einem Einzeileistapel oder -bündel (vgl. Abs. 2.2.1)	Absortieren Vereinzeln aus einem ein- oder mehrlagigen Sortiment (Verbund Schneid- tisch; vgl. Abs. 2.2.1)	--
Material Handhabungs- material, für welches das System konzipiert ist	Allg. formlabile Materialien Keine nähere Zuordnung aus Literatur möglich	Papier/Folien/ Food/Leder/Blech Luftundurchlässige Materialien	Textilien (DIN 1969) Textile Werkstoffe nach DIN 60000 vor allem für die Bekleidungsindustrie (außer techn. Textilien)	Technische Textilien (DENNINGER 2009) Textile Werkstoffe zur Anwendung in technischen Applikationen (meist FVK)
Evolutionsgrad Technischer Reife- grad des Systems	Konzept/ Patent Nicht umgesetzte Ideen oder Konzepte; meist in Patentschriften hinterlegt	Demonstrator/ Prototyp Funktionsfähiger, prototypischer Aufbau; meist Ergebnis von Forschungsarbeiten	Industriell eingesetzt System befindet sich im industriellen Einsatz bzw. wird am Markt angeboten	--

Konzepte und Patente

Ohne näher auf die zu handhabenden Werkstoffe einzugehen, beschreiben die Patentschriften von THEIS (2005) und HJORNET (2008) Konzepte zum Pick&Place von formlabilen Bauteilen (vgl. *Abbildung 14*). HJORNET (2008) schlägt hierzu eine flexible Greifhaube basierend auf einem Flächensauger vor, die sich zwar an die Oberflächenkontur, jedoch nicht an die Außenkontur des Bauteils anpassen lässt. Diesen Restriktionen unterliegt auch eine Anordnung von anpassungsfähigen Haftsaugern zum Transport von Leiterplatten (BROWN ET AL. 1986). Durch die Möglichkeit, Halteelemente an einem schwenkbaren Teleskoparm zu befestigen, erhält die in THEIS (2005) skizzierte Vorrichtung die Flexibilität, verschiedene Konturen präferiert durch Haftsaugen zu greifen. BELLIO ET AL. (1993) nennen in ihrer Patentschrift ebenfalls keine Materialgruppe für das Absortieren von Zuschnitten mittels vertikal verschiebbarer Elemente aus Nadel- bzw. Kratzengreifern, wobei die Eignung zum Herausgreifen aus einem flächigen Verbund nicht explizit ersichtlich ist. Eine ähnliche Anordnung stellt der klappbare Greifer von ZIMMER ET AL. (1990) dar, dessen Nadelgreiferelemente zum bauteilflexiblen Handhaben von unterschiedlich großen Textilien eingesetzt werden sollen.

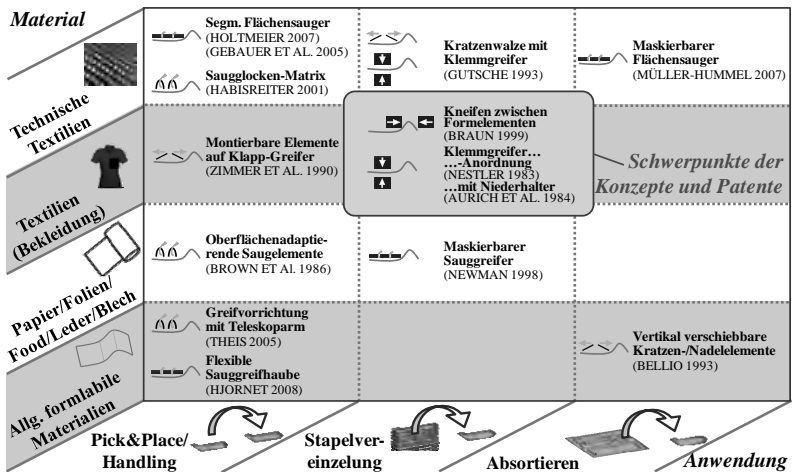


Abbildung 14: Automatisierte Greifsysteme für formlabile Materialien (Konzepte und Patente)

Der Fokus der Patentschriften findet sich im Bereich des Abstapelns von Textilien. Zum Vereinzeln bedienen sich die Lösungen von AURICH ET AL. (1984) und NESTLER (1983) sowie von BRAUN (1999) mechanischer Klemm- bzw. Kneifgreifer. Zur Überwindung der Verhakungskräfte zwischen den Lagen werden hierbei entsprechende Zusatzmechaniken eingesetzt.

Im Umfeld technischer Textilien lassen sich weitere Ansätze finden. HABISREITER & NORDMANN (2001) stellen eine Vorrichtung zum Transport und mehrachsigen Manipulieren hochviskoser Harz-Faser-Matten vor, welche auf einer Matrix aus einzeln mit Vakuum beaufschlagbaren Saugglocken basiert. Wohingegen die Patentschrift von HOLTMEIER (2007) einen segmentierten Flächensauger in ebener oder konvexer Bauform vorstellt, bei dem größere Bereiche individuell über Schlauchleitungen mit Unterdruck versorgt werden können. Zum Vereinzeln von technischen Textilien kann nach GUTSCHE (1993) ein Greiferkonzept angewendet werden, das auf einer Kratzenwalze beruht, die einzelne Lagen einem Klemmgreifer zuführt. Mit maskierten Flächengreifern beschäftigen sich zwei weitere Schutzrechtsschriften (MUELLER-HUMMEL 2007, NEWMAN ET AL. 1998). Erstere beschreibt ein System, dessen Saugfläche über vorgefertigte Folienblenden eine zuschnittabhängige Kontur aufgeprägt werden kann. NEWMAN ET AL. (1998) bedienen sich einer ähnlichen Vorgehensweise zum Stapeln von formlabilen Papier- oder Folienflächen für einen Schichtbauprozess. Die betreffende Maske wird hierbei durch eine punktförmig wirkende

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

Energiequelle erzeugt, indem diese die Maske zuschneidet. GEBAUER ET AL. (2005) beschreiben einen Mehrkammer-Flächensauggreifer für das Handling von (technischen) Textilien, welcher durch verschiebbare Kammerwände eingeschränkt in der Lage ist, die Greiffläche zu verändern.

Zusammenfassend finden sich kaum Patentschriften, die sich mit dem Absorbieren formlabiler Materialien befassen, während der Fokus auf stapelnden Prozessen in Verbindung mit Textilien liegt. Weiterhin ist auffallend, dass sowohl innerhalb einer Material- als auch einer Anwendungskategorie unterschiedlichste Wirkprinzipien zum Einsatz kommen.

Forschungsdemonstratoren und Prototypen

Eine weitaus größere Anzahl an Lösungen erbringt die Analyse realisierter Forschungsdemonstratoren und Prototypen (vgl. *Abbildung 15*). Speziell die Stapelvereinzelung von Bekleidungstextilien wurde durch mehrere Forschergruppen umfangreich untersucht (PRESTON & KHAKBIZ 1995), so dass die entstandenen Ansätze eigenständig in *Abbildung 16* zusammengefasst werden.

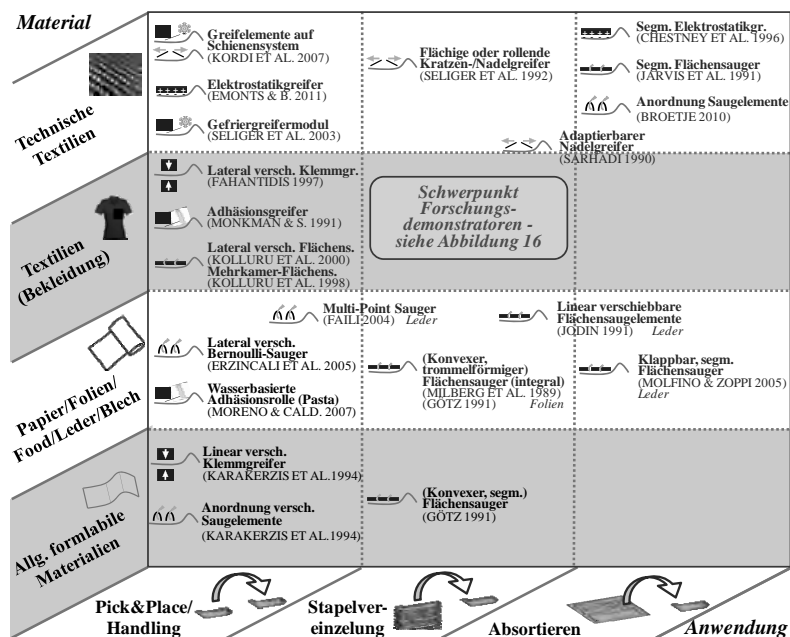


Abbildung 15: Automatisierte Greifsysteme für formlabile Materialien (Forschungsdemonstratoren und Prototypen)

Ein Teil der aufgeführten Systeme stellt lediglich realisierte Greifermodule oder integrale Bauweisen ohne Flexibilitätspotenzial hinsichtlich der zu haltenden Fläche dar. Dabei kommen zur Stapelvereinzelung konvexe bzw. trommelförmige Flächensauger (MILBERG ET AL. 1987, GÖTZ 1991) sowie ebene oder rollende Nadel- und Kratzengreifer (SELIGER ET AL. 1992) für technische Textilien zum Einsatz. Adhäsionsbasierte Strategien finden Anwendung bei einer mit Wasser beaufschlagten Rolle für das Handling von Pastascheiben (MORENO MASEY & CALDWELL 2007), einem Adhäsionsgreifer für textile Werkstoffe (MONKMAN & SHIMMIN 1991) und einem von SELIGER ET AL. (2003) vorgestellten Gefrier-greifmodul für textile Preforms. EMONTS & BRECHER (2011) experimentieren mit Elektrostatikgreifern für leitende sowie nicht-leitende FVK-Halbzeuge und beschreiben weitergehend ein Konzept aus matrixförmig angeordneten Standardgreifern zum Ablegen von Fasermatten auf Formwerkzeugen. OCHS (2010) stellt einen Adhäsionsgreifer vor, der zwar schwingungsunterstützt vom Textil gelöst werden kann, jedoch Rückstände des Klebstoffs auf dem Textil hinterlässt. Durch eine verschiebbare Nadelfläche ist das aufrollende Greifsystem von SARHADI (1990) nur eingeschränkt an die Zuschnittskontur adaptierbar, wird aber als System zum Vereinzeln von Textilien sowie Prepreg-Materialien vorgestellt. MÜLLER ET AL. (2011) entwickeln eine parallelkinematische Struktur, welche durch austauschbare Greifelemente an mehreren Roboterarmen in der Lage ist, Bauteile und u. a. auch formlabile, technische Textilien flexibel handzuhaben.

Als eine Option, die Haltepunkte an die Zuschnittskontur anzupassen, werden linear (einachsrig) oder lateral (zweiachsrig) verschiebbare Greifmodule eingesetzt. Die verwendeten Wirkprinzipien umfassen hierbei Saugelemente (KARAKEREZIS ET AL. 1994, ERZINCANLI ET AL. 1998 und OZCELIK & ERZINCANLI 2005), Klemmgreifer (KARAKEREZIS ET AL. 1994, PARASCHIDIS ET AL. 1995 und FAHANTIDIS ET AL. 1997), Gefrier- bzw. Nadelgreifermodule (KORDI ET AL. 2007) und Flächensauger (KOLLURU ET AL. 2000, JODIN 1991). Letztere können auch durch eine Segmentierung der Greiffläche die gewünschte Adaptionsfähigkeit und damit Flexibilität erlangen (GÖTZ 1991, KOLLURU ET AL. 1995, KOLLURU ET AL. 1997, KOLLURU ET AL. 1998, JARVIS ET AL. 1991). Ebenfalls durch die Bildung einzel-aktivierbarer Teilflächen zeichnen sich der von CHESTNEY & SARHADI (1996) erarbeitete Elektrostatikgreifer sowie die Saugmodulmatrix von FAILLI & DINI (2004) für die Handhabung von Leder aus. Das gleiche Forscherteam qualifizierte auch einzelne Bernoulli-Sauger für diesen Werkstoff (DINI ET AL. 2009). MOLFINO & ZOPPI (2005) kombinieren die beiden Flexibilisierungsansätze in einem klappbaren System aus Flächensaugern zum Absortieren von Schuhleder. Das Unternehmen *BROETJE* präsentiert im Jahr

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

2010 eine matrixförmige Anordnung von Saugelementen für das Handhaben von technischen Textilien, welche zwar einzeln angesteuert werden können, jedoch in ihrer Greifpunktauflösung erheblich beschränkt sind und sich daher kaum für sehr formlabile Halbzeuge eignen (BROETJE-AUTOMATION GMBH 2010).

Abbildung 16 zeigt speziell die Vielzahl der entstandenen Demonstratoren und Prototypen im Forschungsschwerpunkt Abstackeln von Bekleidungstextilien auf. Eine Einteilung der Systeme gelingt bei Betrachtung der Vereinzelungsstrategie. Die links aufgetragenen Systeme bedienen sich einer abschälenden bzw. formgebenden Bewegung zur Reduzierung der Haltekräfte zwischen den Textilien.

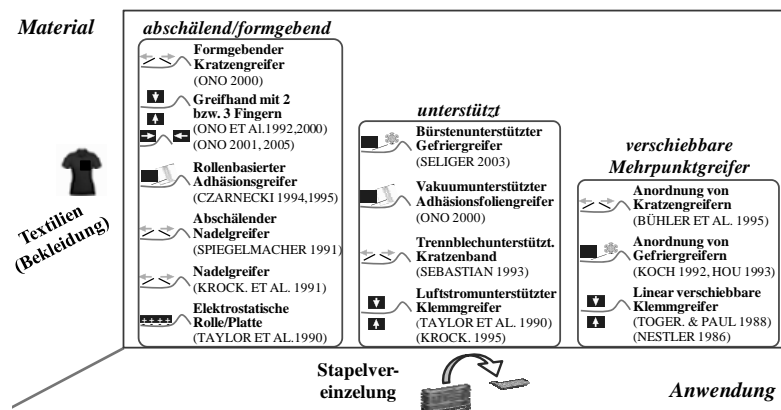


Abbildung 16: Automatisierte Greifsysteme für die Stapelvereinzelung von Textilien (Forschungsdemonstratoren und Prototypen)

Zum Einsatz kommen hierbei rollenbasierte Vorrichtungen mit Elektrostatik- bzw. Adhäsionsgreifern (TAYLOR ET AL. 1988 und TAYLOR 1990, CZARNECKI 1994 und CZARNECKI 1995), Nadelgreifersysteme (KROCKENBERGER & NOLLEL 1991, SPIEGELMACHER 1991, ONO 2000) und humanoide Greifhände mit mehreren Fingern zum Klemmen oder Kneifen der obersten Lage (ONO ET AL. 1992, ONO ET AL. 1995, ONO 2000, ONO ET AL. 2001, ONO ET AL. 2005). Den Zuschnitt vereinzeln die mittig dargestellten Systeme mit Hilfe von unterstützenden, zum Teil aufwendigen Zusatzeinrichtungen. Die Klemmgreifer von TAYLOR (1990) und KROCKENBERGER (1995) nutzen einen Luftstrom zum Herauslösen der obersten Schicht, während dies für einen Kratzengreifer auch durch ein Trennblech gelöst werden kann (SEBASTIAN 1993). Adhäsive Prinzipien können weitergehend durch Vakuum (ONO 2000) oder Bürsten (SELIGER ET AL. 2003) unterstützt werden. Auf der rechten Seite in *Abbildung 16* finden sich Lösungen, die

durch verschiebbare Klemmgreifer (TORGERSON & PAUL 1988, NESTLER 1986) oder eine Anordnung von Gefrier- (KOCH 1992, HOU 1993) bzw. Kratzengreifern (BÜHLER ET AL. 1991, BÜHLER ET AL. 1995) eine geringe, lokale Flexibilisierung der Haltepunkte ermöglichen. Auch hier werden zusätzliche, unterstützende Systeme wie Trennstäbe, Luftdüsen oder spezielle Sensorik eingesetzt.

Die bei der Analyse relevanter Patentschriften erfassten Tendenzen werden durch die Betrachtung der oben aufgeführten Forschungsergebnisse untermauert. Es finden sich auch hier wenige Absortiersysteme, während viele spezielle Ansätze für die Stapelvereinzelung von Textilien aufgezeigt werden können. Die Varianz der unterschiedlichen Wirkprinzipien lässt erneut keine Präferenz für bestimmte Aufgaben oder Materialien erkennen. So können für technische Textilien lediglich die Prinzipien Flächensaugen, Haftsaugen, Nadel- bzw. Kratzengreifen, Elektrostatikgreifen sowie Adhäsions- und Gefriergreifen ermittelt werden.

Industrielle Applikationen

Im Bereich industrieller Applikationen existieren, abgesehen von marktüblichen, standardisierten Nadel- und Gefriergreiferelementen (SOMMER-AUTOMATIC GMBH & CO. KG 2009, JENSEN GREIFTECHNIK GMBH 2009, REIFF-STEPHAN 2009), nur vereinzelt Handhabungssysteme für die untersuchten Anwendungskategorien (vgl. *Abbildung 17*). Lediglich für das Blechteile- und Papierhandling können mehrere Lösungen recherchiert werden.

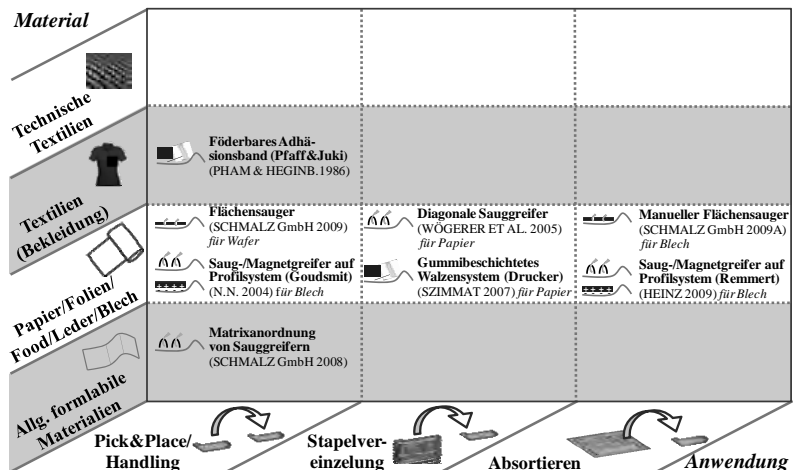


Abbildung 17: Automatisierte Greifsysteme für formlabile Materialien (Industrielle Applikationen)

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

WÖGERER ET AL. (2005) und SZIMMAT (2007) beschreiben in ihren Zusammenstellungen Papiervereinzelungsvorrichtungen, basierend auf diagonal angeordneten Haftsaugern oder gummibeschichteten Walzen aus Druckern. Die Unternehmen *Goudsmit* und *REMMERT* bieten Handhabungssysteme für Blechteile am Markt an, die werkstoffabhängig aus einzelnen Magnet- oder Saugelementen auf Profilschienen bestehen, um die Haltepunkte manuell anpassen zu können (N.N. 2004, JACOBS 2004, HEINZ 2009). Speziell die Anlage von *REMMERT* wird zum Absortieren von Blechzuschnitten eingesetzt. Die Firma Schmalz bietet in diesem Segment ein Flächensauger-Balancer-System zum unterstützten, manuellen Abnehmen der Zuschnitte an (SCHMALZ GMBH 2009A). Zudem sind von diesem Unternehmen ein automatisiertes Flächensaugsystem für extrem dünne Elektroniksubstrate (Wafer) mit festgelegter Saugfläche (SCHMALZ GMBH 2009) und eine segmentierte Matrixanordnung von Sauggreifern erhältlich (SCHMALZ GMBH 2008). Es existieren weitergehend erste Ansätze, Coandâ-Effekt-basierte Sauggreifer für die schonende Handhabung von technischen Textilien einzusetzen (Erklärung Coandâ-Effekt siehe LIEN & DAVIS 2008 und *Tabelle 14* im Anhang). Hinsichtlich der Handhabung von Textilien verweisen PHAM & HEGINBOTHAM (1986) auf ein weiterförderbares Adhäsionsband zum Transport von formlabilen Bauteilen in industriell genutzten Nähmaschinen der Unternehmen *PFAFF* und *JUKI*. Der Anwendungsfall *technische Textilien* ist demnach aktuell im industriellen Umfeld nicht flexibel-automatisiert umgesetzt. Die Restriktionen der bestehenden Ansätze scheinen daher zu erheblich und werden im Folgenden näher analysiert.

Bewertung der bestehenden Ansätze

Die aufgeführten Ansätze werden im Folgenden hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung zum Absortieren von technischen Textilien bewertet. Als übergeordnete Kriterien werden dabei die Ausprägung der Haltekraft, die Anpassungsfähigkeit sowie der notwendige Anpassungsaufwand herangezogen. Ein flächig greifendes System, dessen Haltekraft in Größe wie Ortsausdehnung datenbasiert und automatisiert parametrierbar ist, erfüllt die in *Abschnitt 1.3* herausgearbeiteten Anforderungen bevorzugt. *Abbildung 18* zeigt die diesbezügliche Strukturierung, in welcher der Evolutionsgrad sowie das Wirkprinzip der Lösung markiert ist. Aufgrund ihrer prozesstechnischen Charakteristik werden klemmende sowie aufrollende Greifvorrichtungen in dieser Übersicht nicht berücksichtigt.

Neben einfachen, nicht anpassungsfähigen End-Effektoren (*Feld 1*) bilden teil-flexible Systeme mit mehreren Greifpunkten bzw. einer segmentierten Greiffläche den Hauptbestandteil. Eine Gruppe stellen dabei manuell verschiebbare Anordnungen von Greifmodulen dar (*Feld 2*), welche meist mit erheblichem Aufwand an unterschiedliche Konturen bzw. Materialien zu adaptieren sind. Besser für eine vollständig automatisierte Anpassung eignen sich segmentierte Systeme oder matrixförmig angeordnete Einzelgreifer (*Feld 3*). Keiner dieser Ansätze verfügt jedoch über eine entsprechend hohe Auflösung zum selektiven, flächigen Greifen. Lediglich die Patentschriften von MUELLER-HUMMEL (2007) und NEWMAN ET AL. (1998) haben diesbezüglich Potenzial (*Feld 4*), wohingegen der Einsatz dieser Lösungen mit einem erheblichen, teilweise nicht automatisierbaren, Adaptionaufwand verbunden ist. Letztlich weist keines der betrachteten Systeme die notwendige Flexibilität für das Absortieren von formlabilen FVK-Halbzeugen auf (*Feld 5*; vgl. auch *Abschnitt 1.3*).

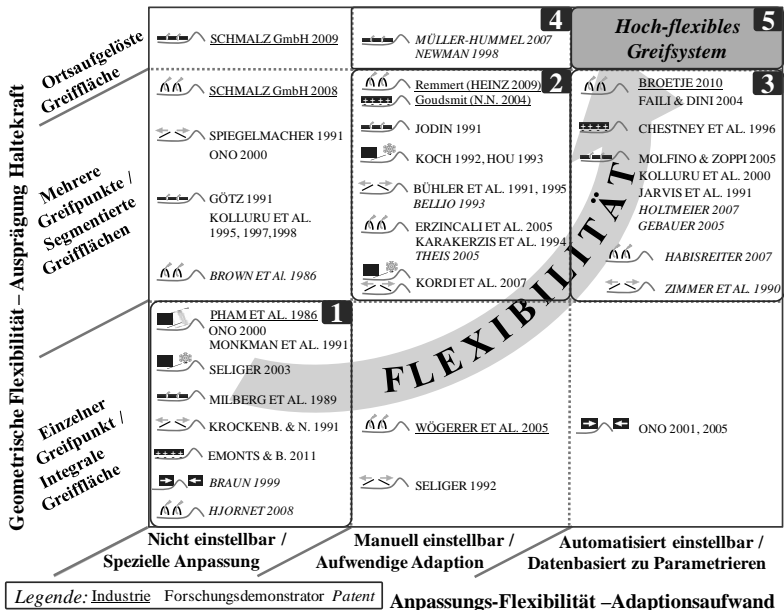


Abbildung 18: Flexibilitätsanalyse relevanter Greifsysteme hinsichtlich geometrischer Anpassungsfähigkeit und notwendigem Adaptionaufwand

2.3 Automatisierte Greifsysteme zur Handhabung formlabiler Materialien

Aus der Betrachtung der eingesetzten Wirkprinzipien ergibt sich weiterhin keine eindeutige Tendenz zu Gunsten einer der betrachteten Varianten. Lediglich das Prinzip *Flächensaugen* konzentriert sich auf automatisiert adaptionsfähige sowie orts aufgelöst-selektive Systeme und weist daher das höchste Potenzial zur Flexibilisierung in Bezug auf die Aufgabenstellung auf. Das Ergebnis der Analyse des Evolutionsgrades der jeweiligen Ansätze lässt die Vermutung zu, dass der Entwicklungsfortschritt der geforderten Greifer noch gering ist, da in den angrenzenden Feldern 3 und 4 kaum industrielle Applikationen recherchiert werden konnten.

2.3.2 Anwendbarkeit für die Handhabung technischer Textilien

In Bezug auf die herausfordernde Anwendung der automatisierten Handhabung technischer Textilien mit dem Fokus auf deren Absortieren schafft der bisherige Stand der Wissenschaft und Technik noch keine zufriedenstellende Lösung. Trotz einer Vielzahl etablierter Greifsysteme im Bereich formlabiler Bauteile können die hohen und speziellen Anforderungen bei der Handhabung nicht zufriedenstellend gelöst werden. Nur wenige Systeme wurden in der Vergangenheit für diesen Einsatzzweck konzipiert, wobei keine industriell genutzten Anlagen ermittelt werden können (vgl. auch SZIMMAT 2007). Neben maßgeblichen Einschränkungen bei der erforderlichen Materialschonung mangelt es den bestehenden Ansätzen insbesondere am möglichen Flexibilitätsgrad. Über die untersuchten Kategorien hinweg weisen anpassungsfähige Systeme, in Form von segmentierten Greifflächen oder verschiebbaren Greifpunkten, das größte Potenzial auf (vgl. *Abbildung 18*), erreichen aber weder den notwendigen Automatisierungsgrad noch die Anforderungen hinsichtlich lokal selektiver Greifflächen.

Basierend auf der Betrachtung bestehender Flexibilisierungsansätze für Greiftechnik wird deutlich, dass der Flexibilitätsgrad eines Systems über die Gestaltung austauschbarer Komponenten hinaus, insbesondere durch eine anpassungsfähige und aufwandsarme Gestaltung des Greifprozesses gesteigert werden kann. Dahingehend ist, basierend auf den ermittelten Lösungsansätzen, ein neuartiger End-Effektor zu erforschen. Das angewendete Greifprinzip ist aufgrund der hohen Materialintegritätsanforderungen der Kern eines dementsprechenden Werkzeuges. Die Analyse der bestehenden Lösungen erzeugt diesbezüglich einen äußerst diffusen Sachstand, da kein präferiertes Prinzip zu erkennen ist.

2.4 Entwicklung von Greifsystemen

2.4.1 Entwicklungsmethoden für Greifsysteme

Greifsysteme bilden ein komplexes Feld innerhalb der Handhabungstechnik. Daher ist deren systematische Entwicklung ein gut erforschter Bereich. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit werden bestehende Ansätze deshalb in klassische Entwicklungsmethoden für Greifsysteme im Allgemeinen und spezifische Vorgehensmodelle im Bereich der Handhabung flächiger, formlabiler Teile gegliedert (vgl. *Abschnitt 2.4.2*). Unter dem Begriff *Methode* wird hierbei eine systematische Vorgehensweise verstanden, welche über eine gewisse Verallgemeinerbarkeit verfügt.

Als die klassische Methode für die Konzeption und Entwicklung einer Handhabungsanlage gilt der Vorgehensplan nach WARNECKE & SCHRAFT (1990A), welcher einer Abbildung der VDI-Richtlinie 2222 auf die Handhabungstechnik entspricht (VDI 1997). Neben dem Prozess des Greifens werden zunächst alle weiteren Aufgaben wie das Speichern oder Bereitstellen in Funktionen untergliedert und Lösungsprinzipien erarbeitet. Die Kombination zu einer Gesamtlösung schafft die Grundlage für die folgende Konzeption und Ausarbeitung. Hinsichtlich der Bewältigung der dargestellten Teilschritte werden jeweils Hilfestellungen und Vorschläge dargestellt. Auf die speziellen Gegebenheiten bei einem Greifsystem muss diese Methode erst angepasst werden.

Dieser Adaptionsschritt wurde bei Anwendung des Vorgehens nach der VDI-Richtlinie 2740 schon vollzogen (VDI 1995, REINHART 2006), da die Handhabungsaufgabe explizit in Bezug auf das Greifen zu analysieren ist. Basierend auf einer Merkmalsliste werden Anforderungen an die einzelnen Subsysteme erarbeitet und parallel konzipiert. Je Subsystem stehen hierbei relevante Fragestellungen und Lösungsalternativen zur Verfügung.

CARDAUN (1981) stellt eine spezielle Methode zur Auswahl und Auslegung eines Greiferkonzeptes vor. Aufgabenspezifische Einflussgrößen werden Greifermerkmalen gegenübergestellt und das zu wählende Greifprinzip kriterienbasiert gewählt. Gebildete Werkstückgruppen dienen zur Definition konstruktiver Kenngrößen und zur Auslegung des Greifers.

Mehrere Vorgehensweisen bedienen sich des Einsatzes wissensbasierter Expertensysteme zur Konzeption und Auslegung von Greifern. Für die Auswahl kommerzieller Greifersystem existiert beispielsweise ein zweiphasiges Vorgehen zur Wahl des Greifertyps und der anschließenden Konkretisierung des Produkts

(PHAM & TACGIN 1992). MÜLLER (1997) entwickelte eine datenbankbasierte Software zur Auswahl der Art sowie Ausprägung des Greifers. Speziell für die Auslegung von End-Effektoren zum Entformen divergenter Polyurethanschaumstoffe kann in einem weiteren System die fall- und regelbasierte Konfiguration vorgenommen werden (ZENTAY ET AL. 1998). Neben diesen allgemeinen Entwicklungsmethoden für Greifsysteme sind insbesondere die spezifischen Vorgehensweisen für formlabile Bauteile von Interesse und werden folgend diskutiert.

2.4.2 Spezifische Vorgehensmodelle zur Entwicklung von Greifsystemen für formlabile Bauteile

Für den Anwendungsfall formlabile Bauteile existieren einige Arbeiten, die sich mit der übergeordneten Montageplanung beschäftigen (DIESS 1988, HOßMANN 1992, SCHNEIDER 1999). Lediglich GÖTZ (1991) geht dabei näher auf die Entwicklung der Greiftechnik ein, wobei Textilien explizit ausgeklammert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das iterative Planungsvorgehen der VDI-Richtlinie 2221 in zwei Phasen linearisiert (VDI 1993), welche jeweils die Hauptschritte *Analyse der Bauteileigenschaften*, *Gestaltung Greiftechnik* und *Definition ergänzender Komponenten und Prozesse* enthält.

Mehrere Dissertationen und Veröffentlichungen behandeln die Entwicklung von Greifsystemen für die Handhabung formlabiler Bauteile, ohne dass jeweils ein Entwicklungsvorgehen ableitbar ist (KOCH 1992, HOU 1993, JODIN 1991). Einige Arbeiten skizzieren anwendbare Vorgehensmodelle. GUTSCHE (1993) und SELIGER ET AL. (1992) schaffen für den gesamten Montageprozess eine Methode, welche die Systementwicklung mit der Prozess- und Produktentwicklung verzahnt. Das Greifen wird dabei zwar als wichtige Teilfunktion betrachtet, jedoch erfolgt die Greiferkonzeption lediglich auf Basis einer Zuordnungsmatrix. Das umzusetzende Wirkprinzip wählt GUTSCHE (1993) mittels einer subjektiven, erfahrungsbasierten Eigenschaftsbewertung aus. Den intensiven Einsatz von Zuordnungsmatrizen zur Gegenüberstellung von Anforderungen und Eigenschaften vollziehen SZIMMAT (2007) und SELIGER ET AL. (2003) für textile Halbzeuge. Nach dem Greifprinzip werden unter anderem auch die Vereinzelungsrichtung, die Greiferanordnung sowie die Zusatzkomponenten (z. B. Sensorik) auf diese Art und Weise bestimmt. Ähnlich ist die Vorgehensweise in STEPHAN (2001) und SELIGER ET AL. (2007). Interessant ist die Anwendung von Potenzialmatrizen hinsichtlich der Auswahl eines Wirkprinzips (STEPHAN 2001). EMONTS & BRECHER (2011) zeigen ein Bewertungsvorgehen zur Charakterisierung von Greifsystemen für verschiedene FVK-Halbzeuge auf, welches jedoch nur

eingeschränkt Aussagen bzgl. eines Wirkprinzips zulässt und keinerlei Aspekte der Auslegung oder Konzeption umfasst. Als äußerst spezialisiert ist die Arbeit von BÖGER (1998) einzustufen, in der Auslegungsvorschriften für spezielle, unterdruckbasierte Greifelemente zur Handhabung formlabiler Materialien erarbeitet werden.

2.4.3 Anwendbarkeit für die Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

Hinsichtlich der Anwendbarkeit auf die methodische Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien schaffen weder klassische Entwicklungsvorgehen noch spezifische Modelle eine ausreichende Grundlage (vgl. *Abbildung 19*). Die komplexen Anforderungen in Bezug auf Materialintegrität, Flexibilität und spezielle Materialeigenschaften können durch allgemeingültig formulierte Vorgehensweisen nicht entsprechend abgebildet werden. Gerade die zentrale Rolle der Greifprinzipauswahl innerhalb des Wirksystems wird z. T. kaum behandelt bzw. durch paralleles Konzipieren mehrerer Subsysteme nicht ausreichend fokussiert. Die vorgestellten Expertensysteme erweisen sich als zu anwendungsorientiert und haben den großen Nachteil, dass nur bestehende Möglichkeiten oder deren Kombination in die Lösungssuche integriert werden können. Innovative Ansätze werden durch das Fehlen kreativer Prozesse ausgeschlossen. Derartige Werkzeuge eignen sich gut zur Auslegung erprobter Konzepte und deren Anpassung innerhalb definierter Grenzen.

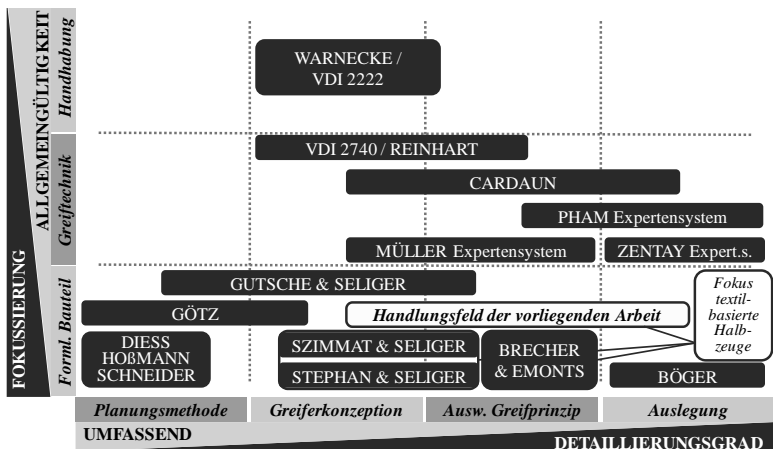


Abbildung 19: Übersicht bestehender Entwicklungsmethoden für Handhabungs- und Greifsysteme (mit dem Fokus auf formlabile Bauteile)

2.4 Entwicklung von Greifsystemen

Die behandelten Planungsmethoden im Bereich formlabiler Bauteile zeichnen sich oft durch ein umfassendes Betrachtungsfeld aus, wobei die Entwicklung eines Greifsystems kaum berücksichtigt wird. Liegt der Fokus auf der Greiferkonzeption, so verwenden alle untersuchten Arbeiten Zuordnungsmatrizen zur Auswahl eines Greifprinzips. Hierbei wird die Eignung einzelner Prinzipien hinsichtlich bestimmter Randbedingungen (z. B. Flächengewicht hoch) bewertet. Ähnlich wie bei Expertensystemen unterliegt dieses Vorgehen der Restriktion, nur bestehende Lösungsalternativen untersuchen zu können. Gerade innovative Anwendungsfelder wie die Handhabung technischer Textilien schaffen jedoch oftmals Anwendungsszenarios, die über die klassische Auswahlmöglichkeit einer Matrix hinaus gehen. Zusätzlich kann der geforderte Faktor *Flexibilität* in den einzelnen Entscheidungen nicht ausreichend berücksichtigt werden, da sich die Anforderungen nicht mehr explizit in bestimmte Bereiche einteilen lassen.

2.5 Zusammenfassung des Handlungsbedarfs und Fokussierung der Zielsetzung

Der aufgezeigte Stand der Wissenschaft und Technik verdeutlicht die Ursachen für ein derzeitiges Fehlen automatisierter Handhabungstechnik in der Faserverbundfertigung und lässt eine Präzisierung der in *Abschnitt 1.4* behandelten Zielsetzung zu. Das zu erforschende Greifsystem für die automatisierte Handhabung ist hinsichtlich einer konturselektiven Greiffläche und dem notwendigen Adaptionsaufwand als hochflexibel auszulegen. Die präzise, schonende und möglichst flächige Einleitung der Haltekraft ist hierbei zu berücksichtigen und dementsprechend ein optimales Wirkprinzip auszuwählen. Auch bezüglich des Flexibilisierungspotenzials hat die Wahl des Wirkprinzips bereits enorme Auswirkungen, so dass diesem im zu erforschenden Entwicklungsvorgehen eine zentrale Rolle zukommen muss. Die ermittelten Schwachstellen bestehender Lösungen für die Handhabung formlabiler Materialien sind u. a. auf eine fehlende Betonung dieser Aspekte in der Entwicklung von Greifsystemen zurückzuführen.

Im Hinblick auf die hohe Variantenvielfalt und die Forderung nach konturselektiven Haltekraften, beispielsweise zum Absortieren von textilen Zuschnitten, stellt die Flexibilisierung des gesamten Greifsystems ein wichtiges Kriterium dar, welches ebenfalls in das Entwicklungsvorgehen zu integrieren ist. Der notwendige Adaptionsaufwand zur Realisierung der Flexibilität ist hierbei durch geeignete Automatismen möglichst gering zu halten. Diesbezüglich ist die Steuerungstechnik für das automatisierte Greifsystem zu gestalten. Allgemeine und spezialisierte Entwicklungsmethoden berücksichtigen diesen Sachverhalt nicht ausreichend und werden den Anforderungen formlabiler, textiler Handhabungsgüter daher nicht gerecht.

Als zentraler Ausgangspunkt bei der Entwicklung eines Greifsystems wird zusammenfassend die Auswahl eines optimalen Wirkprinzips identifiziert, welches basierend auf zu definierenden Anforderungen und dem notwendigen Funktionsbedarf zu erforschen ist. Hierbei ist das Vorgehen jedoch so zu gestalten, dass dem Entwickler die Möglichkeit gegeben wird, neuartige Ansätze zu berücksichtigen und bezüglich ihres Einsatzpotenzials situativ zu bewerten. Hilfsmittel für die Ableitung und Definition entsprechender Anforderungen sind zur Verfügung zu stellen und ein Evaluations- sowie Bewertungsvorgehen aufzuzeigen. Die folgende Konzeption und Auslegung der Greiftechnik ist ebenfalls auf diese Umstände anzupassen. Beides wird im folgenden *Kapitel 3* thematisiert.

2.5 Zusammenfassung des Handlungsbedarfs und Fokussierung der Zielsetzung

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

3.1 Randbedingungen für die Erarbeitung eines methodischen Vorgehens

Aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik kann, wie in *Abschnitt 2.5* verdeutlicht, abgeleitet werden, dass gleichermaßen ein hochflexibles Greifsystem zum automatisierten Absortieren von technischen Textilien, wie auch eine adäquate Vorgehensmethode zur Entwicklung derartiger Systeme derzeit fehlen. Die Handhabung technischer Textilien, mit deren Anwendungsfokus im Bereich innovativer Hochleistungswerkstoffe für Zukunftsbranchen wie beispielsweise die Luft- und Raumfahrt, stellt hierbei besondere Anforderungen an die Wahl des Wirkprinzips und die zu gestaltende Flexibilität des Systems. Diese Herausforderungen sind in einem, in diesem Kapitel abzuleitenden, Entwicklungsvorgehen zu berücksichtigen. Resultierend aus den bisherigen Ausführungen unterliegt das zu erforschende methodische Vorgehen zusammengefasst folgenden Randbedingungen:

- Die systematische Strukturierung und Analyse der Aufgabenstellung sowie die Extraktion spezifischer Anforderungen sind die Basis des Vorgehens. Für die Materialgruppe der technischen Textilien sind relevante Einflussgrößen auf systemtechnische Anforderungen abzubilden.
- Die Auswahl des einzusetzenden physikalischen Wirkprinzips beim Greifen bildet die zentrale Entscheidung in der Entwicklungsphase. Gegenüber den bisherigen Entscheidungshilfen ist eine anforderungsbasierte Auswahl- und Untersuchungsmethode zu erforschen. Starre Zuordnungstabellen und Expertensysteme bieten im technisch ausgereiften Umfeld probate Hilfsmittel. Vielmehr gilt es jedoch, vor dem dargestellten Hintergrund geeignete Methoden und Untersuchungsvorgaben in den spezifischen Entwicklungsstadien zur Verfügung zu stellen.
- Hochflexible Greifsysteme können durch automatisierte Adaptionenfähigkeit gestaltet werden. Die Umsetzung dieser Prämisse ist in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses geeignet zu hinterlegen.
- Weitergehend ist auch das Entwicklungsvorgehen flexibel bzgl. des Anwendungsfalls zu gestalten, so dass es in der Form eines Leitfadens auf andere Aufgabenstellungen anwendbar ist. Den Rahmen bildet dabei die Analyse der Aufgabenstellung bis hin zur Erarbeitung eines technisch schlüssigen Konzepts.

Grundlegend kann dabei auf ein breites Spektrum an Methoden und Vorgehensweisen aus klassischen Entwicklungsmodellen zurückgegriffen werden, die im Folgenden adaptiert (vgl. *Abschnitte 3.2.1 ff*) und auf der Basis eines Referenzszenarios zu einem detaillierten Vorgehen verknüpft werden (vgl. *Abschnitte 3.3 ff*).

3.2 Methodisches Vorgehen

3.2.1 Adaption bestehender Entwicklungsmodelle und Definition eines methodischen Vorgehens

In der Literatur bestehen neben den im Stand der Technik aufgeführten, handhabungsbezogenen Vorgehen (vgl. *Abschnitt 2.4.1*) eine Vielzahl klassischer Entwicklungsmodelle. Im Folgenden werden diese hinsichtlich der Kriterien

- *chronologische Entwicklungsphasen,*
- *methodische Aufbereitung der Entwicklungsschritte sowie*
- *Strukturierung des zu entwickelnden Systems*

analysiert, in Bezug auf die Entwicklung eines hochflexiblen Greifsystems adaptiert und in einem gesamthaften Vorgehen abgebildet.

Drei Modelle, welche das oder die Wirkprinzip(ien) eines technischen Systems auf der Basis abgeleiteter Funktionen frühzeitig in den Vordergrund stellen, sind die VDI-Richtlinie 2221 (VDI 1993), das *Pyramidenmodell der Konkretisierungsebenen* (LINDEMANN 2005) und die *Arbeitsschritte des Methodischen Konzipierens* nach PAHL ET AL. (2007). Diesen liegen vier grundsätzliche Entwicklungsphasen in identischer Chronologie bis zur Konzeption des Systems zugrunde, die lediglich unterschiedlich detailliert ausgestaltet sind (vgl. *Abbildung 20*).

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

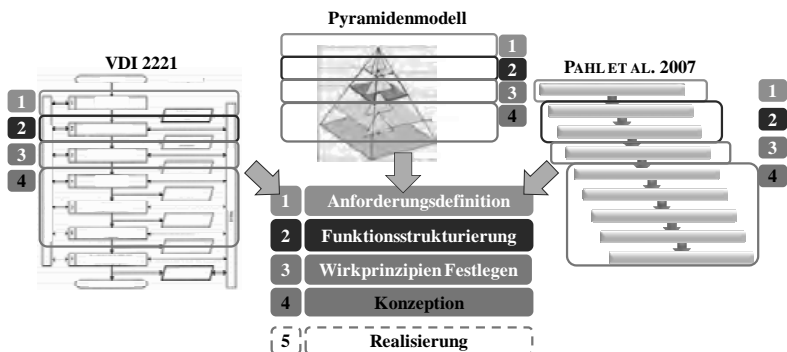


Abbildung 20: Chronologische Entwicklungsphasen verschiedener Modelle

Unabhängig von der Entwicklungsebene und deren Abstraktionsgrad existieren Vorgehensmodelle, die allgemeingültige Verfahrensanweisungen darstellen. Während lineare Abläufe zum Lösen eines Problems nach EHRENSPIEL (2007) und PAHL ET AL. (2007), abgegrenzte Teilschritte beinhalten, bildet das *Münchener Vorgehensmodell (MVM)* ein flexibles, durch sich überschneidende Schritte gekennzeichnetes Werkzeug, welches durch den Abstraktionsgrad auf unterschiedlichste Aufgabenstellungen im Entwicklungsprozess anwendbar ist (LINDEMANN 2007). Die zu durchlaufenden Schritte unterscheiden sich inhaltlich kaum, sind beim MVM jedoch detaillierter aufbereitet (vgl. *Abbildung 21*).

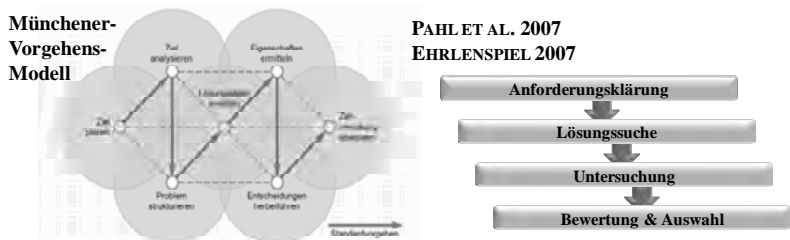


Abbildung 21: Methodischer Ablauf von Entwicklungen
bzw. einzelner Entwicklungsschritte

Zur systemtechnischen Strukturierung eines Greifsystems stehen zum einen Modularisierungsansätze, wie in *Abschnitt 2.2.3* aufgezeigt (v. a. nach HESSE ET AL. 2004), zur Verfügung. Zum anderen strukturiert das *V-Modell* nach der VDI-Richtlinie 2206 das zu entwickelnde, mechatronische System hierarchisch in Subsysteme und Komponenten und unterscheidet dabei nach Mechanik sowie Steuerungshard- und software (VDI 2006, STÜTZEL & SPIEGELBERGER 2007).

3.2 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen im V-Modell fokussiert dabei den Teilbereich der Realisierung. Da die Grundlage für eine automatisierbare Anpassungsfähigkeit bei modernen Greifsystemen oftmals nur über die Integration von Sensoren, Aktoren und intelligenten Steuerungen realisierbar ist, liegt die Betrachtung und Umsetzung als mechatronisches System nahe. Hierbei sind die Eigenschaften der einzelnen Module zu beachten und deren Interaktion zu gewährleisten.

Gesamthaft lässt sich auf Basis der durchgeführten Analyse ein angepasstes Vorgehen für die Entwicklung eines hochflexiblen Greifsystems für technische Textilien ableiten (vgl. *Abbildung 22*).

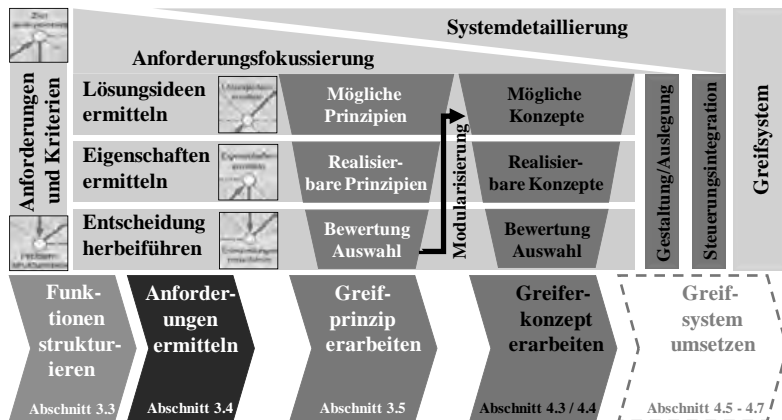


Abbildung 22: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung eines Greifsystems für die Handhabung technischer Textilien

Die chronologisch aufeinanderfolgenden Phasen sind dabei von links nach rechts dargestellt und hinsichtlich eines Greifsystems adaptiert, während die einzelnen Schritte der Phasen *Prinzip* und *Konzept erarbeiten* in der Form eines sich verengenden Trichters von oben nach unten durchlaufen werden. Hierbei werden die drei Entwicklungsebenen

- *Lösungsideen ermitteln*,
- *Eigenschaften ermitteln* und
- *Entscheidung herbeiführen*

aus dem MVM abgeleitet und führen letztendlich zu einer methodisch unterstützten Auswahl eines Wirkprinzips bzw. eines modularisierten Konzepts. Ausgangspunkt ist die Strukturierung der Aufgabe in Form von abzubildenden

Funktionen (*Problem strukturieren* – MVM) und die Anforderungsdefinition (*Ziel analysieren* – MVM).

3.2.2 Detaillierung des Vorgehens

Die im Folgenden beschriebene Detaillierung soll die notwendigen Teilschritte des in *Abbildung 22* aufgezeigten Vorgehens verdeutlichen, welche dann anhand des Referenzszenarios exemplarisch durchgeführt werden (*Abschnitt 3.3* bis *3.5*). Der zentrale Schritt, um von einer abstrakten Zielformulierung zu einer strukturierten Aufgabenstellung zu gelangen, ist die Analyse und Strukturierung der im System abzubildenden Funktionen. Nach dem Münchener Vorgehensmodell entspricht dies den Handlungsschritten *Ziel analysieren* und *Problem strukturieren* (vgl. *Abbildung 21* und *Abbildung 22*). Die VDI-Richtlinie 2803 kann hierzu als Hilfsmittel herangezogen werden, um Funktionen zu sammeln und nach verschiedensten Kriterien zu strukturieren (VDI 1996). Die Erstellung eines Funktionsmodells mit der Erfassung der relevanten Sollprozesse des Handhabungssystems (Hauptfunktionen) gewährleistet das Extrahieren der spezifischen Anforderungen an das zu erforschende Greifsystem und lässt in den folgenden Entwicklungsschritten eine strukturierte Bearbeitung der Aufgabenstellung zu. Im *Abschnitt 3.3* wird das Vorgehen bei der Strukturierung der Funktionen anhand des Referenzszenarios detailliert.

Nahezu allen gängigen Entwicklungsvorgehen liegt eine Anforderungsanalyse bzw. -definition zu Grunde. Im angewendeten Münchener Vorgehensmodell entspricht diese dem Schritt *Ziel analysieren* und ist in enger Verbindung zur Funktionsmodellierung durchzuführen. In Bezug auf das folgende Entwicklungsvorgehen bilden die ermittelten Anforderungen die Rahmenbedingungen für die Auswahl eines geeigneten Wirkprinzips sowie Greiferkonzepts, indem die jeweils anzuwendenden Bewertungskriterien aus ihnen abgeleitet werden.

Neben den grundsätzlichen Anforderungen, welche direkt aus der Erfüllung der Funktionen resultieren, existieren vielfältige Einflussfaktoren innerhalb des Entwicklungsszenarios, wodurch entweder eigenständige Anforderungen entstehen oder aber bestehende beeinflusst werden. Die einzelnen Einflussgrößen sind zu strukturieren und durch geeignete Methoden in ihrer Höhe und Ausprägung zu bestimmen, um letztlich aus den Einflussgrößen Anforderungen für das zu entwickelnde Greifsystem abzuleiten, wobei besonders auf die geforderte Flexibilität zu achten ist. *Abbildung 23* zeigt die zu durchlaufenden Schritte bei der Erarbeitung eines umfassenden Anforderungssystems.

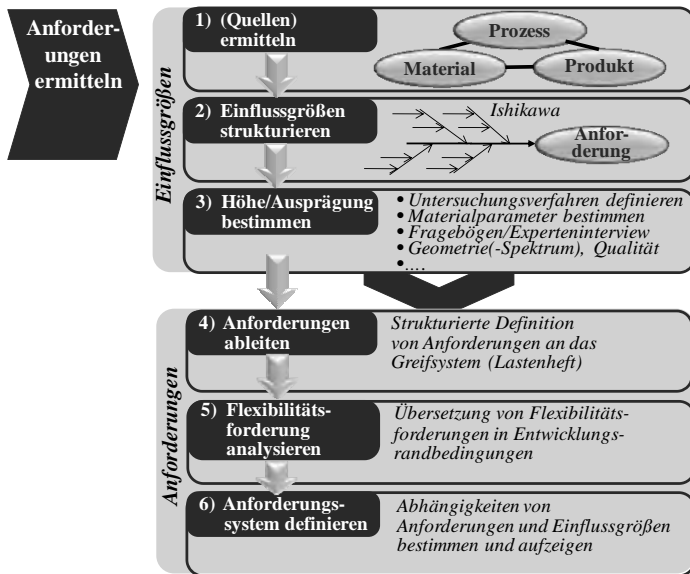


Abbildung 23: Vorgehen zur Ermittlung von Anforderungen an ein hochflexibles Greifsystem für das Handhaben technischer Textilien

Bezogen auf das Handhaben technischer Textilien lassen sich die Einflussgrößen in material-, produkt- und prozessspezifische Faktoren untergliedern, welche am Beispiel des Referenzszenarios in *Abschnitt 3.4* anhand des aufgezeigten Vorgehens in ein Anforderungssystem überführt werden. Dieses dient als Grundlage für die Auswahl eines Greifprinzips sowie die Konzeption des Greifsystems.

Gemäß des in den *Abschnitten 3.2.1* und *3.2.2* vorgestellten methodischen Entwicklungsvorgehens schließt sich an die Definition von Anforderungen die Erarbeitung eines anzuwendenden Greifprinzips zur Handhabung technischer Textilien an. Hierbei werden im Folgenden die Teilschritte *Lösungsideen ermitteln*, *Eigenschaften ermitteln* und *Entscheidung herbeiführen* nach dem aufgezeigten Vorgehen durchgeführt. *Abbildung 24* zeigt die einzelnen Schritte zur Auswahl und Absicherung des Greifprinzips.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

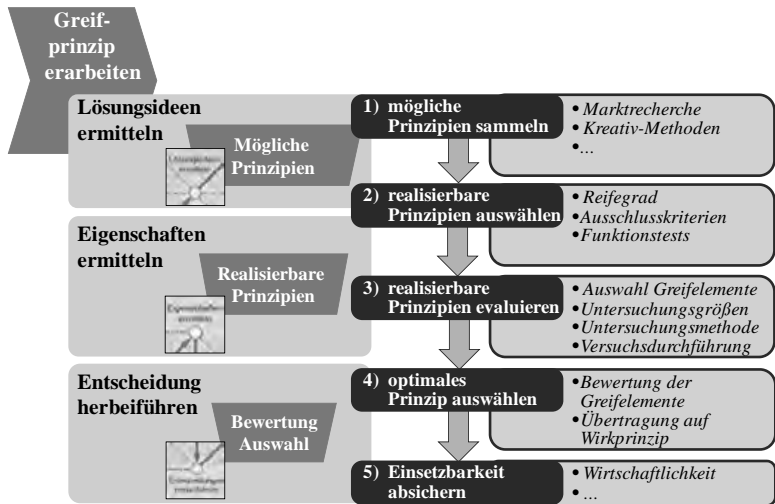


Abbildung 24: Vorgehen zur Auswahl und Absicherung eines Wirkprinzips

Unter Anwendung der in *Abschnitt 3.2.3* detaillierten Techniken sind zunächst potenzielle physikalische Prinzipien für das Halten während des Greifprozesses zusammenzutragen. Aus diesen sind auf Basis des technologischen Reifegrads, aus den Anforderungen resultierender Ausschlusskriterien und ersten Funktionstests, anwendbare Prinzipien zu extrahieren, deren Eigenschaften zu evaluieren sind. Hierzu gilt es, entsprechende Greifelemente und Untersuchungsgrößen auszuwählen sowie die Untersuchungsmethodik festzulegen. Abschließend sind die Prinzipien anhand der evaluierten Greifelemente zu bewerten, das optimale Greifprinzip auszuwählen und hinsichtlich kritischer Fragestellungen (z. B. Wirtschaftlichkeit) abzusichern. Die detaillierte Anwendung des Vorgehens wird in *Abschnitt 3.5* anhand des Referenzszenarios aufgezeigt.

Die folgende Konzeption des Greifsystems ist anhand einer gezielten Modularisierung durchzuführen (*HESSE ET AL. 2004*), welche die Basis für die Umsetzung im Sinne der Parallelisierung von mechanischer Gestaltung sowie Auslegung und steuerungstechnischer Integration (*V-Modell*) darstellt. Es lässt sich aus dem definierten Vorgehen ein allgemeingültiger Ablauf detaillieren, der in *Abbildung 25* dargestellt ist. Die Anwendung der Entwicklungsschritte in der Konzeptions- und Umsetzungsphase sind jedoch stark von der Wahl des Greifprinzips abhängig, damit nur eingeschränkt auf andere Prinzipien und Greifsysteme übertragbar und werden deshalb im nachfolgenden *Kapitel 4* exemplarisch dargestellt.

3.2 Methodisches Vorgehen

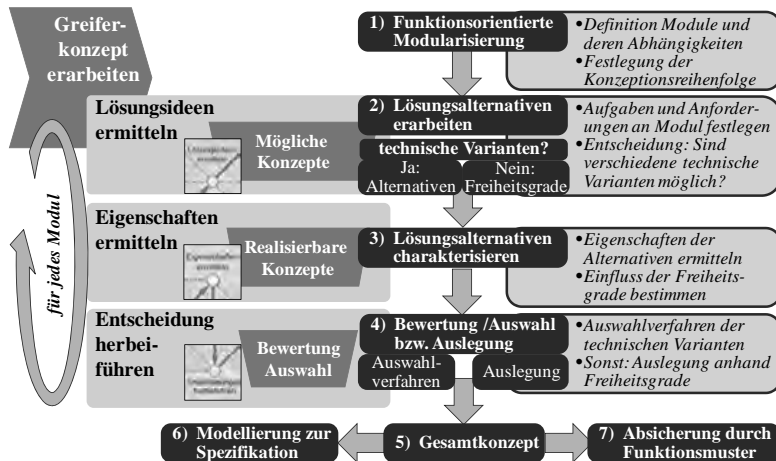


Abbildung 25: Vorgehen zur Konzeption und Absicherung eines Greifer-Gesamtkonzepts

Basierend auf den definierten Funktionen und zugeordneten Anforderungen sind Einzelmodule (Subsysteme oder auch Baugruppen des Greifers) zu erarbeiten, die einen bestimmten Funktionsrahmen abbilden und mit anderen Modulen in Wechselwirkung stehen. Aus diesen Abhängigkeiten ist die Konzeptionsreihenfolge durch Priorisierung abzuleiten und für jedes Modul einzeln durchzuführen (Schritt 2 bis 4). Hierbei wird unterschieden, ob für ein Modul technische Varianten möglich sind, wobei als technische Variante eine nicht lediglich durch Parametrierung zu unterscheidende Lösung verstanden wird. Liegen unterscheidbare Varianten vor, sind die möglichen Lösungsalternativen zu ermitteln, zu charakterisieren und durch ein geeignetes Bewertungsverfahren auszuwählen. Bestehen nur durch die Parametrierung zu unterscheidende Alternativen, so sind die Freiheitsgrade zu ermitteln, der Einfluss auf die Funktionalität im Sinne der Anforderungen abzuleiten und die Parameter auszulegen. Durch die Kombination der Einzelkonzepte kann dann ein Gesamtkonzept abgeleitet werden. Eine folgende analytische Modellierung dient zur Spezifikation des Gesamtsystems und die Realisierung eines Funktionsmusters der Absicherung des Konzepts. Die weitere Detaillierung der Vorgehensweise anhand des Referenzszenarios wird auf Basis des gewählten Wirkprinzips im *Kapitel 4* beschrieben.

3.2.3 Ebenen des Entwicklungsprozesses und spezifische Entwicklungswerkzeuge

Die zentralen Punkte des Entwicklungsprozesses nach dem vorgestellten Vorgehen sind das Erarbeiten eines optimalen Wirkprinzips sowie Greiferkonzepts. Für die drei relevanten Entwicklungsebenen stehen nach dem MVM eine Vielzahl von anwendbaren Methoden und Werkzeugen zur Verfügung. In diesem Abschnitt soll ein Überblick gegeben werden, während die Ergebnisse bzw. die Anwendung am Beispiel des Referenzszenarios in den folgenden *Abschnitten 3.3 ff* und im *Kapitel 4* dargestellt sind.

Zur *Ermittlung von Lösungsideen* können grundsätzlich entweder verfügbare Lösungen recherchiert oder neue Alternativen generiert werden. Im Fall des Greifprinzips liefert die Suche nach bisher schon eingesetzten physikalischen Ansätzen durch Markt-, Patent- und Literaturrecherche den Großteil der Alternativen, da der zur Verfügung stehende Lösungsraum möglicher Prinzipien durch die geringe Komplexität des Betrachtungsraums begrenzt ist. Trotzdem lohnt sich gerade bei neuartigen Aufgabenstellungen wie der Handhabung technischer Textilien der Einsatz von Methoden zum Auffinden innovativer Lösungen durch Kreativmethoden sowie Übertragungen aus technisch-ähnlichen oder differenten Anwendungen und der Natur (Bionik).

Die Suche nach möglichen Konzepten gestaltet sich schwieriger, da Lösungen für die einzelnen Teilmodule gefunden werden müssen. Hierbei existieren einerseits Standardlösungen (z. B. Trägersystem), andererseits sind für relativ komplexe Teilsysteme auch neuartige Ansätze zu erforschen bzw. zu übertragen. Einzelne meist Entwicklungsteam-bezogene Hilfsmittel, Werkzeuge und Verfahrensanweisungen wie beispielsweise *Mind-Mapping* sind in der Literatur ausführlich beschrieben und situationsbedingt anzuwenden (LINDEMANN 2007, EHRENSPIEL 2007, PAHL ET AL. 2007, SCHLICKSUPP 1985, SCHLICKSUPP 1993, MEHRMANN & WIRTZ 2000, HILL 2001, HILL 1999, KLEIN 2007, SIKORA 2001).

Die zur Verfügung stehenden Analysemethoden für die Ebene *Eigenschaften ermitteln* unterscheiden sich bzgl. Ausprägung, Aufwand und Aussagekraft stark voneinander und sind daher nach Bedarf und Möglichkeiten einzusetzen. Von theoretischen Betrachtungen (Abschätzen oder Vergleichen), über analytische oder numerische Berechnungen, bis hin zu orientierenden oder aufwändigeren experimentellen Evaluierungen reicht das Portfolio an Untersuchungsmethoden (vgl. *Abbildung 26*; LINDEMANN 2005). Für die elementare Analyse potenzieller Wirkprinzipien bieten sich theoretische Betrachtungen, analytische

3.2 Methodisches Vorgehen

Berechnungen und insbesondere orientierende Stichversuche zur Qualifizierung der Prinzipien an. Von Funktionsmustern im Sinne der VDI-Richtlinie 2221 kann in dieser Entwicklungsphase noch nicht gesprochen werden (VDI 1993). Die Analyse unterschiedlicher Konzepte fokussiert sich durch die höhere Komplexität des Gesamtsystems auf aufwändigere Methoden wie beispielsweise die (numerische) Simulation, obwohl Teilsysteme durchaus auch mittels einfacher Untersuchungen evaluiert werden können.

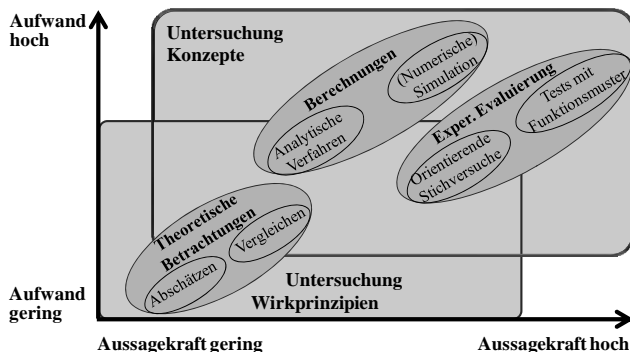


Abbildung 26: Einordnung der Analysemethoden und des Anwendungsfokus
(LINDEMANN 2005)

Auf der Basis der ermittelten Eigenschaften ist in der Ebene *Entscheidung herbeiführen* letztlich eine Variante durch eine bewusst getroffene, methodisch unterstützte Entscheidung auszuwählen (LINDEMANN 2007). Bei mehreren Alternativen kann aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis aus der Analysephase (Anforderungen und Eigenschaften) hierzu ein theoretisches, multi-kriterielles Bewertungsverfahren eingesetzt werden (BREIING & KNOSALA 1997, HOFFMEISTER 2000). Die große Auswahl an zur Verfügung stehenden Verfahren ist in der Literatur durch zahlreiche Veröffentlichungen aufgezeigt (BREIING & KNOSALA 1997, HOFFMEISTER 2000, HOCEVAR & RIEDL 2003), jedoch eignen sich nicht alle Ansätze gleichermaßen für die Auswahl eines anzuwendenden Prinzips oder Konzepts. Die Entscheidungen für ein Wirkprinzip bzw. ein Konzept werden in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses auf der Basis unterschiedlichster Informationen über die Alternativen getroffen, so dass einerseits eine genaue Abschätzung der Kosten nicht möglich ist und andererseits eine Gewichtung der Kriterien empfehlenswert ist. Ein weitverbreitetes Verfahren ist die *Nutzwertanalyse* (NWA) nach ZANGEMEISTER (1973), welche eine Berücksichtigung monetärer wie nicht-monetärer sowie objektiver und subjektiver Informationen zulässt (HOFFMEISTER 2000).

Stehen lediglich gleichartige Lösungsvarianten zur Verfügung oder unterscheiden sich die Möglichkeiten nur durch die Wahl einzelner Parameter, so liefert eine experimentelle oder theoretische Auslegung über ein Bewertungsverfahren hinaus Eigenschaften und belastbare Kennwerte, die zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

3.2.4 Beschreibung des Referenzszenarios

Die detaillierte Beschreibung des methodischen Entwicklungsvorgehens wird anhand eines bisher nicht gelösten Anwendungsbeispiels erarbeitet und beschrieben. Wie im *Kapitel 1* und *2* aufgezeigt, fehlen hochflexible Greifsysteme zum Absortieren technischer Textilien von industriellen Schneidanlagen, so dass diese Prozesse u. a. in der Fertigung von Faserverbundwerkstoffen noch manuell durchgeführt werden müssen. Während in diesem Kapitel die methodische Grundlage für die Erarbeitung derartiger Greifer dargestellt (*Abschnitt 3.2*) und am Beispiel eines Referenzszenarios detailliert wird (*Abschnitt 3.3* bis *3.5*), beschreiben die folgenden Kapitel die systemtechnische Konzeption sowie Umsetzung (*Kapitel 4*) und die Validierung (*Kapitel 5*).

Das gewählte Referenzszenario umfasst die Fertigung von innovativen, Kohlenstofffaser-basierten Verbundstrukturen für die Luftfahrtindustrie. Kleine Stückzahlen und die zunehmende Verbreitung dieses Werkstoffes innerhalb der Primärstruktur führen zu einer hohen Diversifikation des herzustellenden Produktportfolios, was durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile aus zumeist ungleichförmigen Zuschnitten verschiedenster Halbzeugvariationen verstärkt wird (REINHART ET AL. 2010D). Deshalb werden drei formvariante Bauteile (Bauteile mit variierender Grundgeometrie und Ausdehnung) ausgewählt, die aus unterschiedlichen, überwiegend großflächigen Zuschnitten von vier textilen Halbzeugen bestehen (vgl. *Abbildung 27*). Das Absortieren aller zugehörigen Zuschnittkonturen nach dem Schneidprozess soll durch einen hochflexiblen Roboter-Endeffektor automatisiert erfolgen, wobei die Prozesssicherheit (v. a. Material- und Strukturintegrität) und Wirtschaftlichkeit gewährleistet sein muss. Sowohl großflächige Zuschnitte, als auch kleine Verstärkungslagen müssen dabei durch das Greifsystem an jeder, durch den Nesting-Prozess¹ des Cutters vorgegebenen, beliebigen Position und Orientierung auf dem Schneidtisch separat greif- und vereinzelbar sein. Wünschenswert ist eine Reduzierung der

¹ Unter einem Nesting-Prozess versteht man im Allgemeinen die, meist Software gestützte, optimierte Anordnung von Zuschnitten bei der Verarbeitung von Flachmaterialien (z. B.: Textil, Blech) in Schneideanlagen (z. B.: Lasertrenn- oder Wasserstrahlanlagen), mit dem Ziel der Verschnitt-Minimierung.

3.3 Analyse der Aufgabenstellung anhand einer Funktionsstrukturierung

Prozesszeit durch das simultane Herausgreifen mehrerer Zuschnitte, gefolgt von dem einzelnen Ablegen an einer definierten Position.

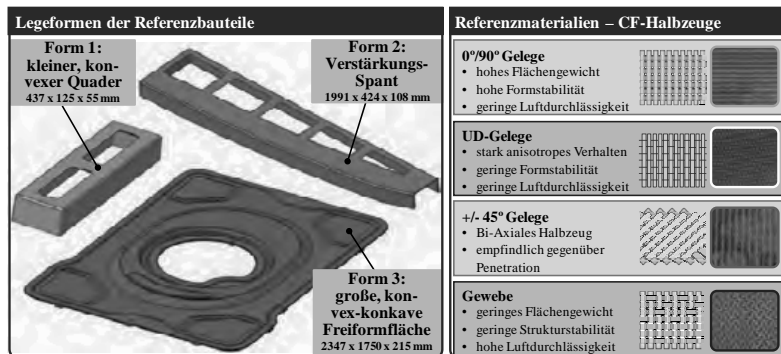


Abbildung 27: Bauteile (Legeformen) und CF-Halbzeuge des Referenzszenarios

3.3 Analyse der Aufgabenstellung anhand einer Funktionsstrukturierung

Die wesentlichen Aufgaben des anvisierten Handhabungssystems sind das Aufnehmen der Zuschnitte vom Cuttertisch, der Transport sowie das Ablegen in einem Zwischenlager, wobei hierbei dem Greifsystem bestimmte Funktionalitäten zuzuordnen sind (vgl. auch *Abbildung 8*). Die notwendigen Teilfunktionen sind im nachstehenden, ablaforientierten Funktionsmodell geordnet (vgl. *Abbildung 28*).

LEGENDE

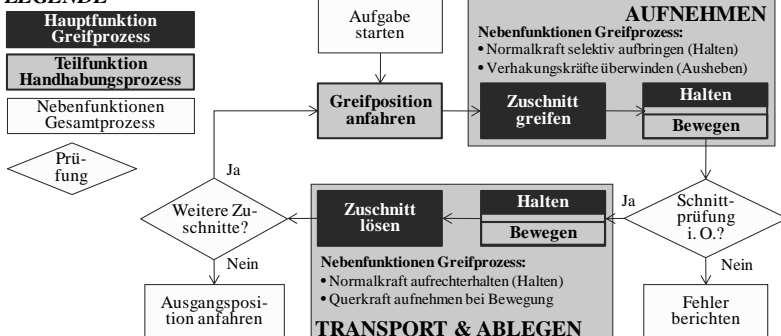


Abbildung 28: Ablaforientiertes Funktionsmodell des Referenzszenarios

Es wird zwischen Hauptfunktionen des Greifprozesses und notwendigen Teilfunktionen des Handhabungsprozesses mit Einfluss auf das Greifen in den Prozessphasen *Aufnehmen* sowie *Transport und Ablegen* unterschieden. Weitergehend existieren Nebenfunktionen und Prüfungen, welche der Darstellung des Gesamtprozesses Absortieren dienen, aber keine direkte Auswirkung auf die Ausprägung des Greifprozesses haben.

Aus den Teilfunktionen lassen sich bereits erste funktionsspezifische Anforderungen definieren, welche die Nebenfunktionen des Greifprozesses darstellen bzw. diesen näher beschreiben. Diese sind ebenfalls in der abgebildeten Ablaufstruktur hinterlegt. Die Sammlung und Strukturierung aller Anforderungen wird im folgenden Abschnitt behandelt, indem zunächst relevante Einflussgrößen identifiziert und quantifiziert werden, um deren Auswirkung auf die Entwicklungsvorgaben einzuschätzen. Die Einflussgrößen sind daher an den Funktionen des Greifprozesses zu spiegeln, um belastbare Anforderungen zu erhalten. Beispielsweise definieren die Abmessungen und Kontur des Zuschnitts die selektive Greiffläche, während die Flächenmasse des Zuschnitts in Verbindung mit der Prozessphase (Ausheben gegen Verhakungskräfte oder beschleunigter Transport) die Höhe der Haltekraft bestimmen. Diese Zusammenhänge gilt es zu erarbeiten.

3.4 Anforderungsanalyse

3.4.1 Materialspezifische Einflussgrößen

Eine wichtige Quelle für anforderungsrelevante Einflussgrößen ist das Handhabungsmaterial selbst, da dessen Eigenschaften maßgeblich zum Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellung beitragen. Unter materialspezifischen Faktoren sind in diesem Zusammenhang alle Parameter zu verstehen, die durch die Eigenschaften des Materials dominiert werden. Technische Textilien und insbesondere Kohlenstofffaser-basierte Systeme sind durch mehrere textiltechnische Parameter charakterisiert (WULFHORST 1998, WULFHORST ET AL. 2006, DIN 1969, HUFENBACH 2007):

- Faserstoff (Feinheit, Filamentdicke, Dehnungsverhalten trocken und nass, E-Modul, Dichte, Schmelztemperatur,...)
- Halbzeugart (Gelege, Gewebe, Multiaxial, ...)
- Bindungsart (Atlas, Köper, Leinwand, ...)
- Vernähung
- Fadendichte
- Zusatzmaterialien wie Binder (Vlies, Pulver) o. ä.

3.4 Anforderungsanalyse

Diese Kenngrößen sind bzgl. des zu verarbeitenden Halbzeuges zwar gut verfügbar, geben jedoch wenig Aufschluss über die Handhabungs- und greifspezifischen Randbedingungen und Schwierigkeiten. Grundlegende Aussagen zu handhabungsrelevanten Materialkennwerten formlabiler Flächengebilde liefert bereits KÖHLER (1983). Auch GOTTSCHALK (1996), STEPHAN (2001) und SZIMMAT (2007) behandeln den Einfluss textiler Materialkenngrößen auf die Ausprägung von Haltekräften. GUTSCHE (1993) führt ein Kenngrößenmodell für technische Textilien ein und beschreibt deren Einfluss auf die Bestimmungsgrößen von Nadelgreifern.

In *Abbildung 29* werden darauf aufbauend, für textile Halbzeuge, materialspezifische Einflussfaktoren auf das Greifen und Handhaben zusammengestellt und nach allgemeinen, d. h. vom Greifprinzip unabhängigen, und greifprinzipspezifischen Größen unterschieden. Letztere bilden oft Kennwerte, die nur beim Einsatz eines besonderen Prinzips oder einer Gruppe davon von Relevanz sind. Beispielsweise ist die Luftdurchlässigkeit nur bei pneumatisch wirkenden Prinzipien von Interesse. Zur Veranschaulichung wird die Darstellung in einem Ursache-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa (ursprüngliches Einsatzfeld: Analyse von Qualitätsproblemen) gewählt, da hierbei eine übersichtliche Strukturierung nach Eigenschaftsklassen erreicht werden kann (SCHULTE-ZURHAUSEN 2005; angewendet auch von FELDMANN ET AL. 2010).

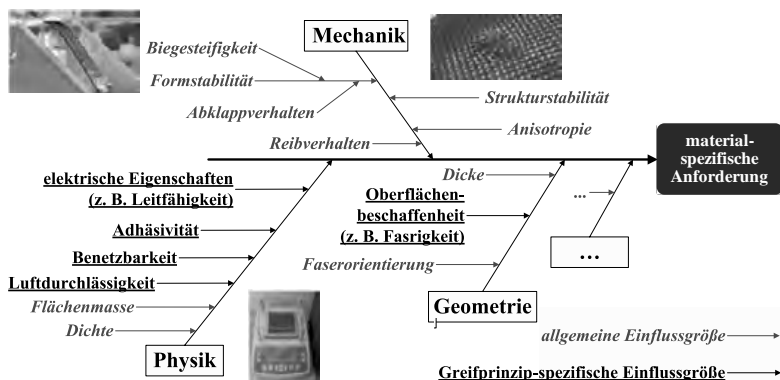


Abbildung 29: Auswahl und Strukturierung materialspezifischer Einflussgrößen zur Definition von Anforderungen

Die Bestimmung der Materialkennwerte erfordert die Durchführung spezifischer Untersuchungsverfahren. Für Textilien bestehen hierbei die bekannten Systeme nach *Kawabata* und *FAST (Fabric Assurance by Simple Testing)*, welche jedoch

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

aufgrund ihrer aufwändigen Messgeräte derzeit kaum industrielle Relevanz erlangen (GOTTSCHALK 1996). Einen sehr detaillierten Überblick über die experimentellen Möglichkeiten zur Bestimmung vorwiegend mechanischer Materialkennwerte für die Simulation von Bekleidungsprodukten liefert SEIF (2007). Zum Teil begründet sich die Relevanz einer Einflussgröße jedoch ausschließlich auf die Existenz spezieller Greifprinzipien (z. B. Benetzbarkeit für Gefriergreifen), so dass sich die experimentelle Untersuchung auf gängige Kennwerte beschränken sollte.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf Basis einschlägiger Messverfahren ein universeller Prüfaufbau erarbeitet, der z. T. die teil-automatisierte Prüfung der relevanten materialspezifischen Einflussgrößen zulässt (vgl. *Abbildung 30*).

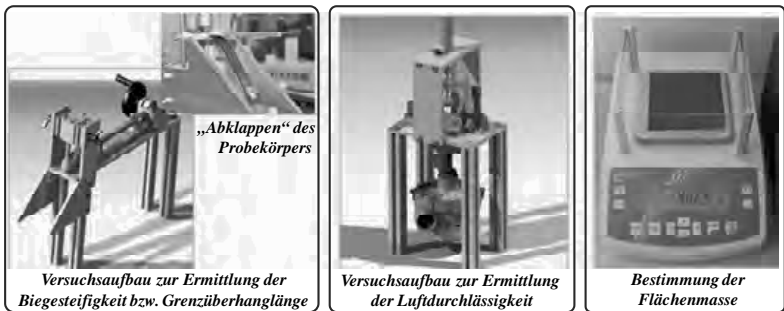


Abbildung 30: Untersuchung relevanter Materialkennwerte

Im Folgenden werden exemplarisch für die Referenzmaterialien (vgl. *Abbildung 27*) die ermittelten Materialkennwerte sowie hierbei verwendete Analyseverfahren dargestellt (vgl. *Tabelle 3* und *Abbildung 120* bis *Abbildung 125* im Anhang), so dass zum einen eine grundsätzliche Vorgehensweise zur Bestimmung handhabungsspezifischer Parameter erarbeitet und zum anderen grundsätzliche Randbedingungen aufgezeigt werden.

Tabelle 3: Ermittelte Kennwerte der Referenzmaterialien

Einflussgröße	Material	UD-Gelege												0°/90°-Gelege												+/45°-Gelege													
		Untersuchte Orientierungen												0°												0°/90°													
		Faserorientierungen (bezogen auf Abrollrichtung)												0°												0°/90°													
Messverfahren/ Norm	Kennwert [Einheit]																																						
Formstabilität	Biegesteifigkeit DIN 53362 (Cantilever)	283												283												283													
	Grenzüberhangsl.	157												157												157													
	Anlehnung DIN EN ISO 13934-1	2,3												2,3												2,3													
	Dehnung ϵ_0 [%]	3,1												3,1												3,1													
	(Min.) Dyn. Reibungskoeffizient μ_0 [-]	0,06												0,06												0,06													
	EN ISO 8295																																						
	Biegesteifigkeit	218,8												218,8												218,8													
	Abklappverhalten	6,3												6,3												6,3													
	Reibverhalten	2												2												2													
	Anlehnung an DIN EN ISO 9237	144												144												144													
	Flächendurchlässigkeit	296												296												296													
	DIN EN 12127																																						
	G [g/m ²]	226												226												226													
	Dicke	0,3												0,3												0,35													
	t_f [mm]																																						
	Berechnung $p_r = \frac{m}{l_v}$	0,942												0,942												0,632													
	Dichte																																						
		0,712												0,712												0,712													
		0,576												0,576												0,576													

Technische Textilien unterscheiden sich gegenüber anderen formlabilen Materialien speziell durch die Anisotropie der mechanischen und zum Teil auch physikalischen Eigenschaften, so dass bei betroffenen Kennwerten, bezogen auf die vorliegenden Faserverläufe, verschiedene Orientierungen zu prüfen sind (vgl. *Abbildung 119, Anhang*). Da es sich im Rahmen der Arbeit um flächenförmige Gebilde handelt, wird das Materialverhalten orthogonal zur Flächenebene nicht berücksichtigt.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, formlabile Materialien *flächig* und *formunterstützend* zu greifen (z. B. GÖTZ 1991, GUTSCHE 1993). Bei Betrachtung der in *Abschnitt 2.3* analysierten Systeme kann die technische Umsetzung dieser Anforderung in die Varianten

- *voll-flächenförmige* (z. B. Elektrostatik-, Hydroadhäsionsgreifer) und
- *quasi-flächenförmige* Einleitung der Haltekraft durch Anordnung von Greifflächen oder -punkten (z. B. NFS, Kratzengreifer)

unterteilt werden. In Bezug auf quasi-flächenförmige Prinzipien gibt die Formlabilität des Materials die Auflösung der Krafteinleitungspunkte für ein prozesssicheres Greifen vor. Die Formlabilität wird durch die beiden mechanischen Kennwerte *Biegesteifigkeit* B [$\text{mN}\cdot\text{cm}^2$] und *Grenzüberhangslänge* L_{UG} [mm] beschrieben. Die Biegesteifigkeit ist nach dem genormten Cantilever-Verfahren zu bestimmen und gibt durch die Höhe des Kennwerts B Auskunft über den Widerstand, den das formlabile Material einer aus dem Einwirken von äußeren Kräften (z. B. Gewichtskraft) resultierenden Biegebelastung entgegensetzt (DIN 2003C). Aus dem Ergebnis der Untersuchungen lassen sich somit sehr schnell Materialien und Orientierungen ermitteln, deren Biegesteifigkeit sehr geringe Werte annimmt (vgl. *Tabelle 3*: UD-Gelege, 90°), jedoch kann keine Aussage über die notwendige Auflösung der Haltepunkte getroffen werden. Nähere Informationen zur Versuchsanordnung, Durchführung und den spezifischen Ergebnissen zeigt zusammengefasst *Abbildung 120* im Anhang.

Verwendet man dieselbe Versuchsanordnung sowie Probengeometrie und variiert den Höhenunterschied der Zuschnittskante bei schrittweiser Erhöhung der Überhanglänge, so entsteht durch Einführung eines *Grenzwinkels* α_G (hier 45°), die Möglichkeit, direkt die kritische *Grenzüberhangslänge* L_{UG} zu bestimmen, bei welcher das Abklappen des Textils zu Prozessunsicherheiten (z. B. Einknicken beim Aufsetzen oder Zerfall der Struktur) führt (vgl. *Tabelle 3*). Die entsprechende Dokumentation der Untersuchungsmethode ist der *Abbildung 121* im Anhang der Arbeit zu entnehmen. L_{UG} entspricht auch gleichzeitig dem Mindestabstand zweier Greifpunkte bzw. -flächen, da bei einem größeren Abstand die Gefahr eines undefinierten Abklappens besteht. Unter den analysierten Textilien gibt erwartungsgemäß das unidirektionale Gelege im Fall „Biegebelastung orthogonal zur Faser“ die kleinste und damit maßgebliche Auflösung von 25 mm vor.

Neben der Biegesteifigkeit definiert die Strukturstabilität die mechanischen Handhabungseigenschaften textiler Güter. Bezogen auf den Handhabungsprozess kann neben materialpenetrierenden Greifprinzipien insbesondere das Einwirken von Querkraften, resultierend aus Beschleunigungen durch das Kinematiksystem

oder die Erdbeschleunigung, bei herunterhängenden Zuschnittsteilen zu einer unzulässigen Beeinflussung der textilen Struktur führen. Die Beurteilung der Strukturstabilität erfolgt in Anlehnung an DIN (2009) durch die Ermittlung der *Dehnung* ε_D [%], wobei sich erwartungsgemäß hohe Dehnungsraten in Orientierungen ergeben, die nicht mit einer der Faserorientierungen übereinstimmen (vgl. *Tabelle 3* für Zugkraft 5 N; vgl. auch *Abbildung 122, Anhang*). Auch die Fixierung der Gelege durch Nähfäden oder Bindervliese hat einen hohen Einfluss auf das Dehnungsverhalten.

Greifprinzipien, welche das Halten mittels Kraftschluss umsetzen, werden weitergehend vom Reibungsverhalten des Textils beeinflusst, da niedrige Reibungskoeffizienten zu einem Verrutschen des Zuschnitts führen können. In Anlehnung an die DIN 8295 (DIN 2004) wird daher der *minimale dynamische Reibungskoeffizient* μ_D zwischen den Textilien und einer Aluminiumoberfläche als Kennwert ermittelt (vgl. *Tabelle 3* und *Abbildung 122, Anhang*). Dieser unterscheidet sich für die analysierten Materialien und Orientierungen im geringen Maße und liegt mit Werten zwischen 0,06 [] und 0,1 [] allgemein sehr niedrig (zum Vergleich: Richtwert Stahl/Stahl trocken 0,15; FISCHER 2005).

Wie eingangs erwähnt, ist der *flächenbezogene Anisotropiegrad* der textilen Handhabungsgüter ein relevanter Einflussfaktor für den späteren Greifprozess, indem die Richtungsabhängigkeit wichtiger Materialgrößen spezifiziert wird. Ist der Kennwert hoch, so ist stark darauf zu achten, dass der Zuschnitt nahe an den richtigen Kanten gegriffen wird. Bei niedrigen Werten hat dies keine Relevanz und die Greifsystempositionierung bezogen auf den Zuschnitt unterliegt größeren Freiheitsgraden. Nicht alle Parameter werden jedoch davon tangiert, so dass die Höhe der Anisotropie lediglich für die Formlabilität und das Reibungsverhalten bestimmt werden. Als Kennwert wird das Verhältnis zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert herangezogen. Auch hier unterscheiden sich die Referenzmaterialien stark und es kann festgehalten werden, dass in Bezug auf die Formlabilität das UD-Gelege den höchsten Anisotropiegrad aufweist, während bezüglich des Reibungsverhaltens die orientierungsspezifischen Werte am wenigsten differieren (vgl. *Tabelle 3*). Für die Strukturstabilität erübrigt sich ein derartiger Kennwert, da die Dehnung in Faserrichtung aufgrund des hohen E-Moduls der Fasern extrem klein ist. Zusammengefasst gibt die Höhe des Anisotropiekennwerts vor, bei welchen Materialien auf die Positionierung der Haltekraft (nahe zum Rand der Zuschnittskontur) und die Orientierung der Bewegungsbeschleunigungen zu achten ist, um die Prozesssicherheit zu erhöhen.

Für alle pneumatisch wirkenden Greifprinzipien ist die Durchlässigkeit des Handhabungsgutes gegenüber gasförmigen Medien von Relevanz, da die Permeabilität die erreichbaren Haltekräfte bzw. die Wirtschaftlichkeit determiniert. Für die Referenztextilien wird in Anlehnung an DIN 9237 (DIN 2008) die *Luftdurchlässigkeit* R [mm^3/s] bestimmt (vgl. *Abbildung 124, Anhang*). Der ermittelte Wert unterscheidet sich materialspezifisch stark (Faktor 3,75) und gibt für die eventuelle Verwendung des Effekts *Ansaugen* die Auslegungsgrundlage vor (vgl. *Tabelle 3*).

Neben den beschriebenen Parametern werden die Kennwerte *Flächenmasse* G [g/m^2] (DIN 1997; vgl. *Abbildung 125, Anhang*), die *Dicke* t_T [mm] und die *Dichte* ρ_T [g/cm^3] bestimmt, da diese u. a. bzgl. der beim Greifen aufzubringenden Kräfte maßgeblich sind (vgl. *Tabelle 3*). *Benetzbarkeit*, *elektrische Eigenschaften*, *Adhäsivität* und *Oberflächenbeschaffenheit* bilden Kennwerte, die sich ausschließlich auf die Anwendbarkeit sehr spezieller Greifprinzipien auswirken. In der Literatur sind mehrere aufwändige Bestimmungsverfahren beschrieben, die im Falle der Anwendung dieser Prinzipien durchgeführt werden können (vgl. auch GUTSCHE 1993, GOTTSCHALK 1996, STEPHAN 2001 und SZIMMAT 2007).

Zusammenfassend führen materialspezifische Eigenschaften meist zu funktionsgebundenen Anforderungen wie *flächiges* und *formunterstützendes Greifen*, beeinflussen aber auch maßgeblich die Höhe der aufzubringenden *Greifkräfte* sowie die Forderung nach *minimalinvasivem Greifen* und tangieren somit sowohl Leistungsfähigkeit als auch Qualität des Greifprozesses (vgl. zusammenfassend auch *Abbildung 127, Anhang*).

3.4.2 Produktspezifische Einflussgrößen

Neben den materialspezifischen Randbedingungen determinieren insbesondere produktbezogene Einflussgrößen die Anforderung an das Greifsystem (vgl. *Abbildung 31*). Abhängig vom zu fertigenden Produkt wird zum einen die geforderte Produktqualität hinsichtlich der Erhaltung der Integrität des Greifgutes vorgegeben. In Bezug auf die Handhabung technischer Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen betrifft dies maßgeblich die *Strukturintegrität* (z. B.: Faseraufweitung, -verzug, Beulenbildung) zur Sicherstellung der späteren Funktionserfüllung sowie die *Werkstoffintegrität* (z. B.: Fremdstoffeintrag). Zum anderen werden durch das spätere Produkt die Abmessungen sowie Kontur der Zuschnitte und damit deren Form vorgegeben, welche die geometrische Ausdehnung und die Ausprägung des Greifsystems festlegen. Das zu verarbeitende Produktspektrum determiniert die Varianz an Formen (Kontur und Ausdehnung) der

3.4 Anforderungsanalyse

Zuschnitte und Materialien (Werkstoff und Halbzeugart), die durch das System zu handhaben sind. Dieser Aspekt tritt bei textilen Halbzeugen für Verbundwerkstoffe verstärkt in den Vordergrund, da ein Bauteil aus unterschiedlichsten Konturen und Materialien schichtweise aufgebaut wird. Das System ist also flexibel bezüglich eines variantenreichen Spektrums auszulegen.

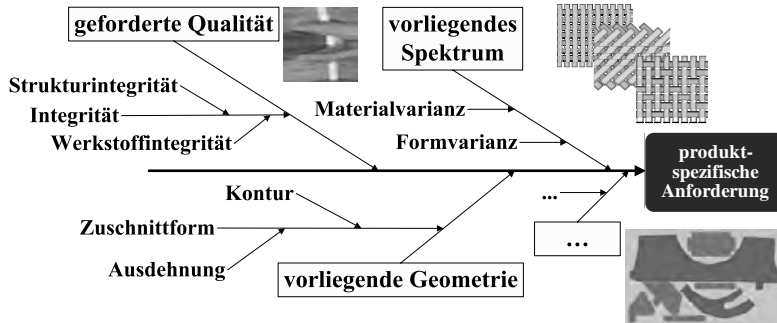


Abbildung 31: Auswahl und Strukturierung produktspezifischer Einflussgrößen zur Definition von Anforderungen

Während die Geometrie der Zuschnitte hinsichtlich der Kontur und Abmessungen analysierbar ist (Ergebnis für das Referenzszenario: *Abbildung 126, Anhang*), sind Qualität und Verarbeitungsspektrum, ebenso wie die im Folgenden beschriebenen prozessspezifischen Einflussgrößen, dem Lastenheft zu entnehmen bzw. durch Expertenbefragungen festzulegen. Beides ist exemplarisch für das Referenzszenario im Anhang der Arbeit hinterlegt (vgl. *Tabelle 10 und Tabelle 11, Anhang*).

3.4.3 Prozessspezifische Einflussgrößen

Prozessspezifische Einflussgrößen sind Randbedingungen, welche auf Basis des abzubildenden Vorgangs, aber über dessen essentielle Teilfunktionen (vgl. *Abschnitt 3.3*) hinaus, Anforderungen an das Greifsystem determinieren (vgl. *Abbildung 32*).

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

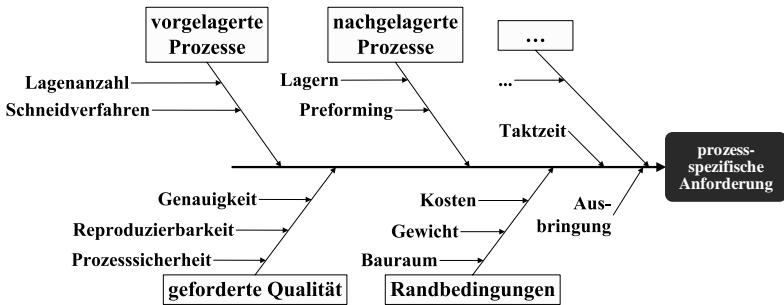


Abbildung 32: Auswahl und Strukturierung prozessspezifischer Einflussgrößen zur Definition von Anforderungen

Hierbei sind speziell vor- und nachgelagerte Prozesse und qualitative Bedingungen sowie das produktionstechnische Umfeld zu analysieren (z. B. geforderte Qualität, Taktzeit, Ausbringung und Realisierungsrandbedingungen). Im betrachteten Anwendungsfall werden die technischen Textilien zunächst geschnitten. Dies ist prinzipiell auch in mehreren Lagen möglich und beeinflusst die Ausprägung der geforderten Greifkräfte. Das materialeffiziente Anordnen verschiedenster Konturen beim Schneidprozess führt weitergehend zu Flexibilitätsanforderungen hinsichtlich der Lage und Orientierung des Greifers bei der Aufnahme der Textilien. Nachgelagerte Prozesse, wie beispielsweise das Lagern oder das automatisierte Preforming, beeinflussen qualitative Forderungen bezogen auf die Ablegepräzision des Greifsystems. Die angestrebte Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit hängen ebenfalls von dem Gesamtkontext ab, in welchem der Prozess eingesetzt wird. So gelten abhängig vom Anwendungsfall in der Luftfahrtindustrie höhere Anforderungen hinsichtlich der Prozessqualität als in anderen Branchen. Die notwendige Leistungsfähigkeit des Greifsystems in Bezug auf hohe Geschwindigkeit und geringe Prozesszeit wird maßgeblich durch die Taktzeit im Gesamtsystem bzw. durch die gewünschte Verarbeitungsleistung (Ausbringung) vorgegeben. Auch beeinflussen die Realisierungsrandbedingungen wie Kosten, zulässiges Gewicht des Greifsystems und zur Verfügung stehender Bauraum die Anforderungen an die systemtechnische Lösung des Greifsystems hinsichtlich der geforderten Wirtschaftlichkeit und möglicher Abmessungen.

3.4.4 Analyse der Flexibilitätsanforderungen

Die abzubildende Flexibilität eines Greifsystems ist eine wichtige Randbedingung im Rahmen der Entwicklung und kann als Anforderung der Leistungsfähigkeit des Systems zugeordnet werden. Wie in *Abschnitt 2.5* erläutert, werden für das Absortieren von technischen Textilien hochflexible Systeme benötigt. Einige der bisher erläuterten Einflussgrößen bilden hierbei die Quelle bzw. Ursache für die geforderte Flexibilität, welche gemäß *Abschnitt 2.2.4* in Tragweite und Adaptionaufwand aufgeteilt werden kann (vgl. *Abbildung 33*). Eine hohe Flexibilität wird zum einen durch die Vorgabe bestimmter Systemspezifikationen nach der Worst-Case-Betrachtung (größte Zuschnittlänge und -breite) und zum anderen durch automatisiert-anpassbare Parameter (z. B. Greiffläche) oder Strategien (z. B. Positionierung bei bestimmter Greiffläche) erreicht.

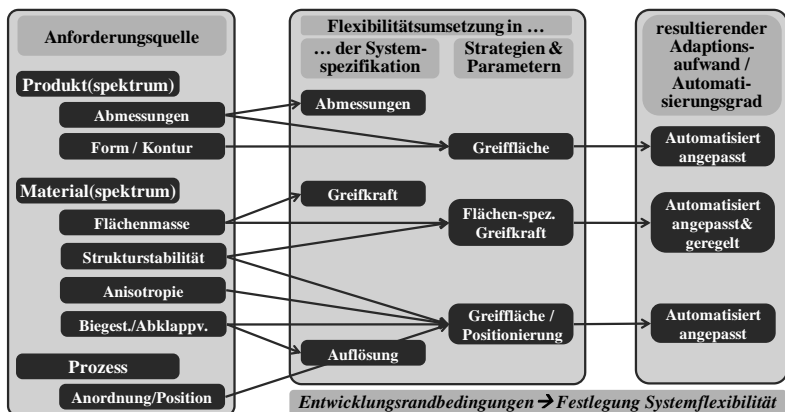


Abbildung 33: Übersetzung geforderter Flexibilität in Entwicklungsrandbedingungen (Spezifikation, Strategie & Parameter, Adaptionaufwand)

Die durch das Produktspektrum erzeugte Varianz an zu handhabenden Zuschnitten ist kaum sinnvoll durch auswechselbare, angepasste Greifmodule abzudecken (vgl. Abschnitt 2.2.4), wodurch ein System gefordert wird, dessen Abmessungen nach den maximalen Zuschnittsgrößen ausulegen ist, aber zudem eine automatisiert adaptierbare Greiffläche aufweist. Auch das zu verarbeitende Materialspektrum führt aufgrund der Varianz der aufgeführten Parameter (Biegesteifigkeit, Strukturstabilität, Anisotropie) zu der Forderung nach anpassbaren Greifflächen und deren optimaler Positionierung. Weitergehend beeinflusst die Flächenmasse des Zuschnitts maßgeblich die aufzubringende flächenspezifische Greifkraft, welche automatisiert derart zu regeln ist, dass ein prozesssicheres, jedoch

auch materialschonendes Absortieren möglich wird. Im Falle eines quasi-flächigen Haltens durch Greifpunkte oder -flächen schafft die systemtechnische Auslegung der Auflösung nach der größten *Neigung zum Abklappen* den notwendigen Flexibilitätsrahmen zur Verarbeitung des Materialspektrums (vgl. *Abschnitt 3.4.1*). Letztlich wird die Anordnung und die Position durch den Schneidprozess vorgegeben, wodurch automatisiert die Greiffläche und deren Positionierung anzupassen ist.

3.4.5 Definition eines Anforderungssystems für Greifsysteme zum Absortieren technischer Textilien

Die dargestellten Einflussgrößen sind zusammenfassend in System- und prozess-technische Anforderungen zu übersetzen, die in den vorhergehenden Abschnitten herausgearbeitet wurden. Da einzelne Faktoren sowohl spezifische Anforderungen maßgeblich bedingen, als auch mehrere andere tangieren, empfiehlt sich die Darstellung in einer Matrix aus Einflussgrößen und Anforderungen (vgl. *Abschnitt in Abbildung 34* und Gesamtmatrix in *Abbildung 127, Anhang*).

Aus dieser kann direkt der Grad der Beeinflussung abgeleitet und somit zu prüfende Einflussfaktoren bei der Definition von Anforderungen bestimmt werden. Dem Entwickler eines Greifsystems für die Handhabung technischer Textilien steht somit eine Übersicht zur Verfügung, welche Einflussfaktoren bei der Spezifikation von Anforderung zu berücksichtigen sind. Die resultierenden Anforderungen lassen sich dabei in vier Gruppen einteilen:

- Funktionalität
- Qualität
- Leistungsfähigkeit
- Wirtschaftlichkeit

Einflussfaktoren auf ein Greifsystem zum Absorbieren von technischen Textilien

Anforderungen an ein Greifsystem zum Absorbieren von technischen Textilien

Bewertungsschema		Funktionalität				Leistungsfähigkeit				Qualität			Wirtschaftlichkeit	
●	Starke Beeinflussung	(Quasi-)Blähiges Greifen	Vorunterschieben des Greifens	Selbstvers, flächen-spezifische Greifen	Definiertes Halten & Lösen	Geometrische Ausdehnung	Hohe, definierbare Hülfskräfte (Normal- und Querkraft)	Geschwindigkeit / Taktzeit	Flexibilität	Prozess aufnehmen und ablegen	Minimalinvasives Greifen / Erhaltung Strukturintegrität	Rückanforderheit	Investitions- und Betriebskosten	Wartungskosten
◐	Schwache Beeinflussung													
○	Keine Beeinflussung													
Materialspezifisch	Biegesteifigkeit	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Abklappverhalten	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Strukturstabilität	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Anisotropie / Faserorientierung	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Flächenmasse	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Reibverhalten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Luftdurchlässigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Adhäsivität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Prozessspezifisch	Genauigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Reproduzierbarkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Prozesssicherheit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Taktzeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kostenrahmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Gewicht	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Bauraum	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 34: Zuordnungsmatrix von Einflussgrößen und Anforderungen
(Ausschnitt – vgl. auch Abbildung 127 im Anhang)

Die mittels dieser Matrix ermittelten Anforderungen für das Referenzszenario sind zusammengefasst in Form eines Lastenhefts in der *Tabelle 11* im Anhang der Arbeit hinterlegt. Aus den einzelnen Anforderungen werden im Folgenden Ausschluss- und Bewertungskriterien für die Wahl des Wirkprinzips sowie des Greiferkonzepts abgeleitet und auch bei der Auslegung und Spezifikation des Greifsystems werden die gesammelten Einflussgrößen (z. B. Luftdurchlässigkeit) und Anforderungen benötigt.

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

3.5.1 Sammlung potenzieller und Auswahl anwendbarer physikalischer Prinzipien

Wie im *Abschnitt 3.2.2* aufgezeigt, beginnt die Erarbeitung eines Greifprinzips mit der Sammlung potenzieller physikalischer Prinzipien. *Abbildung 35* zeigt eine strukturierte Übersicht derzeit möglicher Prinzipien, wobei neben klassischen, am Markt verfügbaren Lösungen auch innovative, jedoch wenig erprobte Ansätze existieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese in Bezug auf die Anwendbarkeit für das Absortieren von technischen Textilien hin erforscht. Die ausführliche Zusammenstellung potenzieller Funktionsprinzipien und Wirkungsweisen ist in einer tabellarischen Übersicht im Anhang der Arbeit zu finden (vgl. *Tabelle 12 bis Tabelle 18, Anhang*). Diese Tabellen sollen dem Entwickler als grundsätzliche Übersicht und Orientierungshilfe bzgl. der recherchierten möglichen Ansätze dienen, erhebt aber vor dem Hintergrund des technischen Fortschritts keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

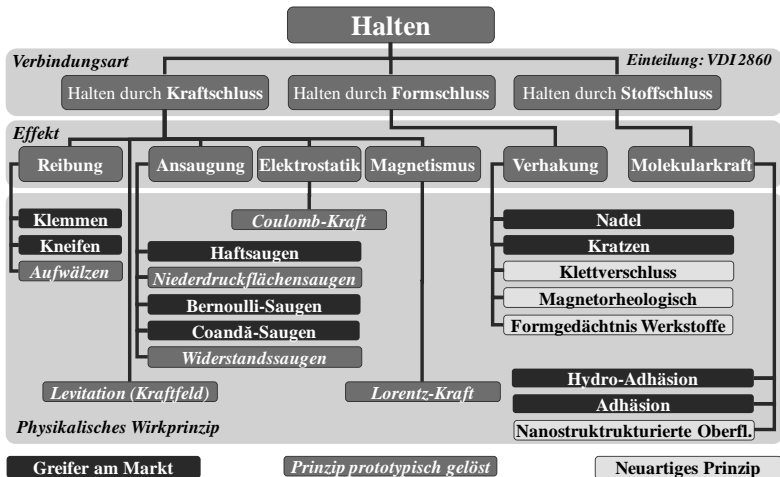


Abbildung 35: Auswahl potenziell einsetzbarer Wirkprinzipien – gegliedert nach der Verbindungsart und dem angewandten physikalischen Effekt

Die aufgeführten Prinzipien verfügen über unterschiedliche Wirkungsweisen und ein differierendes Anwendungspotenzial. Die detaillierte Evaluierung aller Lösungsalternativen ist daher weder notwendig noch zielführend. Deshalb sind zunächst alle Ansätze zu eliminieren, welche im Rahmen eines spezifischen

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

Entwicklungsprojektes nicht umsetzbar oder aufgrund geforderter Ausschlusskriterien nicht anwendbar sind.

Die Umsetzbarkeit eines Greifprinzips in einem zu realisierenden Greifsystem hängt wesentlich von der Verfügbarkeit der Technologie und dem möglichen Entwicklungsaufwand bzw. der zur Verfügung stehenden Entwicklungsressourcen (z. B. Zeit, Budget) ab. Zur Verfügbarkeitsbewertung wird die in *Abbildung 36* dargestellte Einteilung in verschiedene *Technologie-Reifegrade (TRG)* angewendet, welche an den von der NASA entwickelten *Technology Readiness Level (TRL)* angelehnt ist (vgl. auch MANKINS 1995, NOLTE ET AL. 2003).

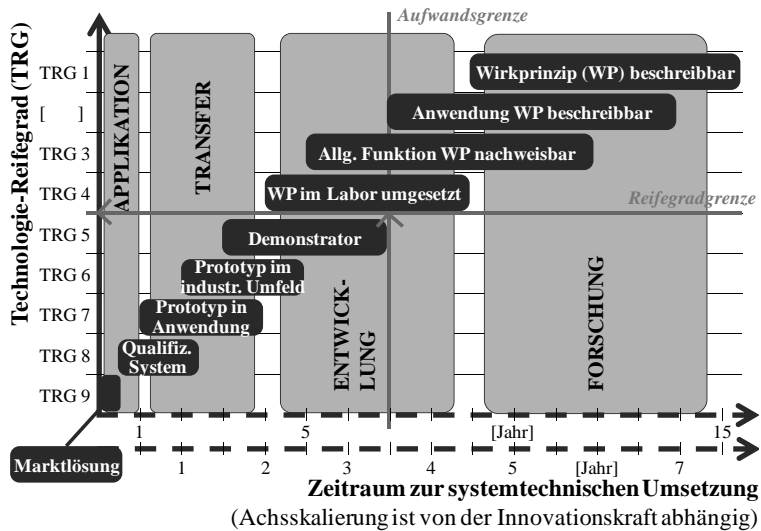


Abbildung 36: Technologie-Reifegrade und Umsetzungsaufwand (anhand Zeitraum und Evolutionsstufe) zur Einordnung von Wirkprinzipien

Bezogen auf den Einsatz eines Wirkprinzips in einem Greifsystem kann ein Ansatz somit in die aufgezeigten Reifegrade eingeordnet und daraus ein Zeitraum zur systemtechnischen Umsetzung abgeleitet werden. In Abhängigkeit von dem verfolgten Entwicklungsziel (Marktfähiges Produkt, Prototyp, Demonstrator, etc.) können weitergehend die zu durchlaufenden Evolutionsstufen (Applikation durch Auslegung, Transfer durch Neukonzeption, Neuentwicklung, Forschungsbedarf) bzw. auch ein Entwicklungsrisiko abgeschätzt werden. Bei der Umsetzbarkeitsbewertung wird dieses System zum Ausschluss von Prinzipien angewendet, indem eine Reifegradgrenze zu definieren ist, ab welcher ein Prinzip im Anwendungsszenario noch umsetzbar ist. Die zutreffende Zeitachse ist abhängig

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

von der (unternehmens-)spezifischen Innovationskraft, die maßgeblich von verfügbaren personellen und finanziellen Ressourcen abhängt, und ist somit für jeden Anwendungsfall individuell festzulegen.

Im nächsten Schritt sind auf Basis der definierten Anforderungen Ausschlusskriterien zu formulieren, mit Hilfe derer die Anwendbarkeit eines Wirkprinzips geprüft werden kann. Sind die potenziellen Wirkprinzipien theoretisch nicht eindeutig zu beurteilen, müssen Funktionstests durchgeführt werden. Im Referenzszenario lassen sich, basierend auf *Tabelle 11* im Anhang der Arbeit, folgende Ausschlusskriterien definieren:

- keinerlei im Handhabungsgut verbleibender Fremdstoffeintrag
- erreichbare flächenbezogene Normalkraft kompensiert mindestens die flächenbezogene Gewichtskraft
- erreichbare Taktzeit für einen Zuschnitt kleiner 60 s (Halten und Lösen)
- keine Strukturveränderung durch den Greifvorgang
- flexibles Vereinzeln aus einem flächigen Verbund möglich

Die Anwendbarkeit eines Prinzips kann zusätzlich durch Funktionstests geprüft werden (ab TRG 2). Diese stellen aufwandsarme Stichprobenversuche dar, in welchen über die theoretische Abschätzung hinaus evaluiert wird, wie sich Prinzipien hinsichtlich der Ausschlusskriterien verhalten. *Abbildung 37* zeigt zusammenfassend das durchzuführende Vorgehen und die erreichten Ergebnisse bei der Auswahl anwendbarer physikalischer Wirkprinzipien zur Umsetzung in einem Greifsystem für das dargelegte Referenzszenario.

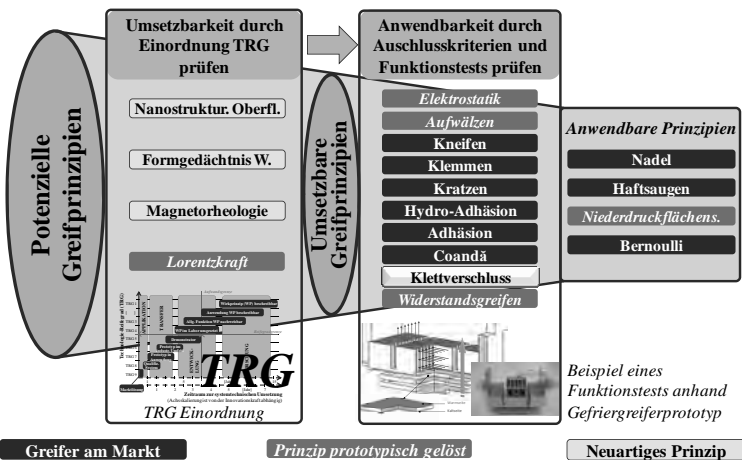


Abbildung 37: Vorgehen und Ergebnis der Auswahl anwendbarer Prinzipien

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die in *Abbildung 35* dargestellten Optionen anhand dieses Vorgehens analysiert. Das Ergebnis ist in den *Tabelle 12* bis *Tabelle 18* im Anhang der Arbeit dargestellt. Diese Übersicht stellt somit eine gesamthafte Bewertung der Anwendbarkeit derzeit potenziell einsetzbarer Wirkprinzipien sowie deren Beschreibung dar. Vor dem Hintergrund des Anwendungsszenarios sowie der herausgearbeiteten Anforderungen und Ausschlusskriterien erweisen sich letztlich lediglich die vier Wirkprinzipien *Nadelgreifen*, *Haft*-, *Niederdruckflächen*-, bzw. *Bernoullisaugen* als anwendbare Ansätze für die Handhabung technischer Textilien. Die Reduktion gegenüber der im Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigten Prinzipienvielfalt (vgl. *Abschnitt 2.3.1*) ist maßgeblich auf die erhöhten Forderungen hinsichtlich Material- und Werkstoffintegrität zurückzuführen, aufgrund der Anwendung von technischen Textilien in Faserverbundstrukturen. Innovative Prinzipien wie beispielsweise *Magnetorheologie* oder *Coulomb-Kraft (Elektrostatik)* weisen zwar erhebliches Potenzial auf, jedoch bedarf es zur Anwendung derartiger Ansätze in einem selektiven Greifsystem für großflächige, formlabile Materialien noch erheblicher Anstrengungen in der Grundlagenforschung (vgl. *Tabelle 12* bis *Tabelle 18*, *Anhang*).

3.5.2 Experimentelle Evaluierung anwendbarer Prinzipien

Die in *Abschnitt 3.5.1* als anwendbar klassifizierten Wirkprinzipien sind im Folgenden gemäß des Schritts *Eigenschaften ermitteln* aus dem MVM zu evaluieren. Damit wird die Grundlage für eine spätere Bewertung und Auswahl eines Prinzips geschaffen. Zunächst stellt sich die Frage, wie, vor dem Hintergrund der definierten Anforderungen, relevante Eigenschaften vollkommen unterschiedlicher physikalischer Ansätze ermittelt werden können. Hierzu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das in *Abbildung 38* dargestellte Vorgehen erarbeitet, dessen Teilschritte im Folgenden detailliert am gewählten Anwendungsbeispiel erläutert werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt im Rahmen der Bewertung und Auswahl eines Greifprinzips im *Abschnitt 3.5.3*.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

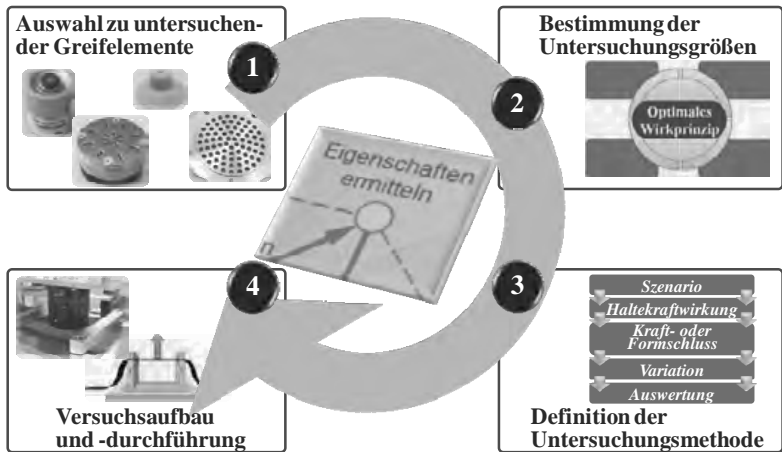


Abbildung 38: Vorgehensweise bei der Evaluierung anwendbarer Prinzipien

Schritt 1: Auswahl zu untersuchender Greifelemente anhand von Bestimmungsgrößen

Zur Ermittlung der Eigenschaften verschiedener Greifprinzipien sind neben theoretischen Betrachtungen experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Letztere bedingen ein funktionsfähiges Greifelement, welchem das zu untersuchende physikalische Prinzip zugrunde liegt, da die versuchstechnische Analyse des isolierten Prinzips an sich nicht möglich ist. Die betrachtete systemtechnische Lösung (Greifelemente) sollte hierzu repräsentativ für die gesamte Gruppe (Wirkprinzip) sein, aber auch für die getroffenen Anforderungen die potenzialträchtigste Umsetzung des Prinzips darstellen, so dass in einer späteren Bewertung verschiedener Prinzipien die anwendungsspezifisch günstigsten Eigenschaften verglichen werden (vgl. *Abschnitt 3.5.3*). Ist im Vorfeld der Untersuchung keine eindeutige Auswahl eines am Markt verfügbaren Greifelementes möglich, sind mehrere Systeme zu evaluieren, welche unterschiedliche Ausprägungen relevanter Bestimmungsgrößen darstellen. Existieren zu einem Prinzip mit niedrigerem TRG keine verfügbaren Marktlösungen, so sind auf Basis des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik einfache Funktionsmuster umzusetzen.

Für die im vorhergehenden Abschnitt ermittelten physikalischen Wirkprinzipien sind die in *Abbildung 39* aufgeführten Bestimmungsgrößen maßgeblich für die Auswahl zu evaluierender Greifelemente.

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

Nadelgreifen	Haftsaugen	Bernoulli	NFS
Anzahl Nadeln	Bauart (Flach/Balgen)	Außen Ø	Lochanzahl
Wirkrichtung	Außen Ø	Auflage Ø	Saugloch Ø
Nadel Ø	Innen Ø	Luftverbrauch	Aussen Ø / Abmess.
Einstechwinkel	Verrippungsart	Betriebsdruck	Lochanordnung
Wirk-/ Kontaktfläche	Wirk-/ Kontaktfläche	Wirkfläche	Wirk-/ Kontaktfläche
Hub (in Nadelrichtung)	Werkstoff	Kontaktfläche	Öffnungsverhältnis
			

Ø: Durchmesser

Abbildung 39: Bestimmungsgrößen zur Auswahl prinzipisspezifischer Greifelemente

Die größte Vielfalt an Marktlösungen zur Ableitung der Spezifikationsparameter ist bei den Prinzipien Nadelgreifen und Haftsaugen zu finden, während Bernoullisauger nur von einzelnen Herstellern vertrieben werden. Im Bereich des Niederdruckflächensaugens existieren kaum Applikationen, die an die Herausforderungen beim Handhaben von formlabilen Materialien angepasst sind. Die aufgeführten Größen sowie die realisierten Funktionsmuster für dieses Prinzip sind daher an die Ergebnisse von JODIN (1991) angelehnt.

Basierend auf der Variation der dargestellten Parameter werden die in *Abbildung 128* im Anhang aufgeführten Greifelemente ausgewählt, wobei die Anzahl zu berücksichtigender Elemente pro Wirkprinzipgattung von der Komplexität der Greifelemente und somit von der Diversifikation der Bestimmungsgrößen abhängt. So besitzen Nadelgreifer unter den betrachteten Prinzipien die meisten Freiheitsgrade, weshalb hier die meisten Exemplare untersucht werden. Die hervorgehobene Wirkfläche stellt über die Greifprinzipien hinweg eine besondere Größe dar, da diese zur Normierung der Leistungsgrößen (z. B. Normalkraft) bei der folgenden Evaluierung der Greifelemente herangezogen wird.

Schritt 2: Ableitung von Untersuchungsgrößen aus den Anforderungen

Die Ableitung von Untersuchungsgrößen ist der zweite Schritt im Rahmen der Evaluierungsphase. Hierzu wird die Schnittmenge aus relevanten Anforderungen und versuchstechnisch erfassbaren Größen gebildet. Als Einteilung kann die im *Abschnitt 3.4.5* vorgenommene Gruppierung der Anforderungen angewendet werden, wobei diese nun die entsprechenden Zielgrößen des Evaluierungsprozesses zur Ableitung eines optimalen Wirkprinzips darstellen. Bezogen auf die einzelnen Anforderungen, wie beispielsweise *Betriebskosten*, werden erfassbare

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

Parameter wie *Luftverbrauch* zugeordnet. *Abbildung 40* zeigt zusammenfassend die ermittelten Untersuchungs- sowie Zielgrößen. Während diese übergeordnete Randbedingungen für die Bewertung eines Greifprinzips für technische Textilien darstellen, sind die zu erfassenden Parameter vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig.

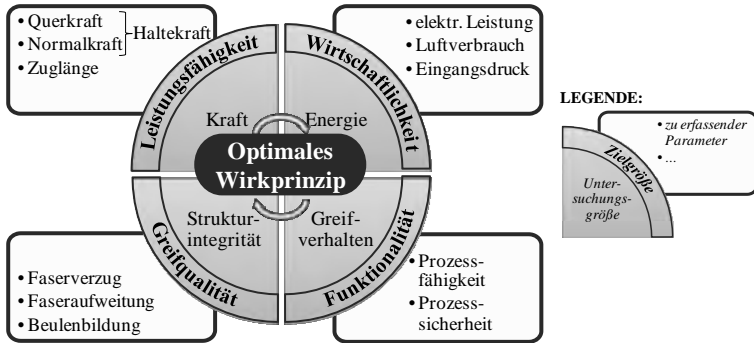


Abbildung 40: Untersuchungs- und Zielgrößen zur Evaluierung des optimalen Wirkprinzips (REINHART & STRÄßER 2011)

Die Untersuchungsgrößen *Kraft*, *Strukturintegrität*, *Greifverhalten* und *Energieverbrauch* besitzen einen hohen Einfluss auf die Einsetzbarkeit eines Wirkprinzips und stehen in gegenseitiger Abhängigkeit. Bei Variation einer der vier Größen stellt sich eine Veränderung der anderen ein. Die erreichbaren Haltekräfte in Form von Quer- und Normalkräften unterliegen, nicht zuletzt aufgrund der z. T. hohen Luftdurchlässigkeit der Handhabungsgüter, einem engen Zusammenhang mit dem Energieverbrauch des Greifsystems. Dieser kann sowohl bei fluidisch wirkenden Prinzipien als auch bei pneumatisch aktivierten Nadelgreifern anhand des Luftverbrauchs und des notwendigen Eingangsdrucks der Druckluftzuführung ermittelt werden. Speziell bei den fluidisch wirkenden Prinzipien (Haft-, Bernoulli- und Niederdruckflächensaugen) sind höhere Kräfte bei bestehenden Saugflächen nur durch erhöhten Energieeinsatz zu erreichen. Je höher die übertragenen Kräfte jedoch gewählt werden, desto größer ist in Abhängigkeit des betrachteten Prinzips die Gefahr einer unzulässig hohen Verletzung der Strukturintegrität durch Faseraufweitung, -verzug oder Beulenbildung. Insbesondere formschlüssig wirkende Greifsysteme wie Nadelgreifer schädigen ab kritischen Normal- bzw. Querkraften den Faserverbund und führen somit zur Zerstörung des Bauteils. Des Weiteren ist das Greifverhalten ausschlaggebend für die Eignung des Greifprinzips. Vakuumsauger haben die Eigenschaft, ab kritischen Differenzdruckwerten die Greifkraft auf den Untergrund (z. B. Cutter-Tisch) zu

übertragen und somit beim Abheben den Zuschnitt nicht prozesssicher greifen zu können. Nadelgreifer hingegen sind hinsichtlich des Abgreifens auf die erreichbaren Normalkräfte vor dem Hintergrund zu untersuchen, dass die Nadeln nicht durch das textile Material hindurchtreten dürfen. Beim realen Absortierprozess besteht sonst die Gefahr einer Interaktion bzw. Verhakung mit der Unterlage.

Schritt 3: Definition der Untersuchungsmethode

Unter dem Begriff Untersuchungsmethode sind das Vorgehen und die zu betrachtenden Variationen der Randbedingungen zusammengefasst, welche der Evaluierung der Prinzipien anhand der gewählten Greifelemente zugrunde liegen. Zu berücksichtigen sind zunächst unterschiedliche Phasen des Referenzprozesses und die dabei vom Greifprinzip aufzunehmenden Kräfte auf Basis des ablauforientierten Funktionsmodells (vgl. *Abbildung 28*). Während beim *Aufnehmen* eines Zuschnitts lediglich Normalkräfte auftreten, wirken durch die beschleunigte dreidimensionale Bewegung während des *Transportvorgangs* zudem Querkkräfte, welche beim Versuchsaufbau und der -durchführung zu berücksichtigen sind. Im Folgenden werden diese Lastfälle immer getrennt voneinander betrachtet, um die spezifische Eignung der Prinzipien zu erfassen. Da formschlüssige Greifprinzipien im Gegensatz zu kraftschlüssigen Ansätzen hohe Kräfte übertragen können (Normal- und Querkraft), deren Wirken jedoch zur Zerstörung des Handhabungsgutes führt, ist die Ermittlung der erreichbaren Kräfte in diesem Fall nicht zielführend, zumal der Energieaufwand davon unabhängig ist. Vielmehr sind das Greifverhalten und die Strukturintegrität in Abhängigkeit definierter Kräfte zu evaluieren. In den folgenden Untersuchungen wird aufgrund der größten auftretenden Flächenmasse ($556 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$) und Voruntersuchungen die Höhe der Kraft exemplarisch auf 1 N festgelegt und als Variation zusätzlich der Wert 0,5 N untersucht. Die Abhängigkeit der übertragbaren Greifkräfte von der pneumatisch zugeführten Energie bei fluidisch wirkenden, kraftschlüssigen Prinzipien führt bei dieser Gruppe zur Variation des Eingangsdrucks von maximal möglichen Werten bis zu einem Viertel davon. Letztlich gilt es noch, die vorgegebenen Referenzhalbzeuge hinsichtlich zu berücksichtigender Unterscheidungen zu analysieren. Aufgrund der geforderten Flexibilität des Greifsystems muss das Prinzip sowohl für die verschiedenen Materialien anwendbar, als auch möglichst unabhängig von den Faserausrichtungen des Zuschnitts sein. Basierend auf Ergebnissen der Materialuntersuchungen (vgl. *Tabelle 3*) sind relevante Orientierungen der Halbzeuge zu ermitteln und dementsprechende Testzuschnitte herzustellen.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

Es ergeben sich somit für das Referenzszenario unterschiedliche Zuschnitte je Material:

- 0° , 45° und 90° für das *UD-Gelege* sowie $0^\circ/90^\circ$ -*Gelege*
- 0° und 45° für das *Gewebe*
- -45° , 0° und $+45^\circ$ für das $\pm 45^\circ$ -*Gelege*

Abbildung 41 bietet einen Überblick über die erarbeitete Untersuchungsmethode.

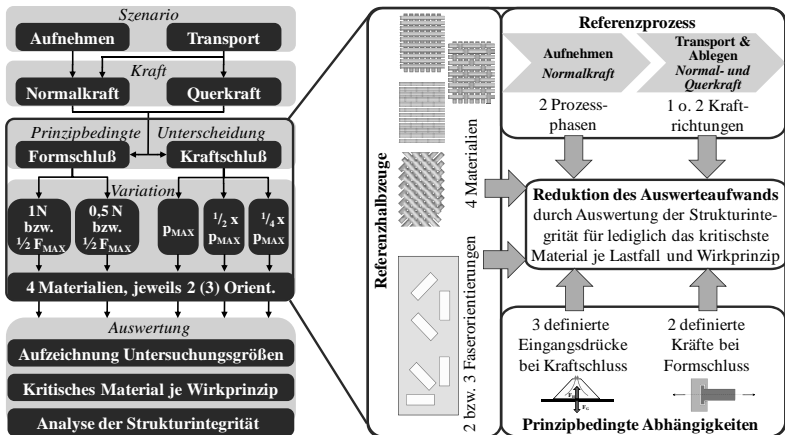


Abbildung 41: Untersuchungsmethode zur experimentellen Evaluierung der Greifelemente am Beispiel des Referenzszenarios

Die versuchstechnische Abbildung aller Variationen (Material, Faserorientierung, Lastfall und Greifelemente) führt zu einem erheblichen Untersuchungsaufwand, welcher intelligent zu reduzieren ist, ohne die Aussagekraft zu vermindern. Besonders die Auswertung der Strukturintegrität zur Bewertung der Greifqualität erhöht den zeitlichen Aufwand erheblich. Ein Ansatzpunkt ist die Einschränkung zu betrachtender Materialien. Stellt man die Flexibilität eines Greifsystems in den Vordergrund, so gibt das bzgl. der Kombination eines Lastfalls und eines Wirkprinzips empfindlichste Materialsystem dessen Einsetzbarkeit vor. Daher wird je Wirkprinzipgattung und Krafrichtung (Normal- oder Querkraft) jeweils das empfindlichste Material bestimmt und lediglich für diese Kombination die Strukturveränderung anhand der in Abbildung 42 aufgeführten Fehlerbilder analysiert.

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

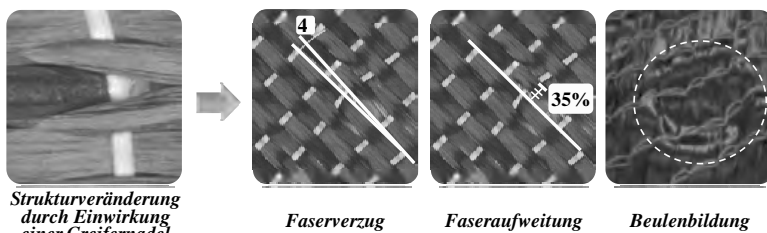


Abbildung 42: Fehlerbilder zur Analyse der Strukturveränderung durch Einwirken eines Greifelements (REINHART & STRÄBER 2011)

Schritt 4: Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Umsetzung der vorgestellten Untersuchungsmethode wird ein Versuchsaufbau entworfen, mit dem die unterschiedlichen Prozessphasen und Lastfälle reproduzierbar erzeugt und gleichzeitig die Untersuchungsgrößen aufgezeichnet werden können. In Anlehnung an die zu ermittelnden Untersuchungsgrößen (vgl. *Abbildung 40*) sind in *Abbildung 43* schematisch die verschiedenen Bereiche der Versuchsumgebung aufgezeigt. Im Zentrum steht das zu untersuchende Greifelement, welches in direkter Verbindung mit dem Handhabungsgut bzw. Versuchsmaterial steht und entsprechend seiner Ausprägung mit Energie oder Stoff versorgt wird. Zur Erfassung der Untersuchungsgrößen sind nun die jeweiligen Kräfte sowie Wege zwischen Greifer und Versuchsmaterial zu bestimmen und weitergehend die Struktur des technischen Textils vor und nach der Einwirkung bildoptisch zu dokumentieren.

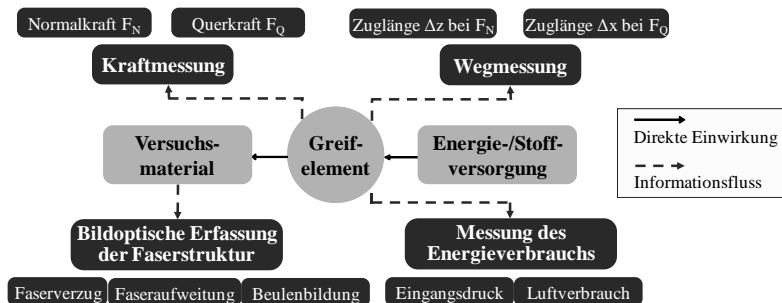


Abbildung 43: Schematische Strukturierung des Versuchsaufbaus

Gemäß den definierten Lastfällen gilt es, Normal- und Querkraftwirkung zwischen Greifelement und Versuchsmaterial getrennt voneinander zu betrachten. Im Falle der Normalkraft sind die Prozessphasen *Aufnehmen* und *Transport* zu unterscheiden. *Abbildung 44* zeigt den entsprechenden Versuchsaufbau, bei

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

welchem der Halbzeugzuschnitt unter einer leichten Vorspannung (F_S) in eine Fixiereinrichtung eingespannt wird, wobei entweder Kontakt zur Schneidunterlage besteht (*Aufnehmen*) oder das Versuchsmaterial freischwebend mit Normalkraft beaufschlagt wird (*Transport*). Durch exaktes Aufsetzen, Aktivieren (Halten) und weggesteuertes Bewegen des Greifelements in Richtung der z-Koordinate (siehe *Abbildung 44*) wird eine Normalkraft F_N aufgebracht, welche der durch eine Kraftmesseinrichtung (Präzisionswaage) erfassten *Gewichtskraft* der Fixiereinrichtung F_{GF} entgegenwirkt.

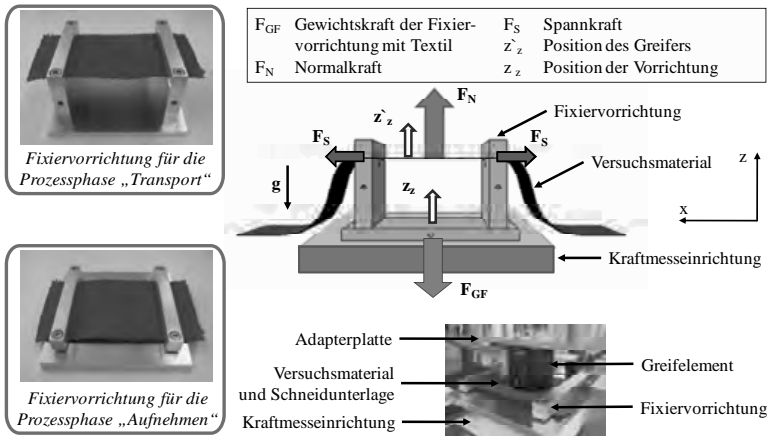


Abbildung 44: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Normalkrafteinwirkung in den Prozessphasen „Aufnehmen“ und „Transport“

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Verbindung zwischen Greifer und Versuchsmaterial ist die *Zuglänge bei Normalkraft* Δz , welche aus der Differenz der gesteuerten Positionen des Greifers und der Fixiervorrichtung (näherungsweise 0) ermittelt wird (vgl. Gl. 3-1 und 3-2).

$$\Delta z = (z_{Z' \text{ nach Greifen}} - z_{Z' \text{ vor Greifen}}) - (z_{Z \text{ nach Greifen}} - z_{Z \text{ vor Greifen}}) \quad (3-1)$$

mit $(z_{Z \text{ nach Greifen}} - z_{Z \text{ vor Greifen}}) \approx 0$ (kein Anheben) folgt:

$$\Delta z = z_{Z' \text{ nach Greifen}} - z_{Z' \text{ vor Greifen}} \quad (3-2)$$

Unter Verwendung derselben Fixiervorrichtung ist die Versuchsanordnung zur Ermittlung des Querkrafteinflusses konzipiert (vgl. *Abbildung 45*). Das ausschließlich im Transportszenario eingespannte Handhabungsgut wird in Flächenrichtung (x-Koordinate, siehe *Abbildung 45*) mit einer *Querkraft* F_Q beaufschlagt,

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

welche über das Greifelement auf das eingespannte Versuchsmaterial übertragen und anhand einer Federwaage gemessen wird.

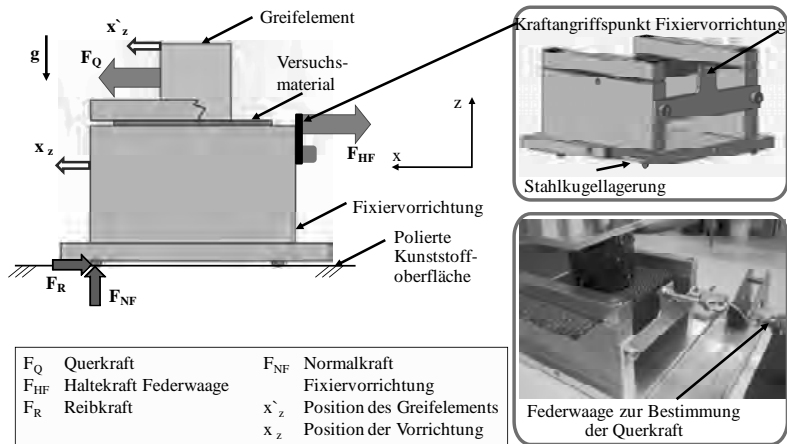


Abbildung 45: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Querkrafteinwirkung

Das sich einstellende Kräftegleichgewicht (vgl. Gl. 3–3) unter Vernachlässigung der Reibungskräfte F_R führt dazu, dass die übertragene Querkraft durch Bestimmung der Haltekraft F_{HF} über eine Federwaage bestimmt werden kann (vgl. Gl. 3–4). Um die Reibungskräfte möglichst gering zu halten, ist die Fixiervorrichtung hierbei mit Stahlkugeln gegenüber einer nahezu reibungsfreien Kunststoffoberfläche gelagert. Ein wichtiger Aspekt ist weitergehend die Vermeidung der Einleitung von Momenten, was durch die gleiche Höhe der Kraftangriffspunkte gewährleistet ist.

$$F_Q = F_{HF} + \sum F_R \quad (3-3)$$

$$\text{mit } F_R \rightarrow 0 \text{ gilt: } F_Q = F_{HF} \quad (3-4)$$

Die Zuglänge bei Querkraft Δx (Relativbewegung) ergibt sich analog der vorhergehenden Betrachtung durch die Differenz der Positionen des Greifelements x'_z und der Vorrichtung x_z (vgl. Gl. 3–5) und ist ein Maß für die Positionsgenauigkeit bzw. Greifgüte. Je größer die auftretende Zuglänge bei der Übertragung von Querkraften durch Kraftschluss, desto stärker gleitet der Greifer über das Handhabungsgut, womit die Greifgüte in Bezug auf die Positionsgenauigkeit abnimmt (vgl. Abbildung 46, links). Die qualitativen Verläufe der kraftschlüssig übertragbaren Kräfte über entsprechenden Zuglängen sind im rechten Teil der Abbildung 46 aufgeführt.

$$\Delta x = x'_z - x_z$$

(3–5)

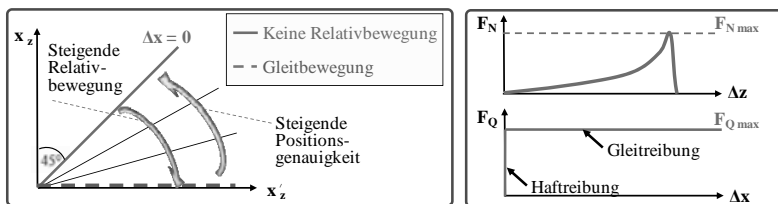


Abbildung 46: Relation zwischen Relativbewegung und Zuglänge Δx bei der Übertragung von Querkraften (links) und qualitative Verläufe der Normal- und Querkraft über entsprechende Zuglängen bei kraftschlüssigen Greifprinzipien (rechts)

Bei formschlüssigen Greifprinzipien ist eine auftretende Zuglänge ein Indikator für die Veränderung der Faserstruktur textiler Handhabungsgüter, da kein Gleiten möglich ist.

3.5.3 Bewertung und Auswahl eines Greifprinzips

Der Schritt *Entscheidung herbeiführen* erfolgt durch die Anwendung des Verfahrens *Nutzwertanalyse (NWA)* nach ZANGEMEISTER (1973). Dieses klassischerweise zweistufige Verfahren ist im Folgenden auf die Bewertung und Auswahl eines Greifprinzips hin zu adaptieren und wird daher um eine dritte Phase erweitert. *Abbildung 47* zeigt die zu durchlaufenden Phasen des Bewertungsprozesses, welcher zunächst durch die Erarbeitung eines Ziel- (Zielkriterien) und Bewertungssystems (Gewichtungsfaktoren) gekennzeichnet ist. Phase 1 und 2 bilden hierbei das klassische Vorgehen einer NWA auf Greifelementebene, während Phase 3 die Übertragung der Ergebnisse auf die Wirkprinzipienebene darstellt.

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

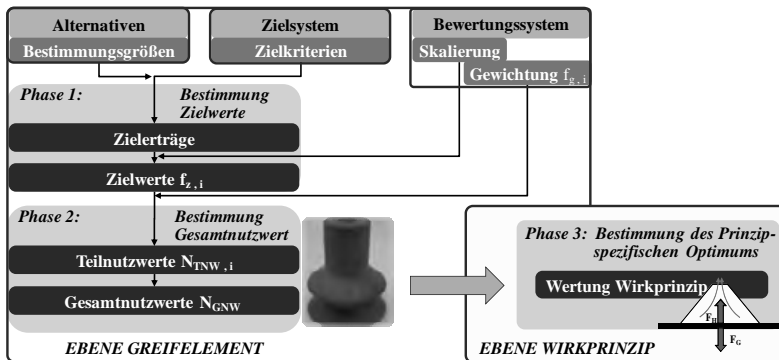


Abbildung 47: Phasen und Ebenen des Bewertungsvorgehens zur Auswahl eines Wirkprinzips (Nutzwertanalyse in Anlehnung an OBLOZINSKA 2005 und HOFFMEISTER 2000)

Für zu bewertende Alternativen werden anhand ihrer Bestimmungsgrößen (vgl. Abschnitt 3.5.2) Zielerträge ermittelt (z. B. maximale Zugkraft 0,8 N) und diese durch Skalierung nach dem Grad der Zielerreichung in Zielwerte $f_{z,i}$ umgerechnet. Einem bestimmten Kriterium kann folgend durch Multiplikation mit dessen Gewichtung $f_{g,i}$ ein Teilnutzwert $N_{TNW,i}$ zugeordnet werden (vgl. Gl. 3–6), welcher durch Summation den Gesamtnutzwert einer Alternative $N_{GNW,i}$ ergibt (vgl. Gl. 3–7) (HOFFMEISTER 2000, OBLOZINSKA 2005, ZANGEMEISTER 1973).

$$N_{TNW,i} = f_{z,i} \cdot f_{g,i} \quad (3-6)$$

$$N_{GNW} = \sum_i^n N_{TNW,i} = \sum_i^n f_{z,i} \cdot f_{g,i} \quad (3-7)$$

Phase 1: Zielkriterien und Gewichtung

Über die im vorhergehenden Abschnitt 3.5.2 ermittelten Untersuchungsgrößen (Kraft, Energie, Strukturintegrität, Greifverhalten) hinaus werden für die Bewertung Kriterien in einem hierarchischen Zielsystem zusammengetragen. Die übergeordneten Ziele lassen sich aufgrund der engen Interaktion zwischen Greifqualität und Funktionalität aus Abbildung 40 in die drei Bereiche

- *Leistungsfähigkeit*,
- *Greifgüte* (Greifqualität und Funktionalität) und
- *Wirtschaftlichkeit* gliedern.

Eine detaillierte Übersicht der ermittelten Kriterien für das Referenzszenario sowie deren Zuordnung und Gewichtung liefert Tabelle 19 im Anhang.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

Die Gewichtung der *Einzelgewichtungsfaktoren* $f_{g,i}$ ist über die, in der Literatur ausführlich beschriebene, Erstellung einer *Zielpräferenzmatrix* durch *paarweisen Vergleich* mit den Attributen *0-weniger wichtig*, *1-gleich wichtig* und *2-wichtiger* und der Anwendung von Stufen- und Knotengewichten in einem *hierarchischen Zielsystem* zu erarbeiten (vgl. LINDEMANN 2007, HOFFMEISTER 2000, ZANGEMEISTER 1973, BREIING & KNOSALA 1997).

Phase 2: Nutzwert auf Greifelementebene

Als Ergebnis der Bewertung auf Greifelementebene ergeben sich die *Nutzwerte* $N_{GNW,i}$ der einzelnen Alternativen. Abgebildet auf den Zielerreichungsgrad des möglichen Optimums von 1,0 errechnet sich die in *Abbildung 48* aufgezeigte Staffellung der untersuchten Greifelemente, welche in *Abbildung 128* im Anhang dargestellt sind. Die beiden Varianten des Niederdruckflächensaugers heben sich hierbei deutlich durch sehr gute Nutzwerte von den anderen Varianten ab, welche durchweg in einem Band von 45 % bis ca. 60 % Zielerreichung liegen.

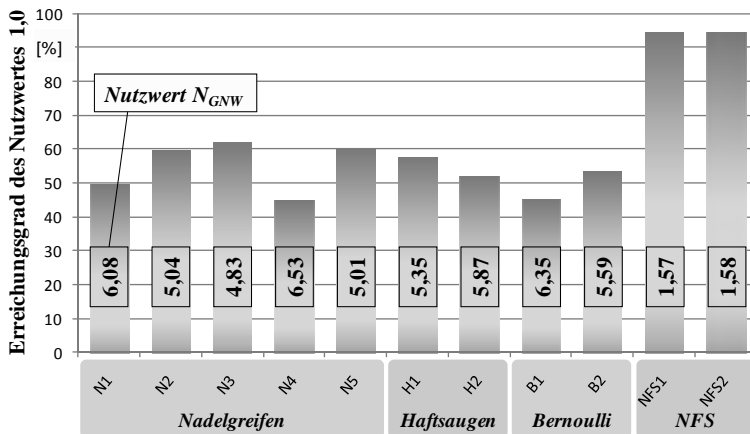


Abbildung 48: Ergebnis der Bewertung auf Greifelementebene –
Nutzwerte und Zielerreichungsgrad des möglichen Optimums

Phase 3: Übertragung Nutzwert auf Wirkprinzipiebene

Wie in den vorhergehenden Abschnitten erörtert, ist das Ergebnis auf Greifelementebene nun noch auf die Wirkprinzipiebene zu übertragen. Hierzu bieten sich Methoden an, wie die *Wahl der besten Lösung* oder auch eine *Mittelwertbildung*. Die Prämisse bei der Auswahl der Greifelemente als Repräsentation eines Wirkprinzips ist mit Bedacht darauf ausgerichtet, die ermittelten Bestimmungsgrößen der Varianten möglichst zielführend auf den betrachteten Anwendungsfall hin

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

auszulegen. Bei der späteren Abbildung eines Wirkprinzips in einem Greifsystem können jedoch theoretisch die ermittelten Vorteile der einzelnen betrachteten Varianten innerhalb einer Gattung kombiniert werden. Das Potenzial eines Greifprinzips wird damit besser durch die Betrachtung des besten Zielwertes (Platzierung) je Kriterium deutlich (*optimaler Pfad* in der Zielwertmatrix). *Abbildung 49* zeigt beispielhaft ein derartiges Vorgehen für das Wirkprinzip Nadelgreifen auf.

Oberziel		Leistungsfähigkeit					Nutzwert auf Greifelementebene	Nutzwert auf Wirkprinzipienebene
Teilziel		Max. Normalkraft	Gradient (Zuglänge)	Einfluß Faserorientierung	Max. Querkraft	Gradient (Zuglänge)		
Gewichtung		4,53	4,53	0,36	3,08	3,8		
Greifprinzip	Greifelement							
Nadelgreifen	N1	1	4	2,4	1	8	6,08	3,17
	N2	1	1	1	1	3	5,04	
	N3	10	3	3,2	1	4	4,83	
	N4	1	5	2,1	1	6	6,53	
	N5	1	2	2,1	1	5	5,01	
Haftsaugen	H1	9	8	1	8	8	5,35	5,23
	H2	11	8	1	8	8	5,87	
Bernoulli	B1	8	10	1	10	10	6,35	5,59
	B2	1	10	1	10	10	5,59	

Optimaler Pfad für das Wirkprinzip Nadelgreifen „Nutzwert“ Wirkprinzip Nadelgreifen

Abbildung 49: Ermittlung des Nutzwertes eines Wirkprinzips durch Wahl des „optimalen Pfads“ erreichter Zielwerte (Auszug Zielwertmatrix)

Durch Anwendung des beschriebenen Vorgehens auf die betrachteten Wirkprinzipien lässt sich ein *Ersatznutzwert* bilden, welcher jeweils mindestens dem der besten betrachteten Alternative entspricht (vgl. *Abbildung 50*). Dieser Wert lässt sich auch als Potenzial des Wirkprinzips im Hinblick auf das Einsatzszenario interpretieren und führt für das Referenzszenario zur Auswahl des Prinzips Niederdruckflächensaugen zum Absortieren von technischen Textilien.

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

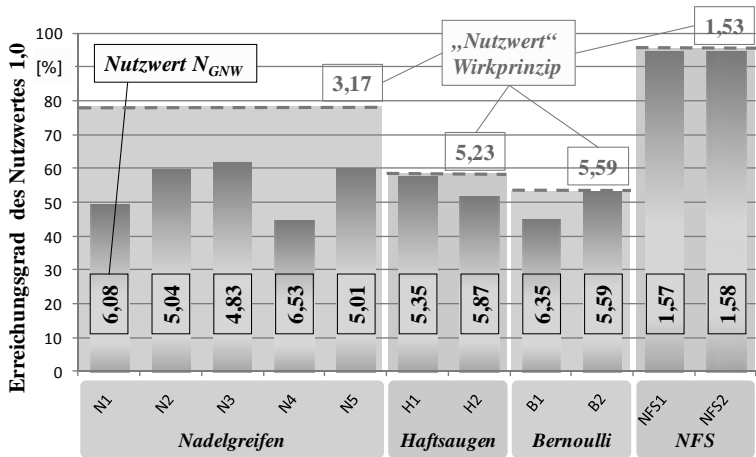


Abbildung 50: Ergebnis der Bewertung auf Wirkprinzipienebene – Ersatznutzwert der Wirkprinzipien

Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Prinzipien

Im Bereich des Nadelgreifens lässt sich ein deutlich erhöhter Ersatznutzwert feststellen, da sich die unterschiedlichen Greifelemente in den vielfältigen Bestimmungsgrößen erheblich unterscheiden. Durch die Bildung des *optimalen Pfads* in der Zielwertmatrix lassen sich zudem positive und negative Auswirkungen bestimmter Bauweisen auf die Zielkriterien erarbeiten. Im Falle der Bernoullisauger verfügt das größere Element B2 durchweg über Vorteile gegenüber B1, so dass hier der Ersatznutzwert gleich dem spezifischen Nutzwert ist.

Die Vorteile des Niederdruckflächensaugens werden maßgeblich im Bewertungsraum *Greifgüte* erkennbar, da selbst bei der Übertragung der maximalen Greifkräfte keinerlei Gefährdung der Strukturintegrität gemäß der aufgezeigten Fehlerbilder und Kriterien festgestellt werden kann (REINHART ET AL. 2009F). Für die Flexibilität des Prinzips spricht weiterhin, dass aus dem Referenzportfolio kein kritisches Material definiert werden konnte und kein Einfluss der Faserorientierung auf das Kraftübertragungsverhalten sowie auf die Strukturbeeinflussung nachgewiesen werden kann. Nadelgreifer können durch das formschlüssige Greifprinzip zwar deutlich größere Kräfte übertragen, beeinflussen dabei aber zwangsläufig die Faserstruktur. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit überzeugt das Prinzip Niederdruckflächensaugen durch geringe Anschaffungs- wie Betriebskosten gegenüber z. T. teuren Nadelgreifern sowie Unterhaltskostenintensiven Haft- und Bernoullisaugern (vgl. Abbildung 129 bis Abbildung 132,

3.5 Erarbeitung eines Greifprinzips

Anhang). Die Flexibilisierung der Greiffläche als Prozessgröße ist beim gewählten Prinzip durch ein gezieltes Verschließen einzelner Öffnungen der perforierten Unterseite erreichbar, womit die dementsprechenden Anforderungen erfüllt werden.

Absicherung der Zielerreichung durch eine Betriebskostenabschätzung

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit stellt im Rahmen der durchgeführten Nutzwertanalyse lediglich einen Teilbereich dar. Im Gegensatz zu kostenorientierten Verfahren (vgl. BREIING & KNOSALA 1997 und HOFFMEISTER 2000) liegt der Fokus der vorgestellten Vorgehensmethode auf der technischen Anwendbarkeit eines Prinzips. Die Wahl eines unterdruckbasierten Wirkprinzips bei permeablen Materialien wie technischen Textilien suggeriert jedoch eine gewisse „Unwirtschaftlichkeit“ durch den beständigen Luftverbrauch sowie dem Einsatz von Vakuum, dessen Erzeugung im Allgemeinen als kostenintensiv empfunden wird. Diesen Bedenken wird zum Abschluss der Wirkprinzipienauswahl, und damit in einer möglichst frühen Entwicklungsphase, im Rahmen des Schrittes *Zielerreichung absichern* durch eine Abschätzung der tatsächlichen Betriebskosten auf Basis des Referenzszenarios Rechnung getragen.

Grundlage der Betrachtung ist die in *Abbildung 51* aufgeführte, idealisierte Modellvorstellung der Handhabungssituation, bestehend aus einem verlustfrei angenommenen Niederdruckflächensauger mit der *Greif- oder Saugfläche* A_G und dem Greifgut (Fläche A_T [m²], Flächenmasse G [kg/m²], Luftdurchlässigkeit R [m/s]). Das Szenario dient zur Abschätzung der kostenrelevanten Prozessgrößen Differenzdruck Δp und Volumenstrom \dot{V} für die beiden Varianten des NFS.

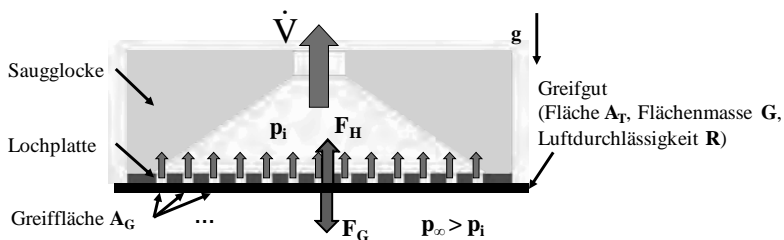


Abbildung 51: Einfaches analytisches Modell des gehaltenen Greifguts

Das zum Halten des Greifgutes erforderliche Kräftegleichgewicht zwischen der Haltekraft F_H und der Gewichtskraft des Zuschnitts F_G ergibt sich zu Gleichung 3–8:

$$F_H = F_G \quad (3-8)$$

3 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eines Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

daraus folgt Gleichung 3–9: $(p_{\infty} - p_i) \cdot A_G = A_T \cdot G \cdot g$ (3–9)

Hierbei wird von der konservativen Betrachtungsweise ausgegangen, dass der Differenzdruck örtlich abgegrenzt an den Öffnungen wirkt.

Mit $\Delta p = (p_{\infty} - p_i)$ und unter Verwendung des *Öffnungsverhältnisses* $f = \frac{A_G}{A_T}$

ergibt sich für den notwendigen *Differenzdruck* Δp die *Gleichung 3–10*:

$$\Delta p = \frac{A_T \cdot G \cdot g}{A_G} = \frac{G \cdot g}{f} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} = 0,01 \text{ mbar} \right] \quad (3-10)$$

Da die spätere Handhabung der technischen Textilien mit höheren *Haltekräften* F_H und damit auch höheren *Betriebsdifferenzdrücken* Δp_B durchgeführt wird, ist noch ein *Sicherheitsfaktor* S zu berücksichtigen (vgl. Gl. 3–11):

$$\Delta p_B = \Delta p \cdot S \quad (3-11)$$

Die *tatsächliche Luftdurchlässigkeit* R_B ist in den relevanten Druckbereichen bis 50 mbar näherungsweise linear abhängig vom anliegenden *Betriebsdifferenzdruck* Δp_B (vgl. Gl. 3–12):

$$R_B = R_{200Pa} \cdot \frac{\Delta p_B}{200 \text{ Pa}} \quad (3-12)$$

Somit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem sich einstellenden *Volumenstrom* \dot{V} in Abhängigkeit der *Zuschnittsfläche* A_T , der *Luftdurchlässigkeit* R_B und dem notwendigen *Betriebsdifferenzdruck* Δp_B (vgl. Gl. 3–13; vgl. auch DIN 2008):

$$\dot{V} = R_B \cdot A_G = R_{200Pa} \cdot \frac{\Delta p_B}{200 \text{ Pa}} \cdot f \cdot A_T \quad (3-13)$$

Unter Verwendung von *Gleichung 3–10* und *3–11* lässt sich dieser Zusammenhang auch unabhängig vom *Betriebsdifferenzdruck* und dem *Öffnungsverhältnis* formulieren, so dass der notwendige *Volumenstrom* lediglich von den *Materialkenngrößen* G und R_{200Pa} sowie der *Zuschnittsfläche* und der gewünschten *Sicherheit* abhängt, obwohl bei den betrachteten Flächensaugerkonfigurationen unterschiedliche Differenzdrücke notwendig sind (vgl. Gl. 3–14):

$$\dot{V} = \frac{1}{200 \text{ Pa}} \cdot R_{200Pa} \cdot G \cdot g \cdot S \cdot A_T \quad (3-14)$$

Tabelle 21 im Anhang der Arbeit zeigt die errechneten Differenzdruck- und Volumenstromwerte für die vier Referenzmaterialien, ausgehend von der maximalen Zuschnittsgröße von $2,7 \text{ m}^2$ ($2,25 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$) und dem Sicherheitsfaktor 2. Der größte Volumenstrombedarf ergibt sich hierbei für das Material mit der größten Luftdurchlässigkeit (Gewebe) zu $116,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Mögliche Varianten zur Erzeugung des Differenzdrucks ohne Berücksichtigung der Eignung sind nach HESSE ET AL. (2004) und JODIN (1991) u. a. der Einsatz von Vakuumpumpen, Seitenkanalverdichtern, Radialventilatoren oder der Kombination von Kolbenkompressoren und Ejektoren (Venturi-Prinzip). Beim Vergleich der typischen Leistungsdaten derartiger Geräte ergeben sich vertretbare spezifische Vakuumerzeugungskosten von 1,7 bis $25 \frac{\text{cent}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ (vgl. *Tabelle 22*,

Anhang). Beim Einsatz eines Radialventilators entstehen für das Referenzszenario somit Energiekosten in Höhe von ca. 1,1 €, wenn ein Zuschnitt der maximalen Greiferausmaße von $2,7 \text{ m}^2$ (angepasst an maximale Zuschnittsgröße) für die Dauer von 24 h gehalten wird. Das Wirkprinzip Niederdruckflächensaugen verursacht somit keine enormen Betriebskosten durch den Einsatz eines beständigen Volumenstroms.

3.6 Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit

Das vorgestellte methodische Vorgehen für die Greifsystementwicklung fokussiert stark auf die Ableitung von Anforderungen unter besonderer Berücksichtigung des Flexibilitätsbedarfs sowie die darauf aufbauende Auswahl eines Wirkprinzips. Das maßgebliche Anwendungsgebiet sind technische Textilien wie Faserverbundhalbzeuge, jedoch ist der Gesamtansatz auch für Textilien und flächige, formlabile Handhabungsgüter im Allgemeinen anwendbar. Einzelne Teilbereiche, wie beispielsweise die Bewertung eines Wirkprinzips, können u. a. auf unterschiedliche Greifaufgaben und Materialien übertragen werden und weisen so eine Allgemeingültigkeit auf.

Im Folgenden wird die Konzeption und Umsetzung eines Greifsystems für Faserverbundhalbzeuge anhand des Referenzszenarios und des gewählten Wirkprinzips beschrieben. Aufgrund dieser notwendigen Fokussierung sind die im Folgenden vorgestellten Teilergebnisse nicht vollständig verallgemeinerbar, das allgemeingültige Vorgehen jedoch erbringt in Folge der Strukturierung und Abstrahierung der Konzeptions- und Auslegungsphase einen erheblichen Erkenntnisgewinn.

4 Konzeption und Umsetzung eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems

4.1 Rahmen und Zielsetzung der Betrachtung

Auf der Basis der Entscheidung für das Wirkprinzip Niederdruckflächensaugen ist im Folgenden das gesamte Greifsystem zu konzipieren und umzusetzen. Hier ist das im *Abschnitt 3.2.2* detaillierte Vorgehen anzuwenden. Auf Basis einer Modularisierung (vgl. *Abschnitt 4.2*) und der ausführlichen Beschreibung der Einzelmodule (vgl. *Abschnitt 4.3*) ist die methodische Konzeption des Gesamtsystems (vgl. *Abschnitt 4.4*) Zielsetzung dieses Kapitels. Weitergehend ist die Absicherung des Konzepts durch die Realisierung eines Funktionsmusters darzustellen (vgl. *Abschnitt 4.5*). Letztlich wird ein Prototyp entwickelt, der die Validierung der Greiftechnologie anhand des Referenzszenarios ermöglicht (vgl. *Kapitel 5*) und weitergehend auch Aussagen über die Relevanz der Greiftechnologie hinsichtlich möglicher Anwendungsbereiche und Wirtschaftlichkeit zulässt (vgl. *Kapitel 6*). Neben der mechanischen Konstruktion und Realisierung wird die Entwicklung und Erprobung geeigneter Steuerungsstrategien und -systeme thematisiert.

Während im vorangegangenen Kapitel die Vorgehensweise bei der Erarbeitung eines Wirkprinzips im Vordergrund stand, wird im Folgenden die technische Realisierung des neuartigen Greifsystems zum Absortieren technischer Textilien für die Herstellung von Faserverbundbauteilen fokussiert. Die zugrunde gelegten Vorgehensweisen, Auslegungsansätze und systemtechnischen Betrachtungen sowie die Steuerungsintegration, insbesondere in Bezug auf die optimierte Positionierung des Greifers, stellen über das erforschte System hinaus einen Mehrwert für die Entwicklung ähnlicher Systeme in analogen Anwendungen dar.

4.2 Funktionsorientierte Modularisierung eines hochflexiblen Greifsystems

In Anlehnung an die in *Abschnitt 2.2.3* aufgezeigte Struktur eines Greifers (vgl. *Abbildung 9*) werden Subsysteme in Form von funktionsorientierten Modulen gebildet. Unter einem Modul wird in diesem Zusammenhang ein abgegrenztes Subsystem des Greifers verstanden (Baugruppe), welches bestimmte Teilfunktionen erfüllt. Es ist von den im *Abschnitt 4.6* eingeführten Greifer-Modulen als vollfunktionsfähige, geometrische Segmente des Gesamtsystems zu

4.2 Funktionsorientierte Modularisierung eines hochflexiblen Greifsystems

unterscheiden. Zur Umsetzung der Teilfunktionen werden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2740 (VDI 1995) Module als abgeschlossene Betrachtungsräume gebildet, wobei eine Funktion durch mehrere Module dargestellt werden kann (vgl. *Abbildung 52*). So kann die Komplexität des Gesamtsystems sinnvoll reduziert werden. Je nach Anwendungsfall und Aufgabenstellung können Module unterschiedlich gelöst (technische Umsetzung) oder ausgeführt (Parameter und Eigenschaften) werden. Der folgende *Abschnitt 4.3* soll hier jeweils die Randbedingungen und das Vorgehen am Beispiel des Referenzszenarios aufzeigen.

Ursprung der Betrachtung sind die abzubildenden Funktionen (vgl. *Abschnitt 3.3*) und die geforderte Flexibilität des Systems (vgl. *Abschnitt 3.4.4*). Diese lassen sich in die in *Abbildung 52* aufgeführten Hauptfunktionen – *prinzipspezifischen Funktionen des Greifsystems* – übersetzen und werden durch die Nebenfunktionen – *systemspezifischen Funktionen* – ergänzt.

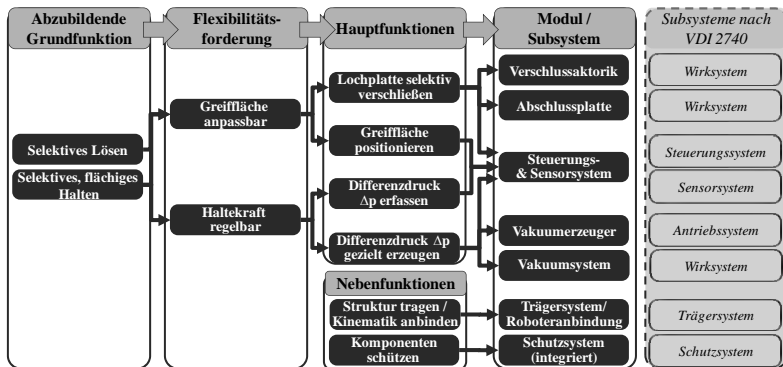


Abbildung 52: Modularisierung auf Basis abzubildender Funktionen und geforderter Flexibilität

Um beispielsweise selektiv verschieden-konturierte Zuschnitte aus einem flächigen Verbund herausgreifen zu können, müssen die Ausdehnung der Greiffläche sowie die Höhe der Haltekraft anpassbar sein. Dies führt für das Greifsystem aufgrund des gewählten Greifprinzips zu den Hauptfunktionen:

- *Abschlussplatte/Lochplatte (einzelne Öffnungen) selektiv verschließen*
- *Greiffläche optimal positionieren*
- *Differenzdruck Δp erfassen*
- *notwendigen Differenzdruck Δp gezielt erzeugen*

4 Konzeption und Umsetzung eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems

Ergänzende Nebenfunktionen bilden dabei notwendige Aufgaben, damit das Gesamtsystem operieren kann, wie z. B.

- die *Greiferstruktur zu tragen* und
- an die *Kinematik anzubinden*.

Die Verschlussaktorik schafft beispielsweise zusammen mit der Abschlussplatte eine partiell geöffnete Fläche, an welcher durch den Vakuumerzeuger und das verteilende Vakuumsystem gezielt der notwendige, durch das Steuerungs- und Sensorsystem erfasste Differenzdruck angelegt wird. Schutzfunktionen der Komponenten gegen zu hohes Vakuum oder gegen Kurzschlüsse durch die Verschmutzung mit leitfähigen CF-Partikeln sind mit Hilfe der bestehenden Module abzubilden, so dass von einem integrierten Schutzsystem gesprochen werden kann. Zu hohes Vakuum ist infolge der Erfassung und Regelung durch das Steuerungs- und Sensorsystem und Verschmutzungen durch eine geeignete Gestaltung des Vakuumsystems auszuschließen.

Modularisierung vereinfacht zwar die Gesamtaufgabe „Greifsystem“, da Teilaufgaben in Form von einzelnen Subsystemen gebildet werden, schafft aber die Schwierigkeit vielfältiger Abhängigkeiten an den Schnittstellen, welche bei einer parallelen Bearbeitung schnell unüberschaubar werden. Die resultierende chronologische Bearbeitung benötigt jedoch eine Reihenfolge abnehmender Relevanz, beginnend mit dem Modul, das den größten Einfluss auf die anderen Subsysteme hat. Die Konzeptionsreihenfolge kann durch die Erarbeitung einer Einflussmatrix und die Visualisierung in einem Einflussportfolio ermittelt werden (vgl. *Abbildung 53* und LINDEMANN 2007).

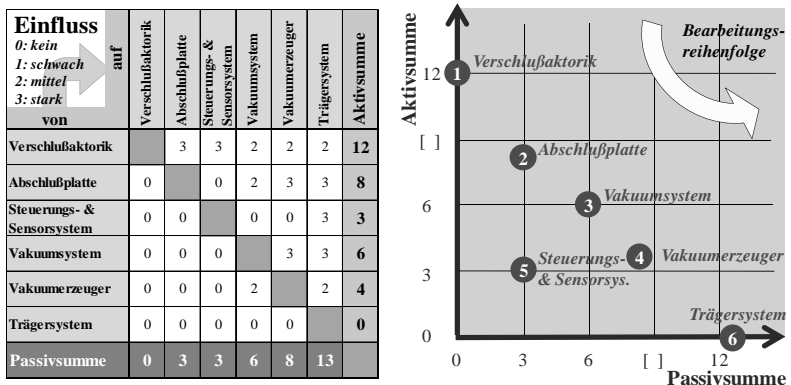


Abbildung 53: Einflussmatrix und Einflussportfolio der Greifermodule

Damit lässt sich der Vernetzungsgrad quantifizieren, indem der Einfluss eines Moduls auf ein anderes mit Werten von 0 (kein Einfluss) bis 3 (starker Einfluss) skaliert wird. Hohe *Aktivsummen* bedeuten einen großen Einfluss auf die anderen Module und kleine *Passivsummen* stehen für Unabhängigkeit im Konzeptionsprozess. Als ein Ergebnis dieser Analyse kann die in *Abbildung 53 (rechts)* dargestellte Bearbeitungsreihenfolge abgeleitet werden.

4.3 Konzeption der Einzelmodule

4.3.1 Allgemeines

Durch den systematischen Einsatz der in *Abschnitt 3.2.3* aufgezeigten Werkzeuge auf Basis der, aus der Anforderungsanalyse abgeleiteten Randbedingungen (vgl. *Tabelle 11; Anhang*) werden in diesem Abschnitt Lösungsmöglichkeiten sowie Gestaltungsvarianten für die einzelnen Module erarbeitet und aus diesen der zu realisierende Ansatz ausgewählt. Für die Konzeption eines selektiven Niederdruckflächensauggreifers stellt dies eine umfangreiche Sammlung möglicher technischer Systemausprägungen dar, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Der Einsatz eines Bewertungsverfahrens zur Auswahl einer Alternative im Sinne des Entwicklungsschrittes *Entscheidung herbeiführen* wird nur bei unterschiedlichen technischen Varianten eingesetzt. Ansonsten werden durch eine Ausweitung des Schrittes *Eigenschaften ermitteln* Auslegungsverfahren für die Gestaltung des Moduls erarbeitet und angewendet.

4.3.2 Auswahl einer Verschlussaktorik

Abgeleitete Aufgaben und Anforderungen

Die Aufgabe des Moduls Verschlussaktorik ist es, in Verbindung mit der Abschlussplatte einen partiell mit Differenzdruck beaufschlagten Bereich als Greiffläche zur Verfügung zu stellen. Bei luftdurchlässigen Handhabungsgütern ist hierzu durch eine geeignete Aktorik ein beständiger Volumenstrom an den Öffnungen der Abschlussplatte freizugeben, wodurch der benötigte Differenzdruck abfällt (vgl. *Abbildung 51*). Im Sinne der geforderten Flexibilität ist die selektive Greiffläche automatisiert durch geöffnete Bohrungen der Abschlussplatte auf der Basis von CAD-Daten zu erzeugen. Hierzu muss die Aktorik in der Lage sein, spezifische Steuersignale umzusetzen, wobei aufgrund der geforderten Taktzeit die Veränderung der Greiffläche durch Öffnen oder Schließen aller Bohrungen maximal 30 Sekunden dauern darf (Gesamtprozess 60 s; vgl. Lastenheft *Tabelle 11, Anhang*). Für das Referenzszenario wird eine Greiffläche mit den 90

Ausdehnungen 2250 mm x 1200 mm mit einer Greifauflösung von 25 mm angestrebt, was bei einer gleichmäßigen Rasterung der Öffnungen zu einer Mindestanzahl von 4320 Aktoren führt. Die Montage des Greifsystems an eine Kinematikeinheit (z. B. Roboter) begrenzt das mögliche Gewicht der Aktorik.

Lösungsideen und -alternativen (Lösungsideen ermitteln)

Bei der Betrachtung der Aktorik wird im Folgenden von der Prämisse ausgegangen, dass ein Luftstrom im Bereich eines niedrigen Vakuums (Δp bis zu 30 mbar) unterbrochen werden muss. Grundsätzlich könnte der Unterdruck durch die Nutzung von Bernoulli- oder Coandâeffekten auch lokal je Öffnung erzeugt werden, wobei dann eine Unterbrechung der Druckluftzufuhr erreicht werden müsste. Diese Variante wird aufgrund der großen Anzahl an einzeln zu betätigenden Bereichen nicht in Betracht gezogen.

Für die Gestaltung der Aktorik ergeben sich zwei grundsätzliche Entscheidungen. Zum einen kann die Aktorik dezentral konzipiert werden, d. h. jede Öffnung wird durch einen Aktor bedient (vgl. *Abbildung 54*). Oder die Aktorik wird zentralisiert und bewegbar gestaltet (z. B. Portal). In diesem Fall betätigt ein Aktor lediglich ein passives Element, welches die Öffnung verschlossen oder offen hält. Zum anderen kann das Verschlussystem in den Greifer integriert werden oder als externe, separate Einstelleinheit fungieren. Auch in letzterem Fall wird ein passives Element benötigt, welches den aufgeprägten Öffnungszustand speichert.

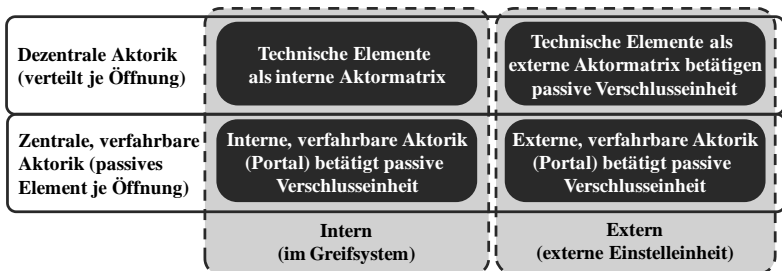


Abbildung 54: Grundsätzliche Lösungskategorien für das Modul Verschlussaktorik

Abbildung 133 im Anhang der Arbeit zeigt die resultierenden Lösungsideen in Form von Alternativen sowie die durch Ausschlusskriterien (1-5) eliminierten Ansätze. Im Rahmen des Referenzszenarios ist eine zusätzliche externe Einstelleinheit mit dezentraler Aktorik nicht realisierbar. Zusätzlich zu der großen Anzahl an passiven Elementen benötigt man in diesem Fall die gleiche Menge an

4.3 Konzeption der Einzelmodule

Aktoren. Magnetventile, Schrittmotoren oder Piezoaktoren sind bei einer verteilten Aktorik zu kostenintensiv. Einen Aktor an einem Portal mit zwei Freiheitsgraden (2D) zu konzipieren und so jedes passive Element einzeln anzufahren und zu aktivieren, scheitert an der resultierenden hohen Prozesszeit (Abschätzung), bedingt durch die große Anzahl an Öffnungen. Die Fortführung dieser Idee als Aktorleiste (Hubmagnet, Druckluftstoß oder Linearaktuator) an einem Portal mit nur einer Bewegungsrichtung (1D) ist für das Referenzszenario lediglich als externe Variante lösbar, da sonst im Inneren des Greifers ein Portalsystem zu integrieren wäre. Die aufgezeigten Lösungen stellen aber dennoch attraktive Lösungsvarianten für die beschriebene Aufgabenstellung dar und erweisen sich in einem zukünftigen Kontext eventuell als zielführende Alternativen.

Charakteristika möglicher Varianten (Eigenschaften ermitteln)

Als mögliche Ansätze verbleiben die Kombination aus einem Hubmagnet und einem Verschlusspfropfen als dezentrale Aktoriken. Der Magnet kann dabei als *monostabile* oder als *bistabile* Variante ausgeführt werden (vgl. *Abbildung 55*).

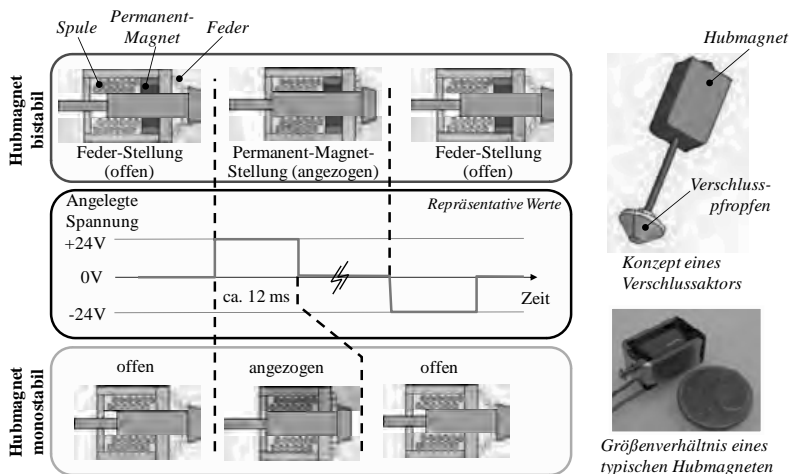


Abbildung 55: Verschlussaktor Hubmagnet: Vergleich des Schaltverhaltens zwischen monostabiler und bistabiler Ausprägung (links) sowie Konzept und Größenverhältnis (rechts)

Beide besitzen grundsätzlich zwei Stellungen, die durch das Wirken des Magnetfelds einer Spule gegen die Kraft einer Feder erreicht werden. Während der monostabile Aktor ohne Spannungsversorgung lediglich in der von der Federkraft determinierten Position „stabil“ ist (*Abbildung 55*, unten), verfügt die bistabile Version über einen zusätzlichen Permanentmagneten, der in der Lage

ist, die Federkraft ohne Bestromung der Spule zu kompensieren (*Abbildung 55*, oben).

Der Wechsel der Schaltstellungen erfolgt lediglich durch einen entsprechend gepolten, kurzen Spannungsimpuls (z. B. 24 V; 12 ms). In Verbindung mit einem elastischen Element zum Abdichten einer Öffnung lässt sich somit ein kostengünstiger (ca. 1 €, kleiner (ca. 10 mm Kantenlänge) sowie leichter (ca. 10 g) Aktor konzipieren, der in der bistabilen Variante einen geringen intermittierenden Energieverbrauch bei äußerst kurzen Schaltzeiten aufweist.

Bei dem möglichen externen, zentralen Ansatz (vgl. *Abbildung 133 im Anhang*) wird eine Aktorreihe aus Hubmagneten, Linearaktoren oder Druckluftaktoren an einem Portal in einer Richtung über die mit passiven Elementen versehenen Bohrungen der Abschlussplatte bewegt und können einzelne passive Elemente öffnen oder schließen. Hierzu muss das passive Element über zwei stabile Stellungen verfügen, die ähnlich einem Kugelschreiber durch gleichgerichtete Krafteinwirkung erreichbar sind. Ein derartiges mechanisches Verschlusselement (z. B. federvorgespannt) ist derzeit lediglich in der Form eines Tastventils am Markt verfügbar, könnte aber auch neu konzipiert werden. Eine zusätzliche Option ist der Einsatz eines Haftmagneten, der im bestromten Zustand Kraft auf ein passives Schiebeelement ausübt und dieses vor eine Öffnung zieht. Der wesentliche Nachteil der externen Varianten ist die Tatsache, dass ein Schließen der Öffnungen während des Haltens eines Textils nicht möglich ist und somit lediglich alle gegriffenen Zuschnitte durch Abriegeln der Vakuumversorgung vom Greifer gelöst werden können.

Bewertung und Auswahl

Zur Bewertung der Alternativen und Auswahl des zu realisierenden Ansatzes kann wieder die NWA eingesetzt werden (vgl. *Abschnitt 3.5.3*). Die dritte Phase zur Übertragung von dem evaluierten Gegenstand auf das zugrundeliegende Prinzip entfällt in diesem Fall, da die Evaluierung theoretischer Natur ist und keinerlei experimentelle Untersuchungen übertragen werden müssen. Auf Basis der definierten Anforderungen werden die in *Abbildung 134* im Anhang aufgezeigten Kriterien erarbeitet, Oberzielen zugeordnet und gewichtet.

Die Anwendung des Bewertungsverfahrens auf die Lösungsalternativen ergibt den größten Nutzwert für die Alternative bistabiler Hubmagnet als dezentrale, interne Aktorik (vgl. *Abbildung 135; Anhang*). Durch die Anwendung dieses Prinzips wird die Möglichkeit geschaffen, eine erhebliche Anzahl an Öffnungen einzeln zu verschließen und somit eine bestimmte Greiffläche für das selektive

Absortieren der Zuschnitte zu realisieren. Die Bistabilität des Aktors in Verbindung mit den extrem kurzen Schaltzeiten ermöglicht einen sehr energieeffizienten Betrieb, stellt aber aufgrund der Anzahl an Aktoren hohe Anforderungen an die Steuerungstechnik.

4.3.3 Gestaltung der Abschlussplatte

Abgeleitete Aufgaben und Anforderungen

Die Abschlussplatte ist der Teil des Greifsystems, welcher mit dem zu handhabenden Greifgut in direktem Kontakt steht und deshalb von erheblicher Relevanz ist, da der Haltekraft erzeugende Differenzdruck an den Öffnungen auf den zu greifenden Zuschnitt wirkt. Im Zusammenwirken mit der Verschlussaktorik wird durch die Abschlussplatte das gezielte Verschließen einzelner Öffnungen und damit das selektive Greifvermögen des Systems abgebildet. Weitergehend sollte die Gestaltung der Platte der Forderung nach einem flächigen, formgebenden Greifen genügen. Die Gesamtausdehnung der Abschlussplatte folgt den aufgetragten Zielabmaßen des Gesamtsystems (2250 mm x 1200 mm) und auch die angestrebte Auflösung der Greifpunkte (25 mm) ist auf Basis der Materialuntersuchungen für das Referenzszenario darzustellen. Die Abschlussplatte kann auf Basis der Anforderungen in unterschiedlichen Ausprägungen gestaltet werden, die im Folgenden aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu diskutieren sind. Abschließend wird für das Referenzszenario eine Auslegung durchgeführt.

Gestaltungsmöglichkeiten und -freiheitsgrade (Lösungsideen ermitteln)

Grundsätzlich besteht die Option, die Abschlussplatte als segmentierte oder integrale Fläche auszuführen (vgl. *Abbildung 56, oben*). Viele der bestehenden, auf dem gewählten Wirkprinzip beruhenden Lösungen weisen keine integrale Fläche auf, wobei die einzelnen Segmente separat mit Unterdruck versorgt werden und somit ein quasi-selektives Greifwerkzeug mit sehr grober Auflösung darstellen (vgl. *Abschnitt 2.3.1*). Zur Erhöhung der Auflösung müssten im vorliegenden Fall die Segmente verkleinert werden, was letztlich zur angestrebten, gezielten Vakuumversorgung einzelner Öffnungen führt. Eine Segmentierung der Fläche verliert somit bei den geforderten hohen Greifpunktauflösungen an Relevanz, zumal auch der konstruktive Aufwand steigen würde. Die Variante einer integralen Fläche birgt weitergehend den positiven Aspekt eines vollflächigen Haltens des formlabilen Greifgutes. Bei größeren Abmessungen, wie beispielsweise im Falle des Referenzszenarios, kann die Gesamtfläche des Greifers aus mehreren Modulen gebildet werden, die sich aus jeweils integralen Abschlussplatten zusammensetzen (vgl. *Abschnitt 4.6* und *Abbildung 79*). Diese makroskopische

Segmentierung der Gesamtfläche in gleichartige Module ist hierbei aber maßgeblich Gründen wie Austauschbarkeit und Wartungsfreundlichkeit sowie den Erfordernissen des Vakuumsystems geschuldet (vgl. Abschnitt 4.3.4).

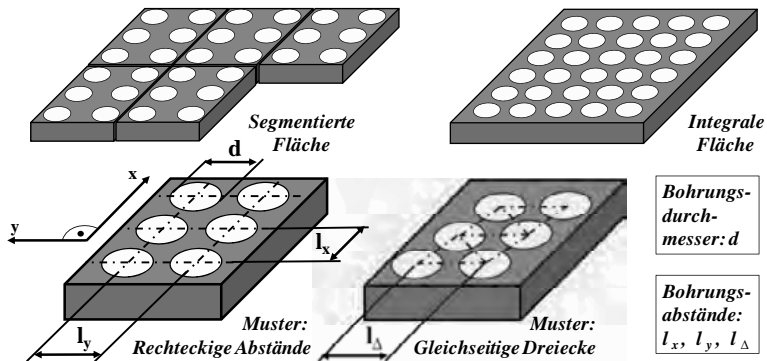


Abbildung 56: Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Abschlussplatte

Wird davon ausgegangen, dass die Öffnungen der Abschlussplatte als regelmäßiges Muster (Flexibilitätsgewinn), kreisrunder (strömungs- und verschlusstechnisch günstig) Aussparungen gestaltet wird, ergeben sich weitere Freiheitsgrade, welche unter dem Begriff *Öffnungskonfiguration* zusammenfassbar sind:

- *Anordnung der Öffnungen* – Bohrungsmuster
- *Abstände der Mittelpunkte* – Bohrungsabstand l_x und l_y oder l_Δ
- *Größe der Öffnungen* – Bohrungsdurchmesser d

Einflussanalyse und Diskussion der Freiheitsgrade (Eigenschaften ermitteln)

Bohrungsabstand: Wie in der durchgeführten Materialanalyse aufgezeigt, hängt der minimal notwendige Abstand zwischen zwei Einleitungspunkten der Haltekraft maßgeblich von der Biegesteifigkeit des Materials ab. Insbesondere die verbreiteten unidirektionalen Gelege neigen quer zu Faserorientierung zum Abklappen und erfordern dadurch geringe Abstände (z. B. 25 mm; vgl. Abschnitt 3.4.1). Je kleiner der Abstand zwischen den Öffnungen jedoch gewählt wird, desto höher ist der Aufwand für die einzusetzende Verschlussaktorik, da der zur Verfügung stehende Bauraum kleiner und die Anzahl größer wird, was letztlich in höheren Kosten und steigendem Gewicht des Gesamtsystems resultiert.

Bohrungsmuster: Für die regelmäßige Anordnung der Öffnungen existieren vielfältige Möglichkeiten, aus welchen drei Varianten näher betrachtet werden (vgl. Abbildung 57).

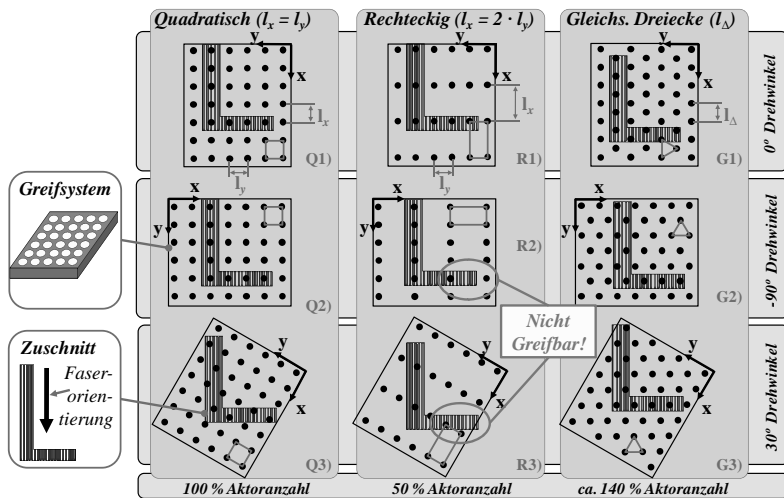


Abbildung 57: Beispielhafter Vergleich von Varianten des Bohrungsmusters beim Greifen eines UD-Geleges unter verschiedenen Greifer-Drehwinkeln

Der naheliegenste Ansatz ist die matrixförmige Anordnung in einem Rechteck-Muster (*Spalte R – Mitte der Abbildung 57*) längs der geometrischen Achsen, welche die Greiffläche aufspannen (x- und y-Richtung). Einen Sonderfall der rechteckigen Anordnung stellt die Gleichsetzung der Bohrungsabstände in diesen beiden Raumrichtungen dar ($I_x = I_y$), wodurch ein quadratisches Bohrungsmuster entsteht (*Spalte Q – links in Abbildung 57*). Werden die Mittelpunkte der Öffnungen durch äquidistante Abstände charakterisiert (I_Δ), ergibt sich ein Bohrungsmuster aus gleichseitigen Dreiecken, wodurch für diesen Abstand die höchste Öffnungsichte erreicht wird (*Spalte G – rechts in Abbildung 57*). Diese ist aus prozesstechnischer Sicht zwar wünschenswert, da sich auch die Anzahl der Bohrungen und damit die resultierende Haltekraft pro Zuschnitt erhöht, verursacht aber gleichzeitig auch höhere Aktorikaufwände (bzw. -anzahlen).

Die Wahl des optimalen Musters hängt von der gewünschten Flexibilität bei der Orientierung des Greifsystems ab. Beim Rechteckmuster muss beispielsweise zur Minimierung der Öffnungsanzahl lediglich in eine Richtung (z. B. y-Achse) die vorgegebene Mindest-Auflösung realisiert werden, wodurch diese auch quer zur Faserorientierung und damit in Richtung der maßgeblichen Biegesteifigkeit auszurichten ist (vgl. *Abbildung 52, Skizze R1*). Die Folge ist eine verminderte Einsetzbarkeit des Greifsystems unter anderen Drehwinkeln, da das formlabile

Material nicht ganz am Rand gehalten werden kann (*Skizzen R2 und R3*). Für die Auswahl eines Bohrungsmusters gilt es demnach, auf Basis des Zielszenarios die gewünschte Flexibilität und hohe Prozesssicherheit gegen die resultierenden Aufwände abzuwiegen.

Bohrungsdurchmesser: Obwohl der Bohrungsdurchmesser einen einfachen geometrischen Parameter darstellt, beeinflusst dieser in komplexer Art und Weise verschiedene Zielgrößen der Greiferentwicklung und stellt somit eine der zentralen Gestaltungsgrößen der Abschlussplatte bzw. des Greifsystems dar. Auf Basis der Anforderungsermittlung (vgl. *Abbildung 34*) können folgende, in *Abbildung 58* aufgezeigte, qualitative Abhängigkeiten zwischen einem steigenden Bohrungsdurchmesser d und verschiedenen Zielgrößen ermittelt werden (jeweils gleichbleibendes Muster).

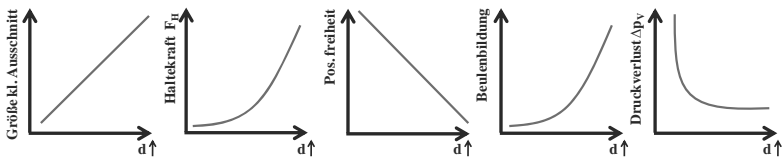


Abbildung 58: Qualitative Abhängigkeiten verschiedener Zielgrößen von der Größe des Bohrungsdurchmessers d (REINHART & STRAßER 2011)

- Der Bohrungsdurchmesser beeinflusst die Größe des kleinsten, selektiv zu greifenden Ausschnitts und somit die *Funktionalität* des Greifers. Steigt der Bohrungsdurchmesser, können kleinere Zuschnitte oder Teilbereiche nicht mehr explizit aus dem flächigen Verbund separiert werden, da die Haltekraft auch auf benachbarte Zuschnitte wirkt (vgl. *Abbildung 59*).
- Je größer der Durchmesser gewählt wird, desto größer gestaltet sich die Greiffläche (vgl. A_G in *Abbildung 51*) und desto höher sind die *erreichbaren Haltekräfte* F_H bei gleichem Differenzdruck.
- Neben diesem Aspekt beeinflusst der Bohrungsdurchmesser auch über die Flexibilität die *Leistungsfähigkeit* des Systems, da größere Öffnungen schneller zu unzulässigen Überlappungen mit dem Verschnitt führen, was die *Positionierungsfreiheit* einschränkt (vgl. *Abbildung 59*).
- Weitergehend kommt es bei größeren Bohrungen durch die fehlende Abstützung des strukturlabilen Textils schneller zur Beschädigung des Greifguts (*Beulenbildung*), wodurch die Qualitätsforderung im Sinne eines minimalinvasiven Greifens beeinflusst wird.
- Die Größe der Bohrungen determiniert letztlich die Höhe der *Druckverluste* Δp_V und damit auch die *Wirtschaftlichkeit* des Systems.

Dementsprechend teilt sich der gesamte Volumenstrom gleichmäßig auf die zur Verfügung stehenden Öffnungen auf (vgl. Gl. 4-1 und 4-2).

$$\Delta p_{Ges} = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_n = \Delta p_V \quad (4-1)$$

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n = n \cdot \dot{V}_n \quad (4-2)$$

Die Berechnung des *Druckverlusts* Δp_V kann aufgrund der geringen Druckänderungen auch für kompressible Medien wie Luft auf der Basis einer quasi-inkompressiblen ($\rho_F = \text{konst.}$) Zustandsänderung beschrieben werden (WATTER 2007). Nach der Durchströmung des Textils erfolgt demnach der Durchtritt durch die rohrförmige Bohrung als laminare Strömung mit der mittleren *Geschwindigkeit* c_F . Mit Hilfe der *dynamischen Viskosität* η lässt sich die Abhängigkeit zwischen dem Volumenstrom und dem *Druckverlust* $\Delta p_{V,B}$ in der Bohrung der *Tiefe* t_A wie folgt darstellen (Gesetz von Hagen-Poiseuille; vgl. Gl. 4-3):

$$\dot{V}_n = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p_{V,B}}{128 \cdot t_A \cdot \eta} \quad (4-3)$$

Der *Druckverlust* Δp_V entlang der Strömung zwischen Textil und Vakuumsystem setzt sich weitergehend aus den *Eintritts-* und *Austrittsverlusten* $\Delta p_{V,E}$ bzw. $\Delta p_{V,A}$ zusammen (Gl. 4-4) und vermindert den in der Kammer zur Verfügung stehenden Differenzdruck Δp_i auf den wirkenden *Handhabungsdifferenzdruck* Δp_H (vgl. Gl. 4-5).

$$\Delta p_V = \Delta p_{V,E} + \Delta p_{V,B} + \Delta p_{V,A} \quad (4-4)$$

$$\Delta p_H = \Delta p_i - \Delta p_V = \Delta p_i - \Delta p_{V,E} - \Delta p_{V,B} - \Delta p_{V,A} \quad (4-5)$$

Die einzelnen Druckverlustterme mit den jeweiligen von der Geometrie abhängigen Verlustkoeffizienten ζ_E und ζ_A lassen sich nach WATTER (2007) wie folgt darstellen (vgl. Gl. 4-6 und 4-7):

$$\Delta p_{V,E} = \zeta_E \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot c_F^2 = \zeta_E \cdot \frac{8 \cdot \rho_F \cdot \dot{V}_n^2}{\pi^2 \cdot d^4} \quad (4-6)$$

$$\Delta p_{V,A} = \zeta_A \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot c_F^2 = \zeta_A \cdot \frac{8 \cdot \rho_F \cdot \dot{V}_n^2}{\pi^2 \cdot d^4} \quad (4-7)$$

Der *Handhabungsdifferenzdruck* Δp_H kann demnach aus den Gleichungen 4-3, 4-5, 4-6 und 4-7 zusammengefasst formuliert werden (vgl. Gl. 4-8):

$$\Delta p_H = \Delta p_i - \Delta p_v = \Delta p_i - \frac{8 \cdot \dot{V}_n}{\pi^2 \cdot d^4} (\zeta_E \cdot \rho_F \cdot \dot{V}_n - 16 \cdot \pi \cdot t_A \cdot \eta - \zeta_A \cdot \rho_F \cdot \dot{V}_n) \quad (4-8)$$

Sowohl die Höhe der Eintritts- und Austrittsverluste als auch die Ausmaße der Verluste durch die Wandreibung hängen damit reziprok von der vierten Potenz des Bohrungsdurchmessers ab, wodurch größere Durchmesser die Strömungsverluste signifikant vermindern und den zur Verfügung stehenden Handhabungsunterdruck erhöhen. Mit Hilfe dieses Ausdrucks lassen sich somit in der frühen Entwicklungsphase analytisch Abschätzungen zu den auftretenden Druckverlusten in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers durchführen. Weitergehend kann ein Korrekturfaktor (*Druckverlust* Δp_v) in die Ermittlung des *Handhabungs-differenzdrucks* Δp_H basierend auf der Messung des *Differenzdrucks* Δp_i in der Kammer eingepflegt werden.

Auswahl einer Öffnungskonfiguration für das Referenzszenario

Hinsichtlich der aufgezeigten differierenden Zielsetzungen bei der Auswahl der Öffnungskonfiguration gilt es, ein Optimum zu finden. Im Falle des Referenzszenarios wird eine integrale Abschlussplatte gewählt. Der maximale Abstand der Bohrungsmittelpunkte ist aufgrund der ermittelten Biegesteifigkeiten der Materialien (v. a. UD-Gelege, orthogonal zur Faser) auf 25 mm festgelegt. Ein quadratisches Bohrungsmuster erbringt jedoch eine erhebliche Steigerung der Positionierungs-Flexibilität gegenüber der rechteckigen Variante. Zudem ergeben sich bei geringem Flexibilitätsverlust um ca. 40 % weniger Aktoren als beim angedachten Dreiecksmuster (rechtwinkliges Dreieck, Seitenlänge 25 mm), weshalb dieses ausgewählt wird. Die mögliche Größe der Bohrungen liegt zwischen 0 und 19 mm (kleinster zu greifender Ausschnitt des Referenzszenarios). Evaluierungsuntersuchungen zeigen bei Durchmessern über 10 mm erste Anzeichen von Beulenbildung, so dass dieser Parameterbereich auszuschließen ist. Ebenfalls eliminiert werden mögliche Bohrungsdurchmesser kleiner als 2 mm, da die erforderlichen Haltekräfte nur über hohe Differenzdrücke zu erreichen sind. Zur Evaluierung des resultierenden Parameterbereichs werden die Drosselkurven der Varianten 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm experimentell ermittelt. Hierzu wird für die verschiedenen Referenztextilien der *Differenzdruck* Δp_i in Abhängigkeit des erzeugten *Volumenstroms* \dot{V} gemessen (vgl. *Abbildung 136* und *Abbildung 137; Anhang*). Letztlich ergibt sich ein Bohrungsdurchmesser von 8 mm als optimaler Kompromiss und wird für den zu erforschenden Greiferprototypen ausgewählt.

4.3.4 Konzeption eines Vakuumsystems

Die Aufgabe des Vakuumsystems ist die gleichmäßige und effiziente Unterdruckversorgung der einzelnen, über die gesamte Fläche verteilten Öffnungen der Abschlussplatte. Als prinzipielle Lösungsvariante bietet sich entweder eine evakuierte Kammer oder eine individuelle Anbindung der einzelnen Öffnungen über Schlauchsysteme an (vgl. *Abbildung 61*, links). Nach HESSE ET AL. (2004) können die Strömungsübergänge in unterdruckbasierten Greifsystemen durch sich aufweitende Durchmesser verlustarm gestaltet werden (vgl. *Abbildung 61*, rechts). Dieser Ansatz verfügt zwar über den Vorteil einer einfacheren Abriegelung einzelner Öffnungen oder Bereiche, erweist sich jedoch aufgrund der großen Anzahl an Leitungen (4320 Öffnungen im Referenzszenario) als sehr aufwändige und verlustbehaftete Lösung. Weitergehend ergeben sich Schwankungen im anliegenden *Handhabungsdifferenzdruck* Δp_H , durch eventuell unterschiedliche Leitungslängen.

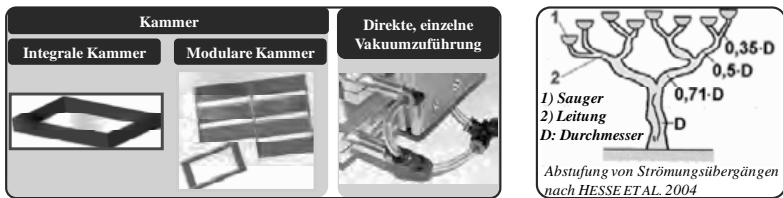


Abbildung 61: Konzeptionsansätze des Vakuumsystems (links) und Gestaltungsregel für Strömungsübergänge in Unterdruckgreifern (rechts)

Die Option, eine Vakuumkammer mit einem definierten Unterdruckniveau zu gestalten, gegenüber welchem einzelne Öffnungen freigegeben werden können, um selektiv Haltekraft in des Greifgut zu induzieren, lässt sich in ein integrales und ein modulares Konzept unterteilen. Während die integrale Version die konstruktiv und fertigungstechnisch aufwandsärmste Variante darstellt, birgt auch die Anwendung einer unterteilten Kammer einige Vorteile:

- kleine, einzeln regelbare Teilsysteme mit separater Druckmessung
- abriegelbare Teilbereiche ohne Betätigung der Aktorik (kleine Zuschnitte)
- Austauschbarkeit der Teilmodule

Die Auswahl der potenzialträchtigsten Variante für den Einsatz im Referenzszenario wird bei diesem Teilsystem erneut auf der Basis des Bewertungsverfahrens Nutzwertanalyse vollzogen. *Abbildung 138* im *Anhang* zeigt die angewendeten Bewertungskriterien (Zielkriterien) und zugehörigen Oberziele sowie deren

Gewichtungen. Im Ergebnis überzeugt die modulare Vakuumkammer durch den größten Nutzwert und wird deshalb bei der weiteren Konzeption des Systems übernommen (vgl. *Abbildung 139; Anhang*).

4.3.5 Auswahl und Auslegung eines Vakuumerzeugers

Abgeleitete Aufgaben, Anforderungen und Abhängigkeiten

Die Aufgabe des Vakuumerzeugers ist die gezielte Evakuierung des Vakuumsystems, um an den Öffnungen der Abschlussplatte den resultierenden Differenzdruck in der richtigen Höhe zur Verfügung zu stellen. Hierzu ist das System derart zu gestalten, dass auch bei hohen Luftdurchlässigkeiten der Materialien genügend Volumenstrom gewährleistet ist, um den erforderlichen Druckabfall am Textil zu erzeugen. Gefordert wird weitergehend eine effiziente Wirkungsweise, welche durch die Auslegung des Systems zu erreichen ist. Die bei luftdurchlässigen Greifgütern bestehende Abhängigkeit des zu erzeugenden Unterdrucks vom Strömungsverhalten des Gesamtsystems bedingt im Folgenden eine gesamthafte Betrachtung der Betriebskennlinie des Vakuumerzeugers in Verbindung mit der Systemdrosselkurve (JODIN 1991). Demzufolge ergibt sich eine Abhängigkeit von drei Faktoren, die die Systemdrosselkurve beeinflussen (vgl. *Abbildung 62*):

- *Luftdurchlässigkeit R des Greifguts (Textils)*
- *geöffnete, durchströmte Fläche A_G der Abschlussplatte (Greiffläche)*
- *Strömungsdruckverluste $\Delta p_{V,HS}$ im gesamten Handhabungssystem*

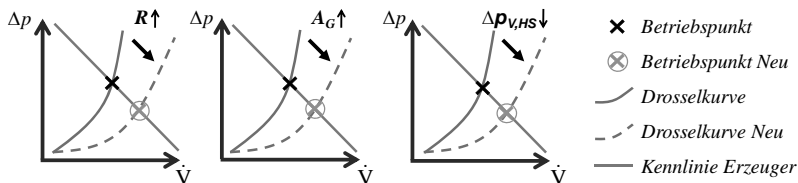


Abbildung 62: Einflüsse auf die Systemdrosselkurve und den resultierenden Betriebspunkt des Vakuumerzeugers

Je größer die Luftdurchlässigkeit des Greifgutes ist, desto mehr Volumenstrom muss aufgewendet werden, um den notwendigen Differenzdruck am Textil zu erzeugen. Die Luftdurchlässigkeit ist ein materialbasierter Kennwert und kann auf Basis des zu handhabenden Halbzeugspektrums ermittelt werden (vgl. *Abchnitt 3.4.1*). Eine Vergrößerung der durchströmten Fläche der Abschlussplatte des Greifsystems beeinflusst die Systemdrosselkurve in ähnlicher Art und Weise. Im Gegensatz zur Luftdurchlässigkeit hängt diese jedoch von der Anzahl der

geöffneten Bohrungen und somit von den Ausmaßen der transportierten Zugschnitte ab und ist damit eine prozessbedingte Größe. Eine Verringerung der Druckverluste, also eine günstigere Gestaltung des durchströmten Systems, führt ebenfalls zu geringeren zu erzeugenden Differenzdrücken. Damit ergibt sich die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit des Vakuumerzeugers von der Gestaltung des Greifsystems.

Lösungsideen und -alternativen (Lösungsideen ermitteln und evaluieren)

Zu unterscheidende Lösungsalternativen hängen maßgeblich von den am Markt verfügbaren Vakuumerzeugertypen ab. Lediglich die Überlegung, ob eine zentralisierte Einheit für das gesamte Greifsystem oder eine Anordnung dezentraler Erzeuger je Modul der Vakuumkammer zum Einsatz kommt, bietet dafür einen Freiheitsgrad (vgl. *Abbildung 63*). Im Falle einer modularisierten Vakuumkammer verfügen dezentrale Einheiten über den Vorteil, dass einzelne Bereiche separat regelbar sind und unbenutzte Module nicht mit Vakuum versorgt werden. Eine dezentrale Einheit kann demgegenüber einfacher vom Greifwerkzeug und der Kinematik (Industrieroboter) entkoppelt werden.

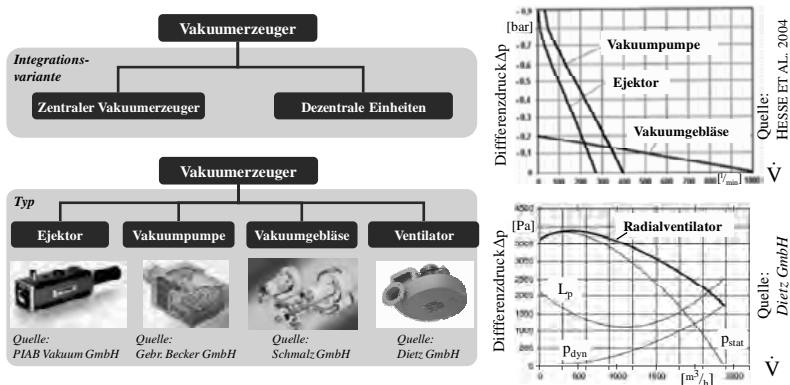


Abbildung 63: Lösungsalternativen bei der Auswahl eines Vakuumerzeugers und typische Betriebskennlinien

Grundsätzlich verfügen die Systeme jedoch über die abgebildeten Betriebsbereiche, welche sich in den erreichbaren Differenzdrücken und Volumenströmen stark unterscheiden. So eignen sich Vakuumpumpen und Ejektoren zur Erzeugung hoher Differenzdrücke bei vergleichsweise niedrigen Volumenströmen, während Vakuumgebläse umgekehrte Arbeitsbereiche aufweisen. Zwar können durch Parallel- (Volumenstrom) oder Serienschaltung (Differenzdruck) der Erzeugertypen auch andere Betriebsbereiche erreicht werden, jedoch wird die

Vakuumerzeugung dann unwirtschaftlich. Die Auswahl eines der in *Abbildung 63* aufgeführten Typen kann erst nach der Ermittlung des voraussichtlichen Vakuumbedarfs erfolgen.

Auslegung und Auswahl durch Ermittlung des Vakuumbedarfs

Die Ermittlung des Vakuumbedarfs zur Dimensionierung und Auswahl des Erzeugers ist anhand einer *Worst-Case-Betrachtung* unter Berücksichtigung und Abschätzung der in *Abbildung 62* aufgezeigten Faktoren durchzuführen. Zielsetzung ist die Bestimmung des notwendigen, durch den Vakuumerzeuger zu erbringenden Differenzdrucks Δp_{ERZ} sowie des resultierenden Volumenstroms. Bei der Berechnung des notwendigen Differenzdrucks kann auf die Modellvorstellung aus *Abschnitt 3.5.3* und die erarbeiteten Gleichungen zurückgegriffen werden. So resultiert aus *Gl. 3–10* und *Gl. 3–11* sowie dem *Öffnungsverhältnis*

$f = \frac{A_G}{A_T}$ folgender Zusammenhang für Δp_{ERZ} (vgl. *Gl. 4–9*):

$$\Delta p_{ERZ} = \Delta p_B + \Delta p_{V,HS} = S \cdot \Delta p + \Delta p_{V,HS} = \frac{S \cdot G \cdot g}{f} + \Delta p_{V,HS} \quad (4-9)$$

Das Öffnungsverhältnis wird durch die Wahl der Öffnungskonfiguration festgelegt und setzt sich aus der *Anzahl der geöffneten Bohrungen* n und dem gewählten *Durchmesser* d gegenüber der *Zuschnittsfläche* A_T zusammen (vgl. *Gl. 4–10*). Im ungünstigsten Fall wird die gesamte *Greiferfläche* A_{HS} von einem Zuschnitt bedeckt, so dass alle Bohrungen geöffnet werden müssen. Dies hat zwar keine Auswirkungen auf den benötigten Differenzdruck, da bei gleichverteilten Öffnungen auch n steigt, erhöht jedoch den resultierenden Volumenstrom.

$$\Delta p_{ERZ} = \frac{S \cdot G \cdot g \cdot A_T}{A_G} + \Delta p_{V,HS} = \frac{4 \cdot S \cdot G \cdot g \cdot A_T}{n \cdot d^2 \cdot \pi} + \Delta p_{V,HS} = \frac{4 \cdot S \cdot G \cdot g \cdot A_{HS}}{n_{MAX} \cdot d^2 \cdot \pi} + \Delta p_{V,HS} \quad (4-10)$$

Der zu erwartende *Druckverlust im Gesamtsystem* $\Delta p_{V,HS}$ kann lediglich auf Basis der *Druckverluste an der Abschlussplatte* $\Delta p_{V,AP}$ (vgl. *Gl. 4–8*) und einer Abschätzung der *Verluste im Restsystem* $\Delta p_{V,SYS}$ (z. B. Verschlussaktorik, Vakuumkammer, Leitungen) ermittelt werden (vgl. *Gl. 4–11*):

$$\Delta p_{V,HS} = \Delta p_{V,AP} + \Delta p_{V,SYS} = (\zeta_E + \zeta_A) \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot \dot{V}_n^2}{\pi^2 \cdot d^4} + \frac{128 \cdot l \cdot \eta \cdot \dot{V}_n}{\pi \cdot d^4} + \Delta p_{V,SYS} \quad (4-11)$$

Aus *Gl. 3–14* folgt weitergehend der Zusammenhang für die Berechnung des resultierenden Volumenstroms (vgl. *Gl. 4–12*):

$$\dot{V}_{ERZ} = \frac{1}{200 \text{ Pa}} \cdot R_{200Pa} \cdot S \cdot G \cdot g \cdot A_{HS} \quad (4-12)$$

Die Anwendung der Gleichungen auf das Referenzszenario unter Annahme bestimmter Gestaltungsgrößen und Systemverluste liefert für den Sicherheitsfaktor $S=10$ die in *Tabelle 23* im Anhang aufgezeigten Werte. Diese Höhe des Sicherheitsfaktors erzeugt Handhabungsdifferenzdrücke, welche eine hohe Greifsicherheit gewährleisten, was durch experimentelle Untersuchungen mit Hilfe der in *Abbildung 136* im Anhang ersichtlichen Anordnung nachgewiesen werden kann. Es ergeben sich für das Gesamtsystem ein maximal zu erzeugender Differenzdruck von 6,9 mbar ($0^\circ/90^\circ$ -Gelege) und ein maximal auftretender Volumenstrom von $582 \text{ m}^3/\text{h}$ (Gewebe). Die erfolgte Auslegung legt hierbei den Transportfall des Referenzprozesses zugrunde, in welchem lediglich die Gewichts- und Trägheitskräfte durch die Haltekraft kompensiert werden müssen. Beim Abheben des Zuschnitts vom Schneidtisch führen auftretende Verhakungen an den Schnittkanten zwischen dem Greifgut und der Unterlage sowie dem umgebenden Material zu einer Erhöhung der notwendigen Haltekraft (SPIEGELMACHER 1991). Die Höhe der Verhakungskräfte hängt dabei von einer Vielzahl an unterschiedlichen Faktoren ab und wird in *Abschnitt 5.4.4* genauer untersucht. Vorversuche im Umfeld des Referenzszenarios ergeben notwendige Differenzdrücke Δp_{ERZ} am Erzeuger von bis zu 25 mbar (0,025 bar).

Die Auswahl eines passenden Erzeugers hinsichtlich der aufgezeigten Untersuchungen ist weitergehend auf Basis der Konzeption des Vakuumsystems durchzuführen. In *Abschnitt 4.3.4* wird hierzu für das Referenzszenario eine Modularisierung des Systems ausgewählt, wodurch eine dezentrale Erzeugung und Regelung des Differenzdrucks je Modul als präferierte Variante zu sehen ist. Für die Höhe des notwendigen Differenzdrucks ergibt diese Parallelschaltung in Anlehnung an *Gl. 4-1* keine Veränderung, während sich der Volumenstrom proportional zur Anzahl der Module verändert (vgl. *Gl. 4-2*). *Abbildung 64* zeigt den ermittelten Transport- (700 Pa) und Abhebedifferenzdruck (2500 Pa) im Verhältnis zu den typischen Kennlinien der Erzeugervarianten auf. Lediglich Radialventilatoren lösen die Anforderungen (ca. 0,25 bar, $1500 \text{ m}^3/\text{h}$) zufriedenstellend, da Vakuumpumpen, Ejektoren und Vakuumgebläse zu hohe Unterdruckfähigkeit bei zu niedrigem Förderverhalten aufweisen.

4.3 Konzeption der Einzelmodule

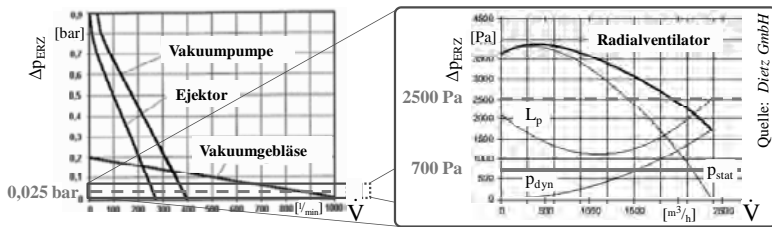


Abbildung 64: Auswahl eines Erzeugertyps auf Basis des Vakuumbedarfs

4.3.6 Steuerungs- und Sensorsystem

Aufgaben, Anforderungen und Systemstrukturierung

Einen maßgeblichen Anteil an der Realisierung eines hochflexiblen Greifsystems hat das Steuerungs- und Sensorsystem, da hinsichtlich der in *Abschnitt 2.2.4* aufgezeigten Flexibilisierungsansätze eine automatisierte Anpassungsfähigkeit durch datenbasierte Parametrierung (Greiffläche, Höhe der Greifkraft) nur durch die entsprechende funktionale Auslegung dieses Moduls zu erreichen ist. Das Steuerungs- und Sensorsystem ist daher als Schnittstelle zu einer übergeordneten Softwareinstanz zu konfigurieren, welche die Vernetzung zu den anderen Komponenten des gesamten Fertigungssystems vornimmt und letztlich auch mit einem entsprechenden Produktionsplanungssystem (PPS) bzw. einer Benutzerschnittstelle (Graphical-User-Interface – GUI, Human-Machine-Interface – HMI) zu verknüpfen ist (vgl. *Abbildung 65*).

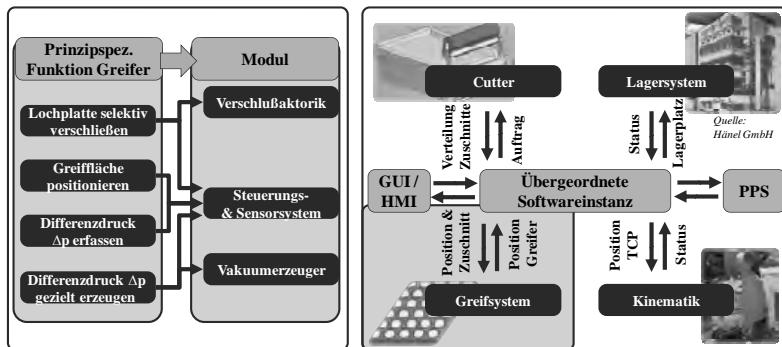


Abbildung 65: Interne (links) und externe (rechts) Vernetzung des Steuerungs- und Sensorsystems sowie spezifische Funktionen (links)

Zusammenfassend lassen sich aufgrund der in *Abbildung 65* aufgezeigten externen sowie internen Vernetzung und der zu erfüllenden Funktionen folgende Aufgaben für das Steuerungs- und Sensorsystem ableiten:

- Verarbeitung von Zuschnittsdaten wie Ist- und Soll-Position, Kontur und Materialparameter und Kommunikation mit übergeordneter Software (Statusmeldungen)
- Bestimmung der optimalen Greiferposition und -orientierung
- Berechnung zu schließender Bohrungen und Aktivierung der Verschlussaktorik zur automatisierten Einstellung der Saug- bzw. Greiffläche
- Erfassen des Differenzdrucks Δp_i
- Regelung von Δp_i durch gezielte Ansteuerung des Vakuumerzeugers
- Detektion und Anzeige von Prozessstörungen (z. B. nicht-gegriffener Zuschnitt, freiliegende Bohrung(en) durch abgeklappten Zuschnitt)

Die Anforderungen an das Steuerungs- und Sensorsystem lassen sich wie folgt in die übergeordnete Bereiche strukturieren:

- *Leistungsfähigkeit:* Geringe Schaltzeit der Aktoren, präzise Bestimmung des Differenzdrucks in jedem Teil des modularisierten Vakuumsystems und Regelung der dezentralen Vakuumerzeuger
- *Anwendbarkeit:* Ansteuerung der gesamten Verschlussaktorik, geringer Verkabelungsaufwand, robuste sowie austauschbare Ausführung
- *Wirtschaftlichkeit:* Geringe Leistungsversorgung und Investitionskosten
- *Systemeigenschaften:* Geringes Gewicht und wenig Platzbedarf

Auf Basis der erarbeiteten Funktionen ist folglich eine domänenspezifische Unterteilung des Systems nach VDI-Richtlinie 2206 vorzunehmen (VDI 2006), wobei die verschiedenen Hierarchieebenen der Automatisierungstechnik nach LUNZE (2008) berücksichtigt werden. *Abbildung 66* zeigt die grundlegende Systemgrenze und -struktur, durch welche die gewünschte hohe Flexibilität in Form einer automatischen, datenbasierten Prozesssteuerung erreicht wird.

Von der übergeordneten Softwareinstanz werden die Auftragsdaten in Form von Informationen über die zu handhabenden Zuschnitte geliefert. Dies betrifft geometrische Informationen wie Position, Kontur sowie Orientierung, welche im Falle des Absortierens vom Schneidsystem bzw. einer Nestingsoftware erzeugt werden. Aber auch die entsprechenden Materialdaten wie Flächenmasse, Biegesteifigkeit, Luftdurchlässigkeit oder Faserorientierung sind zu übertragen und einzulesen. Weitergehend sind Statusmeldungen (z. B. Start-Stopp, Bereit,

4.3 Konzeption der Einzelmodule

Fehler) zwischen den Systemen auszutauschen, um den Greifprozess mit anderen Systemen zu synchronisieren.

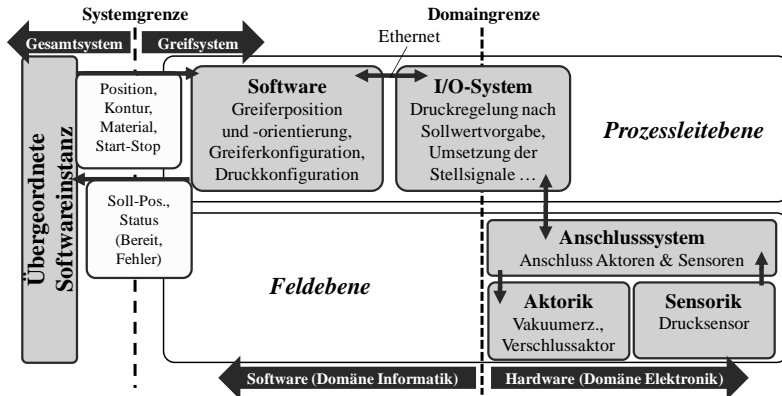


Abbildung 66: Domänenspezifische und hierarchische Strukturierung des Steuerungs- und Sensorsystems

Im Sinne einer kompetenzspezifischen Aufteilung und einer möglichst hohen Modularität des Gesamtsystems verfügt das Steuerungs- und Sensorsystem über eine eigene Prozesselebene, bestehend aus einer Softwarekomponente und einem I/O-System, welches mit dem hardwarebasierten Anschlussystem auf Feldebene verbunden ist.

Die Softwarekomponente errechnet auf Basis der Eingangswerte eine spezifische Systemkonfiguration für einen bestimmten Prozessschritt und wird in *Abschnitt 4.6* detailliert. Sie besteht aus:

- *Greiferposition und -orientierung* (Optimale Positionierung)
- *Greifkonfiguration* in Form eines Öffnungsmusters der einzelne Bohrungen (Definition der Greiffläche durch Ausdehnung der Haltekraft)
- *Druckkonfiguration* als Sollwertvorgabe für den modulspezifischen Differenzdruck Δp_i (Definition der Höhe der Haltekraft)

Die Verbindung zwischen der Softwarekomponente und dem Anschlussystem wird durch ein I/O-System auf Prozesselebene hergestellt. Hier werden Sensordaten verarbeitet und Aktorstellsignale ausgegeben. Desweiteren sind Regelkreise für die richtige Einstellung der Druckkonfiguration zu hinterlegen. Das Anschlussmodul schafft die physikalischen Ein- und Ausgänge zum Anschluss der Aktoren und Sensoren. Im Falle des zu realisierenden Konzepts eines hochauflösend selektiv greifenden NFS kommt dieser Komponente eine hohe

Bedeutung zu, da die Anzahl der Verschlussaktoren extrem hoch ist (4320 im Anwendungsszenario).

Lösungsvarianten für das Steuerungs- und Sensorsystem:

Da die Auswahl der Sensorik in Form von Differenzdruckaufnehmern lediglich eine technisch-wirtschaftliche Auslegung darstellt und sowohl der Druckbereich als auch die Einsatzbedingungen keine besonderen Anforderungen an die am Markt vielfach verfügbaren Aufnehmer stellen, wird diese nicht näher betrachtet. Die im Prototyp eingesetzte Sensorik wird im *Abschnitt 4.6.3* erläutert.

Anschlussystem: Zur Gestaltung des Anschlussystems existieren aufgrund der erheblichen Anzahl an Aktoren drei grundsätzliche Varianten. Zum einen ist eine *singuläre Anbindung* der Aktoren (Magnete) denkbar. Dies würde zwar durch parallele Signale zu äußerst kurzen Schaltzeiten für den gesamten Greifer führen, birgt aber einen erheblichen Verkabelungsaufwand und bedingt zudem eine der Aktoranzahl entsprechende Vielzahl an Ausgängen des I/O-Moduls. Die Tatsache, dass die Verschlussaktoren durch die regelmäßige geometrische Anordnung der Bohrungen in Zeilen und Spalten strukturiert sind, legt zum anderen eine Matrixschaltung nahe, in der durch Zeilen- und Spaltensignale die Aktoren an den Schnittstellen geschaltet werden können (vgl. *Abbildung 67*). Im Allgemeinen lässt sich durch die Anwendung dieser Variante die Anzahl an notwendigen Anschlüssen des I/O-Moduls stark reduzieren.

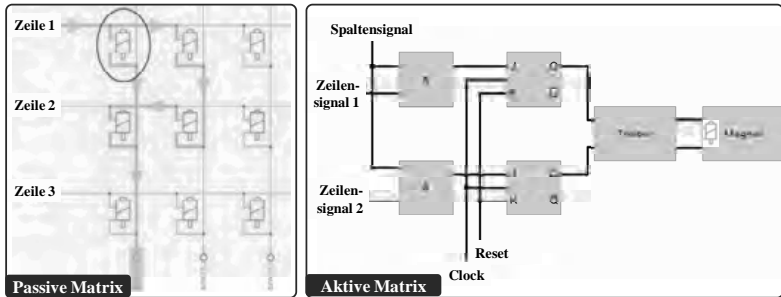


Abbildung 67: Konzepte einer passiven und aktiven Matrix zur effizienten Gestaltung des Anschlussmoduls (EHINGER ET AL. 2010)

Die einfachste Form dieser Strategie ist die *passive Matrix*, bei der lediglich die notwendige Spannung an die zu schaltende Leitung angelegt wird. Dies führt jedoch innerhalb der Matrix zu Kreisströmen (*Abbildung 67*, links), die durch entsprechende elektronische Bauelemente (Dioden) zu vermeiden sind. Benötigen Aktoren, wie bistabile Hubmagneten umpolbare Spannungsimpulse

(vgl. *Abbildung 55*), so erhöhen Bauelemente wie beispielsweise elektromechanische Relais den Schaltungsaufwand zusätzlich. Durch die Anwendung eines Zeitmultiplex-Verfahrens können mehrere Aktoren einer Zeile parallel geschaltet werden.

Nach MELCHER (1997) existiert in Anlehnung an die Technik in Projektions-Displays wie LCD-Bildschirmen die Alternative einer *aktiven Matrix* als Anschlussmodul (EHINGER ET AL. 2010). Dieses Konzept greift das Prinzip der Knotenpunkte auf, die einzelnen Elemente sind jedoch in der Lage, ihren Zustand zu speichern. Dadurch wird nicht nur eine parallele Schaltung mehrerer Aktoren möglich, sondern es lässt sich auch der Leistungsaufwand in den Zeilen- und Spaltensignalen reduzieren, da diese nun von den entsprechenden Treiberstufen zur Verfügung gestellt werden. Die kostenintensiven Anschlüsse des I/O-Moduls können somit schlanker dimensioniert werden. Angesichts der großen Anzahl an Aktoren wird das Konzept der *aktiven Matrix* für das Referenzszenario ausgewählt und weiterverfolgt, da sich dadurch der kleinste Verkabelungs- und Anschlussaufwand ergibt. Zudem kann die vorzuhaltende Maximalleistung reduziert werden (vgl. *Abbildung 141; Anhang*). Letztlich ist das Anschlussmodul auf dieser Basis als Flachbaugruppe zu realisieren und in die Module des Greifers zu integrieren (vgl. *Abschnitt 4.6.3*).

I/O-System: Der Bereich möglicher I/O-Systeme für den Einsatz als Bindeglied zwischen Software und Anschlusssystem in einem Greifsystem stellt sich aufgrund der Fülle an technischen Varianten und herstellerspezifischen Differenzierungen äußerst heterogen dar. Zu unterscheiden sind vier prinzipielle Varianten (vgl. *Tabelle 4*):

4 Konzeption und Umsetzung eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems

Tabelle 4: Bewertung möglicher Lösungsvarianten für das I/O-System in einem flexiblen Greifsystem

Lösung	Vorteile	Nachteile	Einsatzfeld und -bereitschaft
Industrie PC Anschluss von Mess- und Steuerkarten an Personal Computer (PC)	•kostengünstig	•geringe Zuverlässigkeit •Portierbarkeit der Systeme durch proprietäre Treiberentwicklung	•vielfältiger Einsatz in unterschiedlichsten industriellen Anwendungen
SPS (Speicher-Programmierbare-Steuerung) Nachfolger festverdrahteter Relais-Steuerungen	•weite Industrie-verbreitung •angepasste Lösungen •hohe Zuverlässigkeit •robuste Anwendung	•geringe Rechenleistung •geringe Flexibilität •lediglich zyklischer Programmablauf	•Bestehendes, breites industrielles Einsatzspektrum zur vertikalen Kommunikation zwischen Automatisierungsebenen (GEVATTER ET AL. 2006)
PC basierte SPS Slot-SPS als Einsteckkarten für den PC oder Soft-SPS als softwarebasierte Nachbildung einer SPS (SEITZ 2008)	•höhere Verarbeitungsleistung als SPS •vereinfachte vertikale Kommunikation •Flexibilität	•eingeschränkte Echtzeitfähigkeit •industrielle Einsetzbarkeit (z.B. Staubschutz) fraglich	•oftmals Einsatz als flexible Entwicklungsplattform in F&E oder der Lehre
PAC-System (Programmable Automation Controller) verbindet Zuverlässigkeit der SPS mit Rechenleistung eines PC (BELL 2005)	•genormte Schnittstellen •Flexibilität durch offene, modulare Architektur •hohe Rechenleistung	•komplexe Systeme •kostenintensiv	•Anwendungen in denen Funktionalitäten mehrerer Bereiche (z.B. Logik, Regelkreise) benötigt werden und die Ablaufsteuerung eine wichtige Position einnimmt

Da die Anforderungen auf Basis der in *Abbildung 66* aufgezeigten Unterteilung des Steuerungs- und Sensorsystems speziell von Verarbeitungsgeschwindigkeit, Flexibilität und bereichsübergreifenden Funktionalitäten wie Logikverarbeitung und parallelen Regelungsabläufen dominiert werden, empfiehlt sich der Einsatz eines PAC-Systems (*Programmable Automation Controller*). Die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten werden durch die hohe Zuverlässigkeit und Rechenleistung kompensiert (vgl. *Abbildung 68*; EHINGER ET AL. 2010).

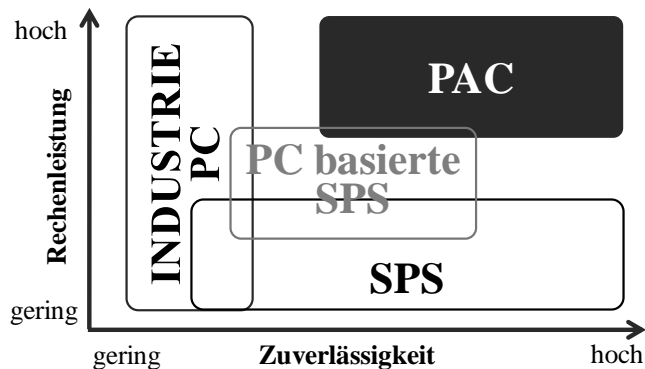


Abbildung 68: Vergleich möglicher Ansätze hinsichtlich Rechenleistung und Zuverlässigkeit (EHINGER ET AL. 2010, Anlehnung an BELL 2005)

4.3.7 Auswahl eines Trägersystems

Das Trägersystem des Greifers ist in Anlehnung an HESSE ET AL. (2004) sowie der VDI-Richtlinie 2740 (VDI 1995) als eigenständiges Modul konzipiert und hängt insbesondere von den Konzeptionsentscheidungen der anderen Module ab. In hohem Maße bestimmt dabei die Wahl des Vakuumsystems (integral, modular) die Anforderungen an die Ausprägung. Auf der Basis einer funktionalen Betrachtung lassen sich diesem Subsystem folgende Aufgaben zuordnen:

- *Tragstruktur*: Mechanische Aufnahme der Subsysteme und ggf. der Einzel-Module des Greifsystems
- *Kinematikanbindung*: Mechanische, elektrische und medientechnische Anbindung des Greifers an die Kinematikeinheit (z. B. Industrieroboter)

Während die Kinematikanbindung vorzugsweise als kommerziell erhältliches Schnellwechselsystem gestaltet wird, kann die Tragstruktur prinzipiell als *Rahmen-* oder *selbsttragende Leichtbauweise* ausgeführt werden, wobei beide Varianten aus *Standardhalbzeugen* sowie aus speziellen *beanspruchungsgerechten Komponenten* erzeugt werden können (vgl. Abbildung 69).

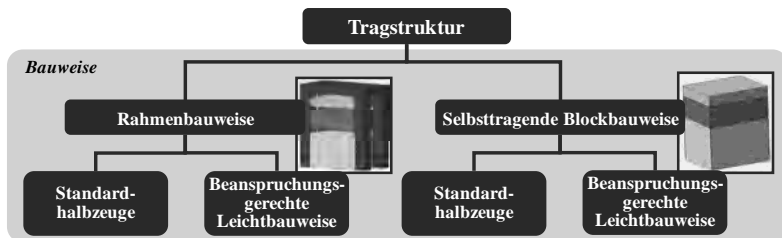


Abbildung 69: Lösungsvarianten zur Gestaltung der Tragstruktur

Die Anforderungen an das Trägersystem beziehen sich vorwiegend auf eine gewichtsoptimierte Struktur mit ausreichend hoher Steifigkeit, um trotz der großen Flächenausdehnung des Greifers die für den Prozess notwendige Planarität gewährleisten zu können. Aufgrund eines modularisierten Vakuumsystems gilt es, die Gestaltungsentscheidung sowohl für den Gesamtaufbau als auch für einzelne Module zu treffen. Während sich zur Aufnahme der Module die Rahmenbauweise aus Standardhalbzeugen (z. B. Profilen) empfiehlt, sollten die einzelnen Module als beanspruchungsgerecht ausgelegte Blockbauweise ausgeführt werden, um die vielfältigen Komponenten (Wirksystem, Steuerungs- und Sensorsystem, Antriebssystem) trotz beengtem Bauraum integrieren zu können. Die Schnittstellen zwischen Kinematik, Gesamtsystem und Modul sind möglichst

einfach zu gestalten, um im Sinne hoher Flexibilität eine aufwandsarme Austauschbarkeit zu gewährleisten.

4.3.8 Konzeption eines integrierten Schutzsystems

Die vorliegende Konzeption des Sicherheits- und Schutzsystems fokussiert sich auf die beiden Teilbereiche *Schutz der Greiferkomponenten* und des *Greifguts*. Weiterführende Betrachtungsräume wie die Umgebung oder der Bediener sind sehr stark anwendungsspezifisch und werden daher ausgeklammert. Zunächst ist im Rahmen der Konzeption des Schutzsystems eine Gefährdungsanalyse durchzuführen, in welcher mögliche Beeinträchtigungen, Fehlfunktionen oder abzuschernde Betriebszustände zu analysieren sind. *Tabelle 5* zeigt eine dementprechende Analyse für das unterdruckbasierte Handhaben von technischen Textilien.

Tabelle 5: Gefährdungen und Lösungsansätze zum Schutz von System & Greifgut

Schutz der Greiferkomponenten		Schutz des Greifguts	
Gefährdung	Lösungsansätze	Gefährdung	Lösungsansatz
Faserstaub-kontaminierte Luft Schneidprozesse an technischen Textilien führen zu Verunreinigungen (z. T. leitende Partikel & Faserfragmente) die der Volumenstrom in den Greifer einbringt	Schutz elektromechanischer Komponenten (Verschlussaktuatorik, Steuerungssystem) •Einsatz von Filtermaterialien •Abschirmung durch Reinraumprinzip	Zu hoher Unterdruck Durch Vakuumerzeuger induzierter Unterdruck ist zu hoch und beschädigt Greifgut durch Einsaugen einzelner Fasern oder durch Beulenbildung an den Öffnungen	Druckregulierung Regelung des Unterdrucks
Zu hoher Unterdruck Durch Vakuumerzeuger induzierter Unterdruck ist zu hoch und beschädigt das Vakuumsystem (z. B. vollst. Verschluss der Abschlussplatte)	Druckregulierung •Einsatz von überdruckregulierenden Komponenten •Regelung des Unterdrucks	- -	- -

Als Ergebnis der Gefährdungsanalyse ergibt sich die in *Abbildung 70* aufgezeigte Möglichkeit, durch Nutzung vorhandener Komponenten ein integriertes Schutzsystem auf Basis eines Reinraums zu konzipieren (STRAßER 2010B).

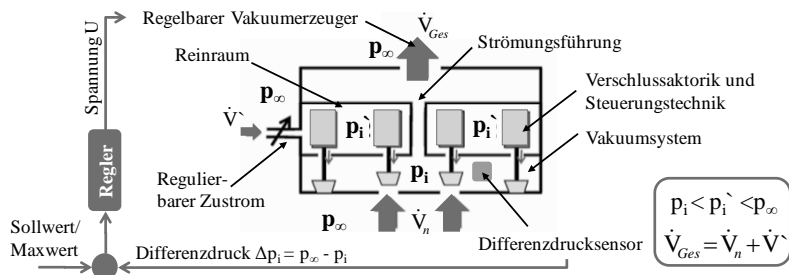


Abbildung 70: Schematisches Konzept des integrierten Schutzsystems

Die beiden angewendeten Aspekte sind die gezielte Erzeugung eines Überdrucks ($p_i' - p_i > 0$) gegenüber dem kontaminierten Volumenstrom in Bereichen empfindlicher Komponenten (Ansatz: Gestaltung Vakuumsystem) sowie die Regelung des Vakuumerzeugers auf Basis des gemessenen Systemdrucks p_i (Ansatz: Regelung durch Steuerungssystem).

Die Funktion des Schutzsystems wird in diesem Entwicklungsschritt durch eine begleitende Strömungssimulation auf Basis der FEM überprüft (vgl. Abbildung 71). Es kann somit nachgewiesen werden, dass im Reinraum ein geringeres Vakuum und damit ein Überdruck gegenüber dem Vakuumsystem herrscht. Die Auswertung der Strömungsrichtungen zeigt, dass keinerlei Wirbel den partiellen Kontaminationseintrag begünstigen.

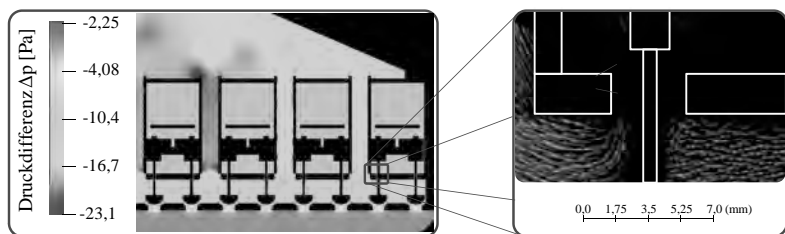


Abbildung 71: Strömungssimulation zur Absicherung des Schutzsystems: Visualisierung des Differenzdrucks (links) und der Strömungsrichtung (rechts) (STRAßER 2010B)

Die aufgezeigte Modellierung des Strömungssystems bildet eine umfassende entwicklungsbegleitende Möglichkeit zur Absicherung des Konzepts, kann aber an dieser Stelle nicht ausführlich beschrieben werden ohne den Rahmen der Arbeit zu sprengen (vgl. auch STRAßER 2010B).

4.4 Gesamtkonzept eines Greifsystems

4.4.1 Konzept eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems zur Handhabung technischer Textilien

Das Konzept eines hochflexiblen Greifsystems setzt sich aus der beschriebenen Gestaltung der einzelnen Teilmodule zusammen. Diese Lösungen sind nun in ein konsistentes Gesamtkonzept einzubringen (vgl. *Abbildung 72*). Das chronologische Vorgehen nach der funktionspezifischen Modularisierung (vgl. *Abbildung 52* und *Abbildung 53*) steigert die Affinität der Teillösungen, so dass eine Rekursion aufgrund unverträglicher Ansätze nur in Ausnahmefällen notwendig ist.

Die Tatsache, dass es sich bei dem zu erforschenden Greifsystem um ein mechatronisches System handelt, fordert die Berücksichtigung verschiedener Konzeptions-Ebenen, wodurch im Folgenden, basierend auf dem aufgezeigten Gesamtkonzept, sowohl die Mechanik als auch die Steuerungstechnik (Software und Hardware) betrachtet werden (vgl. *Abschnitt 4.6*).

Subsysteme nach VDI 2740	Subsystem/Modul	Lösung
Wirkssystem	Verschlussfaktorik	Bistabiler Hubmagnet und Pfropfen
Wirkssystem	Abschlussplatte	Integrale Platte Quadratisches Muster, Abstand 25mm; Ø 8mm
Steuerungssystem	Steuerungs- & Sensorsystem	Anschlußsystem: Aktive Matrix I/O-Sys.: PAC-System
Sensorsystem		
Antriebssystem	Vakuumzeuger	Dezentraler Radial-Ventilator
Wirkssystem	Vakuumsystem	Modulare Vakuunkammer
Trägersystem	Trägersystem/ Roboteranbindung	Rahmenbauweise Standardhalbzeuge Schnellwechselsystem
Schutzsystem	Schutzsystem (integriert)	Reinraumprinzip Druckregelung

Abbildung 72: Gesamtkonzept des Greifsystems anhand der ausgewählten Einzellösungen für das Referenzszenario

Die Berücksichtigung von hoher Flexibilität bei gleichzeitig geringem Anpassungsaufwand geht über die Konzeptionsphase der Einzelmodule hinaus und hat auch Auswirkungen auf das Gesamtkonzept. Folgende Prämissen gilt es deshalb zur Realisierung eines hochflexiblen Greifsystems anzuwenden:

- *mechanische Modularität*: Die Unterteilung des Vakuumsystems sowie die Auswahl dezentraler Unterdruckerzeuger legt gleichartige Greifermodule nahe, welche die gesamte Greiffläche abbilden, über einen identischen Aufbau verfügen und somit gegeneinander austauschbar sind. Die Montage der Einheiten an den Rahmenaufbau ist möglichst einfach und werkzeuglos zu gestalten. Während für das Anwendungsszenario identische Module angestrebt werden, können bei anderen Umsetzungen durchaus Zellen mit höherer oder niedrigerer Auflösung kombiniert werden, um beispielsweise einen hochauflösenden Greiferbereich zu schaffen.
- *steuerungstechnische Modularität*: Die einzelnen Greifermodule verfügen über ein eigenes Anschlussystem auf Feldebene und sind mit wenigen Anschlüssen an ein zentrales I/O-System anzubinden, um den Verkabelungsaufwand trotz hoher Aktoranzahlen minimal zu halten. Die Integration und Konfiguration der Einzelzellen in die Greifersoftware erfolgt auf Basis von Identitätsdaten automatisiert. Die Regelung des Unterdrucks ist modulspezifisch ausgeführt.

4.4.2 System- und Prozessmodellierung zur Auslegung von Spezifikationsgrößen und Prozessparametern

Die Flexibilitätsanforderung an das zu erforschende Greifsystem bezieht sich auf die automatisierte Anpassungsfähigkeit an ein breites Spektrum unterschiedlicher Materialien, Produkte (Zuschnittsgeometrien) und Prozessanforderungen (Zuschnittsposition) (vgl. *Abbildung 33*). Während die vorgestellte methodische Konzeption darauf ausgerichtet ist, dem Entwickler das entsprechende Vorgehen zur Auslegung bzw. Spezifikation des unterdruckbasierten Systems zur Verfügung zu stellen, wird die automatisierte Adaptionfähigkeit durch zwei grundlegende Ansätze erreicht:

- Zum einen müssen relevante Parameter wie Greiffläche und Haltekraft von der Spezifikations- in die Prozessebene transferiert und somit von initialen Auslegungsdaten in prozessspezifische Konfigurationsdaten überführt werden. Das System wird somit rekonfigurationsfähig.
- Zum anderen ist das System steuerungstechnisch so zu konzipieren, dass die Rekonfiguration automatisiert erfolgt, um den Adaptionaufwand zu beschränken. Hierzu sind entsprechende Algorithmen zu hinterlegen und Regelkreise aufzubauen.

Abstraktes Systemmodell

Zusammenfassend können die relevanten Parameter in einem umfassenden, abstrakten Systemmodell dargestellt werden, welches die Abhängigkeiten von spezifischen Eingangsgrößen und resultierenden Spezifikations-, Konfigurations- und Ausgangsgrößen darstellt (vgl. *Abbildung 73*). Hierbei beeinflussen die in der Anforderungsanalyse erarbeiteten Eingangsgrößen sowohl die Auslegungsdaten (Spezifikations-Ebene) des unterdruckbasierten Greifsystems, als auch die für einen spezifischen Prozessschritt notwendigen Konfigurationsdaten (Prozess-Ebene – Soll). Diese sind zur Erfüllung der Greifaufgabe in Prozessparameter zu überführen (Ausgangsgrößen – Ist). Beispielsweise ergibt sich nach der Vorgabe des Soll-Differenzdrucks Δp eine Erzeugerspannung U_{ERZ} sowie ein bestimmter Volumenstrom \dot{V} für die einzelnen Prozessphasen (1, 2, 3). Die Vorgabe der Position und Orientierung führt zur erforderlichen TCP-Einstellung am Greifsystem, welche mit der Roboterbeschleunigung a verändert wird. Die einzustellende Greiffläche wird in geöffnete Bohrungen überführt.

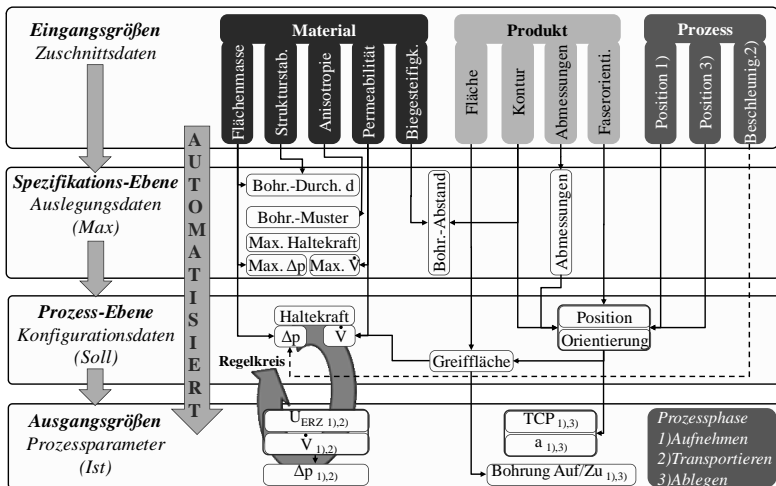


Abbildung 73: Spezifikations- und Prozessgrößenmodell für hochflexible, unterdruckbasierte Greifsysteme zur Handhabung technischer Textilien

Prozessphasen und -schritte

Aufgrund der Komplexität des Gesamtprozesses und der unterschiedlichen physikalischen Verhältnisse werden auf Basis der bereits analysierten Teilprozesse und Grundfunktionen (vgl. *Abschnitt 2.2.2*, *Abbildung 8* und *Abschnitt 3.3*, *Abbildung 28*) einzelne Prozessphasen abgeleitet, die im Folgenden singulär

4.4 Gesamtkonzept eines Greifsystems

experimentell untersucht werden können. *Abbildung 74* zeigt die dementsprechende Strukturierung des Gesamtvorgangs.

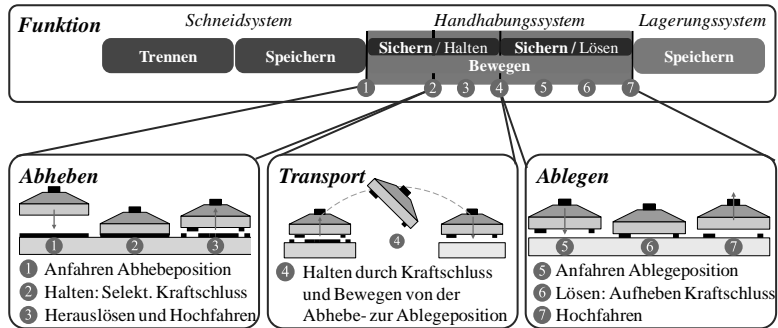


Abbildung 74: Einteilung des Absortiervorgangs in Prozessphasen und -schritte

Nach dem Schneidprozess liegen die zu vereinzelnden Textilien im Absortierbereich des Cutters vor (*geordnetes Speichern*) und es erfolgt mit dem *Abheben* eines (oder mehrerer) Zuschnitts die erste relevante Prozessphase (Nr. 1-3, vgl. *Abbildung 74*). Durch das vom Kinematiksystem positionierte Greifsystem (1) wird selektiv ein Kraftschluss erzeugt (2), welcher durch Überlagerung einer Translation normal zur Unterlage ein Herauslösen des Greifguts bewirkt (3). Während der Transportphase wird die Haltekraft aufrechterhalten und so das Greifgut von der Aufnahme- zur Ablageposition bewegt (4), die zu Beginn der Ablegephase angefahren wird (5). Durch das Aufheben des Kraftschlusses wird ein Lösen des Greifguts vom Greifsystem erreicht (6) und dieses abschließend wegbewegt (7).

Prozessgrößen- und Ersatzmodell der einzelnen Phasen

Im Folgenden werden einzelne, die Prozessphasen beschreibende Modellvorstellungen entwickelt, die einen Überblick über auftretende Prozessgrößen und physikalische Zustände zulassen sowie die Grundlage für die Erfassung der kausalen Zusammenhänge bei der Durchführung und Auswertung der Experimente bilden. *Abbildung 75* zeigt dies für die beiden Phasen Abheben und Ablegen auf, wobei jeweils unterschiedliche Kräfte auf das zu greifende Textil der Masse m_T wirken. Beim Abheben ist die relevante Prozesssituation im Moment des Ablösens im leicht angehobenen Zustand zu sehen. Die durch den *Druckabfall* Δp_T am Textil erzeugte *Haltekraft* F_H wirkt hierbei der *Gewichtskraft des Textils* G und der aus Verhakungen mit der Unterlage und dem umgebenden Material (Rest-Textil: Verschnitt und andere Zuschnitte) resultierenden *Verhakungskraft* F_V entgegen (vgl. auch *Abbildung 97* und SPIEGELMACHER 1991). Im Falle einer parallelen

4 Konzeption und Umsetzung eines hochflexiblen, unterdruckbasierten Greifsystems

Bewegung (*Beschleunigung a*) des Textils orthogonal zu dessen Flächenebene wirkt die Haltekraft zudem gegen die *Trägheitskraft F_T* . Zu einem erfolgreichen Abhebeprozess muss F_H die anderen Kraftkomponenten in ihren Beträgen übersteigen (vgl. Gl. 4–12).

$$F_H \geq G + F_V + F_T = m_T \cdot (g + a) + F_V \quad (4-12)$$

Im Falle des Ablegens setzt der Greifer das Textil auf die Unterlage auf, wodurch im idealisierten Zustand die Gewichtskraft des Textils kompensiert wird. Die Prozessdrücke unterscheiden sich für diese beiden Phasen nicht. Der Volumenstrom \dot{V} durchtritt unter Vernachlässigung der Quereinströmung vollständig die Unterlage (Δp_U), das Textil (Δp_T) und die Abschlussplatte (Druckverlust Δp_P), wobei die jeweiligen Druckabfälle erzeugt werden (vgl. Gl. 4–13).

$$p_i - p_\infty = \Delta p_i = \Delta p_U + \Delta p_T + \Delta p_P \quad (4-13)$$

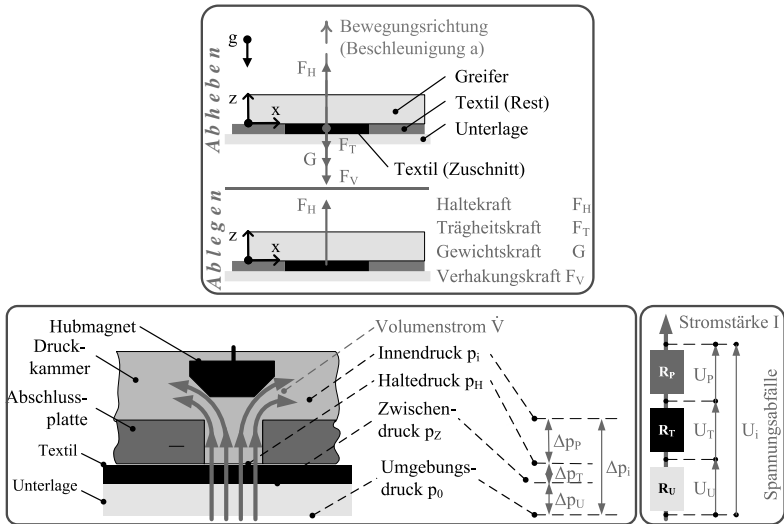


Abbildung 75: Modelle für die Abhebe- und Ablegephase: Kräfte (oben), Prozessdrücke (links) und elektrisches Ersatzmodell (rechts)

Anhand der dargestellten Abhängigkeiten (vgl. Gl. 4–13) kann ein entsprechendes elektrisches Ersatzmodell eingeführt werden, in welchem die luftdurchströmten Teilsysteme als stromdurchflossene Ohmsche-Widerstände abgebildet werden können. Dem zur Folge entspricht die Luftdurchlässigkeit bzw. der Strömungswiderstand eines Materials oder Teilbereichs dem elektrischen Widerstand, während die entstehenden Druckdifferenzen den abfallenden

4.4 Gesamtkonzept eines Greifsystems

Spannungen (U_U , U_T , U_P) gleichgesetzt werden. Die Regeln der Elektrotechnik nach Kirchhoff zur Summation von Spannungsabfällen bzw. Druckabfällen, Widerständen (bzw. Strömungswiderständen) bei Reihenschaltung und von Stromstärken (bzw. Volumenströmen) bei Parallelschaltung (bspw. mehrere Bohrungen in einer Platte) können daher übernommen werden (HAGMANN 2008). Auch Fehlluftströmungen durch Undichtigkeiten oder der über den Reinraum einströmende Volumenstrom bilden derartige Parallelschaltungen.

Die Beschreibung der Transportphase ergibt leicht veränderte Kräfteverhältnisse (vgl. *Abbildung 76*). Das Textil wird hierbei durch die *Haltekraft* F_H am Greifer gehalten, während weitergehend die *Gewichtskraft* G sowie bewegungsrichtungs- und beschleunigungsabhängige *Trägheits-* F_T und *Reibungskräfte* F_R wirken.

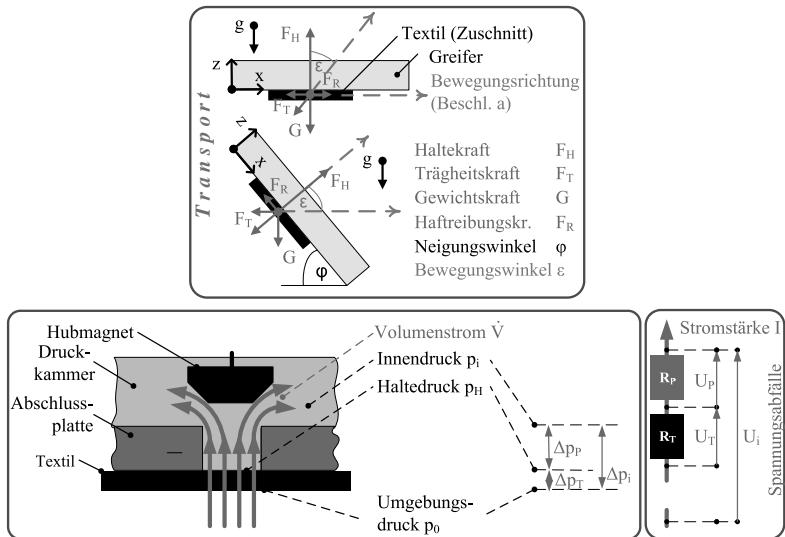


Abbildung 76: Modelle für die Transportphase: Kräfte bei exemplarischen Transportzuständen (oben), Prozessdrücke (links) und elektrisches Ersatzmodell (rechts)

Da das Greifsystem während des Transports auch um den Winkel φ bzw. die Bewegungsrichtung um den Winkel ε geneigt werden kann, ergeben sich winkelabhängige Zusammenhänge. Die Reibungskraft ist hierbei über den *Haftreibungskoeffizienten* μ_H von der *Anpresskraft* F_N , also der Kräftedifferenz in z -Richtung, abhängig und trägt durch eine Vermeidung von Verschiebungen des

Textils auf der Greiferfläche zu einem prozesssicheren Transportieren bei (vgl. Gl. 4–14, 4–15 und 4–16).

x-Richtung – Fall 1: $G \cdot \sin(\varphi) > F_T \cdot \sin(\varepsilon)$

$$F_R = \mu_H \cdot F_N \geq G \cdot \sin(\varphi) - F_T \cdot \sin(\varepsilon) = m_T \cdot [g \cdot \sin(\varphi) - a \cdot \sin(\varepsilon)] \quad (4-14)$$

x-Richtung – Fall 2: $G \cdot \sin(\varphi) < F_T \cdot \sin(\varepsilon)$

$$F_R = \mu_H \cdot F_N \geq -G \cdot \sin(\varphi) + F_T \cdot \sin(\varepsilon) = m_T \cdot [-g \cdot \sin(\varphi) + a \cdot \sin(\varepsilon)] \quad (4-15)$$

$$z\text{-Richtung: } F_H = G \cdot \cos(\varphi) + F_T \cdot \cos(\varepsilon) = m_T \cdot [g \cdot \cos(\varphi) + a \cdot \cos(\varepsilon)] \quad (4-16)$$

Aus den Grenzbedingungen 4–14 und 4–15 und der Definition der *Anpresskraft* F_N (vgl. Gl. 4–17)

$$F_N = F_H - G \cdot \cos(\varphi) - F_T \cdot \cos(\varepsilon) = F_H - m_T \cdot [g \cdot \cos(\varphi) + a \cdot \cos(\varepsilon)] \quad (4-17)$$

ergibt sich der allgemeingültige Zusammenhang für die notwendige Haltekraft in Abhängigkeit des Prozesswinkels φ und ε (vgl. Gl. 4–18) (Vorzeichen für *Fall 2* in runden Klammern):

$$F_H \geq \frac{m_T}{\mu_H} \cdot \{g \cdot [\mu_H \cdot \cos(\varphi) + (-)\sin(\varphi)] + a \cdot [\mu_H \cdot \cos(\varepsilon) - (+)\sin(\varepsilon)]\} \quad (4-18)$$

Die Betrachtung der Prozessdrücke sowie des Ersatzschaltbildes ergibt bei der Transportphase lediglich den Unterschied, dass keine Unterlage mehr zu durchströmen ist und somit der dabei entstehende Differenzdruck Δp_i bzw. der Spannungsabfall U_i entfällt (vgl. Gl. 4–19).

$$p_i - p_\infty = \Delta p_i = \Delta p_T + \Delta p_P \quad (4-19)$$

Auf Basis der Gleichungen 3–8 und 3–9 lässt sich der Zusammenhang zwischen der wirkenden *Druckdifferenz* Δp_T , der *Haltekraft* F_H und der *Saugfläche* A_G herleiten (vgl. Gl. 4–20) und unter Berücksichtigung des *Öffnungsverhältnisses* f (vgl. Abschnitt 3.5.3) in Abhängigkeit der *Zuschnittsfläche* A_T formulieren (vgl. Gl. 4–21):

$$F_H = \Delta p_T \cdot A_G \quad (4-20)$$

$$\Delta p_T = \frac{F_H}{A_G} = \frac{F_H}{A_T \cdot f} \quad (4-21)$$

Letztlich lässt sich ein Zusammenhang formulieren, der die Abhängigkeit der theoretisch notwendigen *Druckdifferenz* Δp_T von den Zuschnittseigenschaften A_T , μ_H und m_T , den Greiferkenngößen f und μ_H sowie den herrschenden

4.5 Umsetzung eines Funktionsmusters zur Absicherung des Greiferkonzepts

Prozessgrößen ε , φ und a beschreibt (vgl. Gl. 4–22; Vorzeichen für *Fall 2* in runden Klammern):

$$\Delta p_T \geq \frac{m_T}{\mu_H \cdot A_T \cdot f} \cdot \{g \cdot [\mu_H \cdot \cos(\varphi) + (-)\sin(\varphi)] + a \cdot [\mu_H \cdot \cos(\varepsilon) - (+)\sin(\varepsilon)]\} \quad (4-22)$$

Die Anwendung dieser Formel auf das Referenzszenario ist im Rahmen der Validierung des Greifsystems erläutert (vgl. *Abschnitt 5.4*). Zunächst ist jedoch ein Funktionsmuster zu Absicherung des erforschten Konzepts umzusetzen.

4.5 Umsetzung eines Funktionsmusters zur Absicherung des Greiferkonzepts

4.5.1 Notwendigkeit und Zielsetzung der Absicherung

Das erarbeitete Konzept für ein NFS-basiertes, hochflexibles Greifsystem beschreibt ein technisch vollkommen neuartiges System, dessen Funktionsfähigkeit am Ende der Entwicklungsphase (Greiferkonzept erarbeiten – vgl. *Abbildung 22*) im Sinne des Schrittes *Zielerreichung absichern* aus dem MVM sichergestellt werden muss. Dies ist notwendig, um das Risiko der folgenden, meist kostenintensiven, Realisierungsphase eines umfassenden Prototypen zu vermindern. Nach der VDI-Richtlinie 2221 sollte hierzu im Vorfeld der Prototypenphase ein *Funktionsmuster* entwickelt, realisiert und erprobt werden (VDI 1993). Nicht nur bei Klein- und Großserienprodukten, sondern auch bei der Kombination von technisch neuartigen Prinzipien und einem kostenintensiven Einzelprodukt (großflächiges Greifsystem) ist diese Vorgehensweise sinnvoll, insbesondere dann, wenn durch Skalierung des Systems eine hohe Aussagegüte mit vertretbarem Aufwand zu erreichen ist. Im Folgenden wird daher die effiziente Gestaltung und Erprobung eines Funktionsmusters auf Basis des gewählten Konzeptes thematisiert (vgl. *Abschnitt 4.5.2* und *4.5.3*). Ein wertvoller Effekt der Erzeugung eines derartigen Funktionsmusters ist die Tatsache, dass somit parallel zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eine flexible Testplattform zur Verfügung steht, an der kritische Sachverhalte experimentell ermittelt und somit wichtige Auslegungsdaten gewonnen werden können.

4.5.2 Effiziente Gestaltung des Funktionsmusters

Um eine möglichst aufwandsarme Umsetzung des Funktionsmusters im Rahmen dieser Arbeit zu gewährleisten, gilt es, zunächst das Konzept und somit die einzelnen Subsysteme hinsichtlich ihrer Relevanz für die Darstellung der grundsätzlichen Funktionalität zu analysieren. In Anlehnung an das schon während der Konzeptionsphase erarbeitete Einflussportfolio (vgl. *Abbildung 53*) ergibt sich auch hier eine hohe Abhängigkeit von dem Zusammenwirken der Verschlussaktorik und der Abschlussplatte, da diese Module für die Umsetzung des selektiven Greifens verantwortlich sind. Hier muss das Funktionsmuster nahe an der späteren Konstruktion (Gestaltungsgrößen der Abschlussplatte) und Bauteilauswahl (Hubmagnet und Pfropfen) des Prototypen liegen. Die Gestaltung des Vakuumsystems sowie die Auswahl des Vakuumerzeugers beeinflussen insbesondere die Höhe der erreichbaren Kräfte (Leistungsfähigkeit) und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems und spielen daher, genauso wie das Trägersystem, bei der Funktionsabsicherung eine untergeordnete Rolle. Hinsichtlich des Sensor- und Steuerungssystems ist im ersten Schritt keine vollständige Datendurchgängigkeit und Regelung der Prozessgröße *Differenzdruck* notwendig.

Die Skalierbarkeit des anvisierten Greifsystems ist gegeben und damit kann die im Funktionsmuster zu realisierende Größenordnung deutlich kleiner als die geforderten Abmessungen des Prototypen für das Referenzszenario gewählt werden. Um dennoch Sachverhalte, wie beispielsweise eine gleichmäßige Unterdruckverteilung, beurteilen zu können, werden die Abmessungen des Funktionsmusters in der Größenordnung eines DIN-A3 Formates (297 mm x 420 mm; 150 Aktoren) gewählt.

Abbildung 77 zeigt das realisierte Funktionsmuster zur Durchführung der im folgenden Abschnitt thematisierten Validierungsuntersuchungen in einer entsprechenden anwendungsnahen Versuchsumgebung (STRÄBER & EHINGER 2010).

4.5 Umsetzung eines Funktionsmusters zur Absicherung des Greiferkonzepts

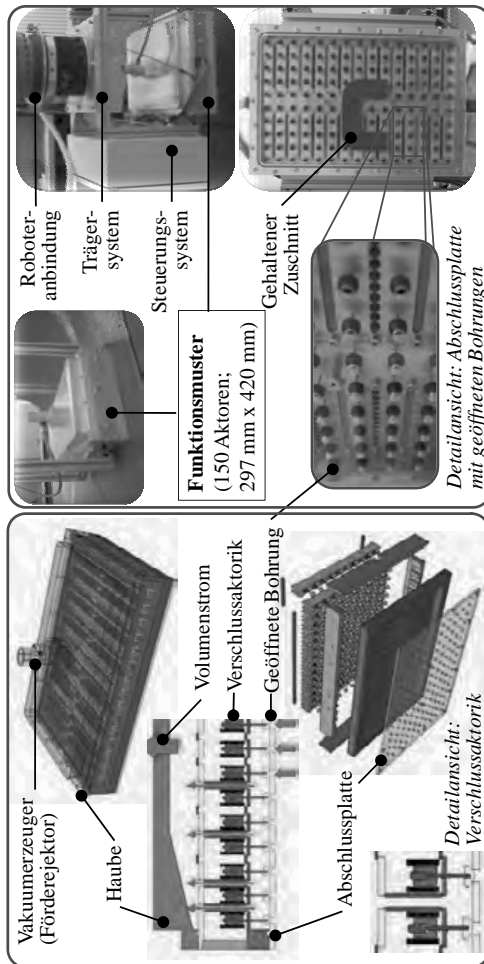


Abbildung 77: Gestaltung eines Funktionsmusters (3D-CAD-Modell; links und realisiertes System in verschiedenen Ansichten; rechts)

4.5.3 Grundlegende Validierungsuntersuchung

Auf der Basis des realisierten Funktionsmusters können grundlegende qualitative Validierungsuntersuchungen durchgeführt werden. Die ausführliche Validierung des erzielten Konzepts bzw. Systems anhand des Referenzszenarios erfolgt nach Realisierung des Prototypen und wird in *Kapitel 5* thematisiert.

Zunächst werden die Ziele der Validierung aus der Aufgabenstellung (Funktionsstrukturierung – vgl. *Abbildung 28* und Anforderungssystem – vgl. *Abbildung 34*) abgeleitet, indem diese auf die grundsätzlichen Funktionen und Anforderungen reduziert wird. *Abbildung 78* zeigt die ermittelten Validierungsziele und das daraus extrahierte Szenario.

Validierungsziele

• Funktionalität

- selektives, flächiges Greifen
- def. Aufnehmen – Halten
- def. Ablegen – Lösen

• Leistungsfähigkeit

- ausreichende Haltekraft
- Flexibilität
(Kontur- und Materialspektrum)
- Geschwindigkeit/Taktzeit

• Qualität und Prozesssicherheit

- präzises Aufnehmen und Ablegen
- minimalinvasives Greifen
(Erhalt der Strukturintegrität)

Validierungsszenario

Absortieren eines im Schnittbild verdrehten Schriftzuges bestehend aus unterschiedlichsten Konturen (für 4 Referenzmaterialien)

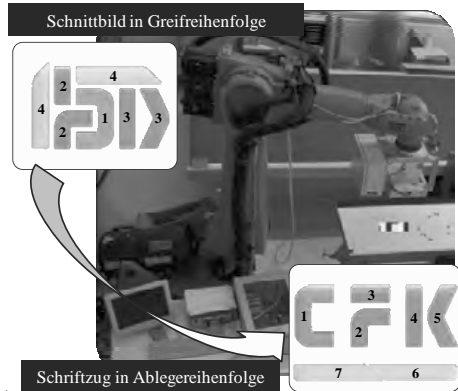


Abbildung 78: Validierungsziele und -untersuchung mit dem Funktionsmuster

Mit dem Funktionsmuster werden unter Verwendung eines Industrieroboters verschiedenste Zuschnitte aus den vier Referenzmaterialien von einem Schneidisch absortiert und einzeln in der korrekte Position auf einem Ablagetisch abgelegt, so dass der Schriftzug *CFK* entsteht (siehe Zuordnung durch Nummern in *Abbildung 78*). Neben einzelnen Zuschnitten können hierbei auch mehrere Zuschnitte gegriffen und einzeln abgelegt werden, indem die Verschlussaktorik einzelne Öffnungen der Abschlussplatte selektiv verschließt. Durch die Steuerung des Volumenstroms des eingesetzten Förderejektors gelingt es, für die unterschiedlichen Materialien, spezifische Differenzdrücke einzustellen, so dass alle vier Varianten prozesssicher und ohne *Abklappen* oder *Verrutschen* während der Prozessphasen gehalten werden können. Trotz manueller Eingabe der Öffnungskonfiguration und auch der Unterdruckparameter wird auf Anhieb die gewünschte Taktzeit von 60 s pro Zuschnitt erreicht, wobei keinerlei unzulässige Struktur- oder Werkstoffveränderung zu erkennen ist. Die Validierung des Funktionsmusters und damit die Absicherung des erarbeiteten Konzepts sind somit erfolgreich abgeschlossen.

4.6 Prototypische Realisierung des Greifsystems

4.6.1 Randbedingungen und Realisierungsgrundlagen

Als Realisierungsgrundlage dient eine Versuchsumgebung, in der das System anhand des dieser Arbeit zugrundeliegenden Referenzszenarios abgebildet und anschließend auch validiert wird. Die Randbedingungen basieren folglich auf den definierten Anforderungen des Referenzszenarios. Es handelt sich hierbei um die prototypische, konstruktive Ausgestaltung des bisher erarbeiteten Konzeptes (vgl. *Abschnitt 4.4.1*) und stellt somit ein realisiertes hochflexibles Greifsystem für die Handhabung und insbesondere das Absortieren technischer Textilien dar. Weitergehend wird im Folgenden die Methodik und exemplarische Realisierung des vorgestellten Steuerungskonzeptes zur Herstellung einer konsistenten und vollkommen automatisierten Datenverarbeitung erörtert (vgl. *Abschnitt 4.6.3*). Insbesondere wird in diesem Zusammenhang auf die zuschnittsbasierte Positionierung und Konfiguration des Greifsystems sowie die erarbeitete Druckregelung eingegangen, da diese Aspekte maßgeblich die hohe Flexibilität eines derartigen Systems beeinflussen (vgl. *Abschnitt 4.6.4* und *4.6.5*).

4.6.2 Mechanischer Aufbau

Basierend auf dem erarbeiteten Konzept, der zugrunde liegenden System-Spezifikation für das Referenzszenario (vgl. *Tabelle 11; Anhang*) und des umgesetzten Funktionsmusters erfolgt die Konstruktion des gesamten Greifsystems als modularer Roboter-End-Effektor. Die darzustellende Greiffläche (2225 mm x 1200 mm) wird hierzu in 15 gleichartige Bereiche (445 mm x 400 mm) aufgeteilt, welche als autonome Greifer-Module ausgeführt sind und jeweils über 288 Aktoren verfügen (vgl. *Abbildung 79*). Die Module sind an einem Leichtbaurahmen als Trägersystem derart befestigt, dass einerseits über die gesamte Fläche keine Unterbrechung des vorgegebenen Greifpunktabstands von 25 mm erfolgt und andererseits eine einfache Montage und Demontage ermöglicht wird (STRÄBER 2010A, REINHART ET AL. 2010F). Die Gleichartigkeit der Module bzgl. der Bauteile und auch der Öffnungskonfiguration führt zu einer Austauschbarkeit, wobei ein derartiges System auch aus unterschiedlich konfigurierten Modulen bestehen könnte, um beispielsweise Bereiche hoher Auflösung für kleinere, extrem formlabile Zuschnitte zu schaffen. Während das aufwändige Anschlussmodul der Steuerungstechnik in Form einer Platine in die einzelnen Module integriert ist (vgl. auch *Abbildung 80* und *Abschnitt 4.6.3*), befindet sich das I/O-Modul zentral auf dem Greifer.

Hochflexibles Greifsystem zur automatisierten Handhabung von Faserverbundhalbleugen

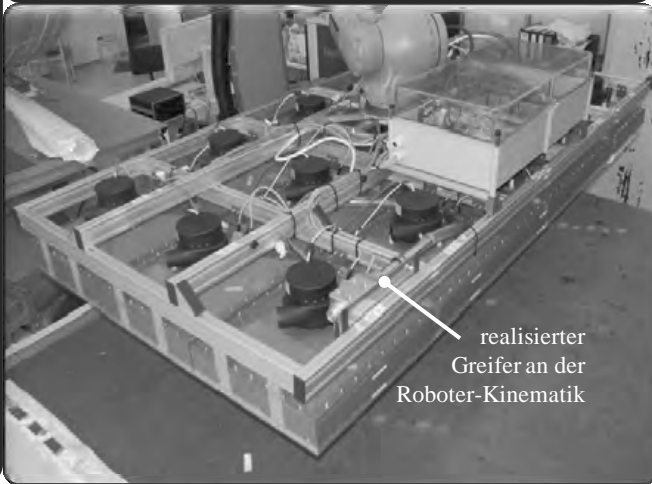
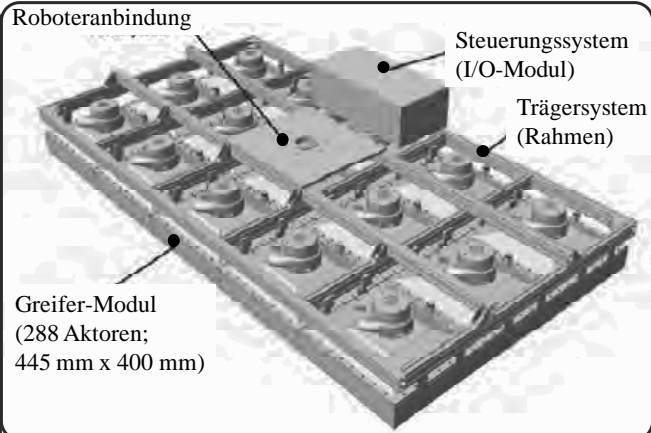


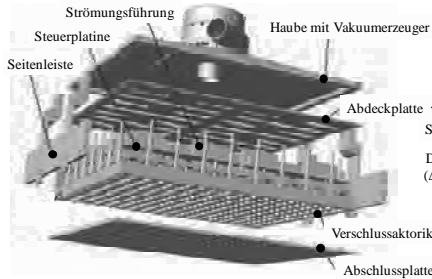
Abbildung 79: Mechanischer Aufbau des Gesamtsystems:
3D-CAD-Modell und realisierter Greifer

Das unter Verwendung eines Industrieroboters realisierte hochflexible Greifsystem ist somit in der Lage, konturvariante Zuschnitte aus dem flächigen Verbund auf dem Schneidtisch zu vereinzeln. Hierbei können zum einen mehrere kleinere Zuschnitte in einem Prozessschritt gegriffen und einzeln an definierten Positionen abgelegt werden. Zum anderen besteht die Option, die Abmessungen des End-Effektors auszunutzen und großflächige Textilien aufzunehmen (STRABER 2010A).

4.6 Prototypische Realisierung des Greifsystems

Abbildung 80 zeigt detailliert den Aufbau und die Wirkungsweise eines Greifer-Moduls auf. Die Umsetzung der einzelnen Subsysteme aus der Konzeptionsphase ist deutlich erkennbar.

Explosionszeichnung eines Greifer-Moduls



Schnittzeichnung eines Greifer-Moduls

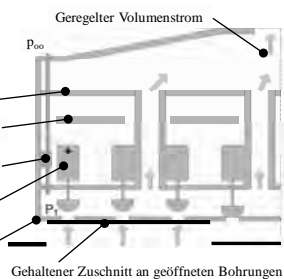


Abbildung 80: Detailansichten eines Greifer-Moduls: Explosions- (links) und Schnittzeichnung (rechts)

Die selektive Verteilung der Haltekraft erfolgt durch das Öffnen spezifischer Bohrungen der Abschlussplatte mit Hilfe der Verschlussaktorik (bistabiler Hubmagnet und Kunststoff-Pfropfen) gegenüber dem erzeugten Volumenstrom (HAAS ET AL. 2009). Dieser durchströmt durch den verursachten *Differenzdruck* Δp das textile Halbzeug und wird anschließend durch Strömungsführungen (Vakuumsystem) an den elektronischen Komponenten (Hubmagnete und Steuerplatine) vorbei geführt, um diese nicht mit leitenden Partikeln im Gastrom zu verschmutzen (Schutzsystem). Der sich einstellende Differenzdruck wird je Greifer-Modul durch einen Differenzdrucksensor ermittelt, so dass die Leistung der Vakuumzeuger entsprechend geregelt werden kann (STRABER 2010A).

4.6.3 Steuerungstechnik

Aufbauend auf der in *Abschnitt 4.3.6* aufgezeigten Konzeption und Strukturierung der Steuerungstechnik (vgl. *Abbildung 66*) wird in diesem Abschnitt auf die für das Anwendungsszenario realisierte Gestaltung der einzelnen Subsysteme eingegangen. Für die vorliegende Arbeit werden hierbei übergeordnete Softwareinstanzen ausgeklammert, da diese die zugrunde gelegte Systemgrenze des Greifsystems überschreiten. An dieser Stelle sei auf Forschungsarbeiten von ANGERER ET AL. (2010) verwiesen. Bezogen auf die Realisierung des greiferspezifischen Softwaresystems werden in den beiden folgenden Abschnitten die Aspekte *Greiferpositionierung* (4.6.4) und *Druckregelung* (4.6.5) behandelt.

Gestaltung Anschlussystem

Die Umsetzung des Konzepts der *aktiven Matrix* zum effizienten Anschluss einer Vielzahl an Aktoren wird durch die Entwicklung spezifischer Flachbaugruppen gelöst, die direkt mit den Hubmagneten verbunden werden und in ihrer geometrischen Gestaltung an die, durch die Strömungsführungen dominierte, Raumaufteilung in einem Greifer-Modul angepasst werden (vgl. *Abbildung 81*).

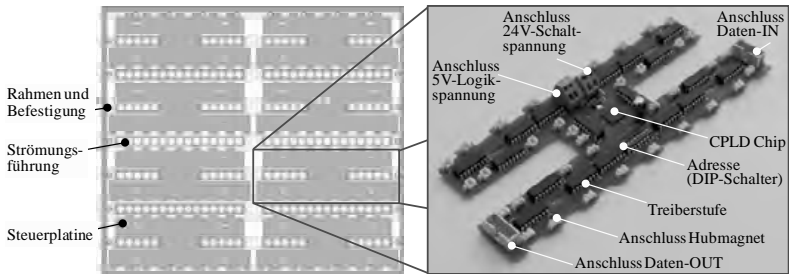


Abbildung 81: Realisiertes Anschlussystem – bestehend aus acht Flachbaugruppen bzw. Steuerplatinen (rechts) je Greifer-Modul (links)

An eine Flachbaugruppe sind 36 Aktoren angeschlossen, deren Spannungsimpuls (vgl. *Abbildung 55*) durch Treiberstufen aufgebracht wird, welche wiederum von einem Logik-Baustein (CPLD – Complex Programmable Logic Device) angesprochen werden. Durch die Option der Programmierung des Chips sowie der Adressierung (DIP-Schalter) einer Flachbaugruppe gelingt es, trotz weniger Ausgänge am I/O-Modul, einzelne Aktoren anzusprechen. Dies bildet letztlich die steuerungstechnische Basis für die durch eine hohe Aktordichte erzeugte Flexibilität des Systems hinsichtlich einer selektiven Greiffläche.

Gestaltung I/O-System

Für das I/O-System wird ein PAC-System ausgewählt und in Form einer modularen CRIO-Hardware (National Instruments – CompactRIO) realisiert (vgl. *Abbildung 82*). Über Ethernet können Befehle und Daten vom Softwaremodul übertragen werden, welche auf dem Real-Time-Controller und der FPGA-Einheit (Field Programmable Gate Array) verarbeitet und an die entsprechenden Ausgangsmodule weitergegeben werden (EHINGER ET AL. 2010). Dementsprechend können über digitale Eingangsmodule Greifkonfigurationen in Form von geöffneten bzw. geschlossenen Bohrungen an die Flachbaugruppen übermittelt werden und die Vakuumerzeuger durch analoge Spannungsausgänge, basierend auf eingelesenen Differenzdruckwerten, geregelt werden.

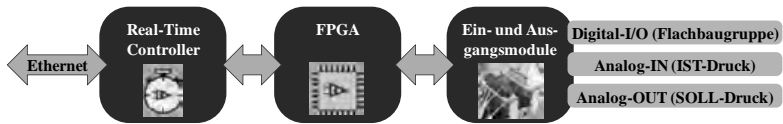


Abbildung 82: Realisiertes I/O-System (basierend auf National Instruments CompactRIO; in Anlehnung an NATIONAL INSTRUMENTS 2008)

4.6.4 Dynamische, zuschnittsbasierte Positionierung des Greifers

Wie in *Abschnitt 2.2.4* dargestellt, zeichnet sich ein hochflexibles Greifsystem neben der geometrischen Anpassbarkeit (z. B. Greiffläche) maßgeblich durch einen möglichst kleinen Adaptionaufwand aus. Im Umfeld der Handhabung technischer Textilien bezieht sich dies auf die automatisierte Anpassung des Greifsystems auf Basis der Zuschnittsdaten. Gerade für das Anwendungsszenario spielt dies eine entscheidende Rolle, da die Variantenvielfalt der Konturen sowie der Nesting-Vorgang (Optimierung der Materialausnutzung durch Positionierung der Zuschnitte) innerhalb des Schneidprozesses unterschiedlichste Schnittbilder (Anordnung der Zuschnitte) erzeugen. Beim Vereinzeln eines Zuschnitts aus dem flächigen Verbund muss jedoch *konturtreu* gegriffen werden, indem die Haltekraft nur innerhalb der Kontur des zu handhabenden Textils wirkt. Die Folge ist, dass neben der Greifkonfiguration auch die Position des Greifsystems zur Aufnahme eines Zuschnitts automatisiert zu ermitteln ist (vgl. *Abschnitt 4.3.6*), da bei der vorgestellten Matrix aus Greifpunkten diese in Bezug auf den Zuschnitt anzuordnen sind. Weitergehend erhöhen die Formlabilität und die komplexe Kontur der Faserverbundtextilien die Relevanz der Positionierung erheblich, indem an Randbereichen und Einschnitten explizite Krafteinleitungspunkte zu setzen sind, um ein ungewünschtes Abklappen zu vermeiden (vgl. *Abbildung 83*).

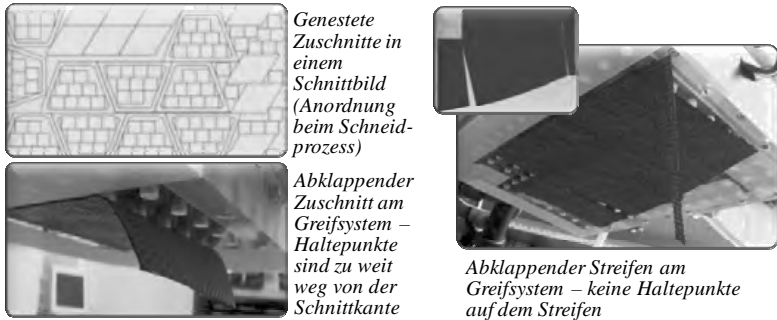


Abbildung 83: Genestetes Schnittbild (links) und Prozessfehler aufgrund falscher Positionierung (Formlabilität – links; dünner Streifen – rechts)

Letztlich entsteht daraus die Forderung nach einer dynamischen, zuschnittsbasiert-automatisierten Positionierung des Greifsystems, welche die folgenden Randbedingungen und Ziele berücksichtigt:

- Randbedingungen:
 - Abmessungen und Greifpunktauflösung des Greifsystems
 - Abmessungen, Kontur und Faserorientierung des Zuschnitts
 - Arbeitsraumbeschränkungen
- Ziele:
 - Maximierung der Anzahl an Greifpunkten je Zuschnitt
 - Minimierung des Abstands der Zuschnittskonturen zu Greifpunkten
 - auf schmalen Zuschnittsteilen (dünner als Greifpunktabstand) mindestens einen Greifpunkt vorsehen

Unberücksichtigt bleiben im Rahmen dieser Arbeit die Einflüsse aus den Gegebenheiten der Ablageposition, welche in Verbindung mit dem Arbeitsraum der eingesetzten Kinematik auch Auswirkungen auf die Wahl der Aufnahmeposition haben. Weitergehend wird als erster Schritt lediglich die optimierte Positionierung bzgl. eines Zuschnitts betrachtet, welche in folgenden Arbeiten auf die Bedingungen bei der gleichzeitigen Aufnahme mehrerer Zuschnitte auszuweiten ist. Ausgangspunkt ist bei den folgenden Betrachtungen, dass Zuschnittinformationen wie Position, Abmessung und Linienkontur (z. B. Polyline) aus dem Vorprozess (z. B. im Falle Anwendungsszenario: Schneiden) zur Verfügung stehen und dass spezifische Koordinatensysteme zur Transformation hinterlegt sind (vgl. Abbildung 142; Anhang).

Lösungsansatz zur dynamischen, zuschnittsbasierten Positionierung

Als Lösungsansatz wird eine Positionierungsstrategie entwickelt (vgl. *Abbildung 84*), welche zunächst auf Basis neun hinterlegter Startpositionen eine Grobpositionierung des Greifsystems in Bezug auf die Zuschnittskontur vornimmt (4 x Ecke, 4 x Seitenmitte, 1 x Flächenmitte), wobei die Ausrichtung des rechteckförmigen Greifsystems in Richtung der längsten Achse des Zuschnitts erfolgt (A). Auf dieser Basis ist die entsprechende Greifkonfiguration in Form eines Öffnungsmusters der Bohrungsmatrix zu errechnen (B). Hierzu wird durch einen Algorithmus geprüft, welche Bohrungen vollständig innerhalb der Zuschnittsfläche liegen. Die folgende Feinpositionierung erfordert die Durchführung einer Optimierung hinsichtlich der beschriebenen Ziele und wird über einen entsprechenden Algorithmus gelöst (C). Ist die optimierte Position gefunden, wird ihre Zulässigkeit für die definierten Arbeitsräume geprüft (D) und die Positionierung an das Kinematiksystem übermittelt (E). Bei einer unzulässigen Position wird die nächste Grobposition gewählt (A) und der Ablauf startet erneut.

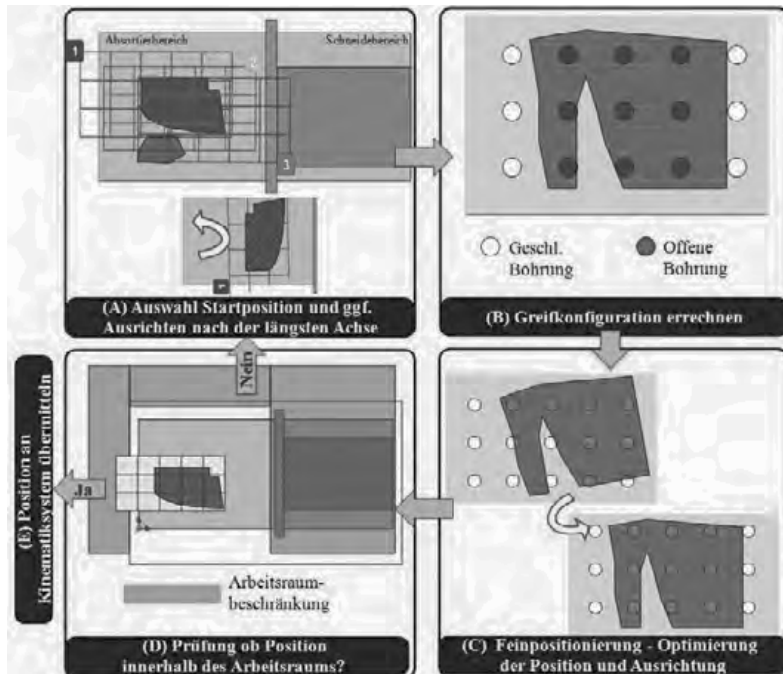


Abbildung 84: Positionierungsstrategie ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$)

Feinpositionierung

Die Feinpositionierung (C) stellt ein typisches kombinatorisches Optimierungsproblem dar, da aus einer Menge diskreter Elemente (hier: Positionen) eine Teilmenge zu ermitteln ist (Lösung), welche gewissen Nebenbedingungen genügt und hinsichtlich einer Zielfunktion optimal ist (COOK 1998, VÖCKING ET AL. 2008). In der Technik wird hierbei oftmals ein Minimum der Zielfunktion gesucht, wobei ein spezifisches mathematisches Verfahren – oder auch Optimierungsalgorithmus – zum Einsatz kommt (SCHUMACHER 2005). Unter einer Vielzahl anwendbarer Algorithmen (z. B.: genetische Alg., zufällige sowie vollständige Suchen, Bergsteigeralgorithmus oder Ameisenkolonie, vgl. VÖCKING ET AL. 2008) wird für die Umsetzung innerhalb des prototypisch realisierten Steuerungssystems das heuristische Verfahren *Simulated Annealing* (simuliertes Abkühlen, vgl. *Abbildung 140, Anhang*) ausgewählt, bei dem in Anlehnung an das Weichglühen von Metallen ein *Energiewert* E minimiert wird (FOIDL 2009, WEICKER 2002, KORTE & VYGEN 2008, VÖCKING ET AL. 2008, WEGENER 2005). Ursache dafür ist die Fähigkeit des Verfahrens, lokale Minimalwerte zu verlassen, um das gesuchte globale Minimum zu erreichen. Weitergehend verfügt es über das Potenzial einer Erweiterung hinsichtlich mehrerer gleichzeitig zu greifender Zuschnitte und lässt sich aufwandarm in einer C#-Umgebung implementieren.

Bei der Anwendung des Algorithmus auf das Errechnen optimaler Greifpositionen sind zunächst die Einzelfaktoren des *Energiewerts* E zu bestimmen. Gemäß der Zielsetzung ist hierbei die *Anzahl der geschlossenen Bohrungen* n_{geschl} , die im Betrachtungsbereich außerhalb des Zuschnitts liegen, der Hauptfaktor (vgl. *Abbildung 85*). Je kleiner diese Größe, desto größer ist die zur Verfügung stehende Saugfläche. Die erste Nebenbedingung ergibt sich aus der geforderten Minimierung der Abstände zwischen Öffnungen und den Konturkanten des Zuschnitts. Um diese Größe zu bestimmen, werden, wie in *Abbildung 85 Mitte* dargestellt, Prüfvektoren in $\pm x$ - und $\pm y$ -Richtung erstellt und deren *orthogonaler Abstand* s zu den benachbarten Bohrungen bzw. zur Kontur bestimmt bzw. errechnet (*Darstellung des Vektors mit einer unterbrochenen Linie*). Diese Werte werden mit den aus Materialuntersuchungen bekannten Grenzwerten (abhängig von der Faserorientierung; vgl. *Abschnitt 3.4.1*) verglichen und weitergehend zu einem *Gesamtabstand* s_G ($s_G = \sum s_n$) kumuliert, woraus bezogen auf die Anzahl der geöffneten Bohrungen der *Mittlere Abstand* \bar{s} folgt (vgl. *Gl. 4–23*).

$$\bar{s} = \frac{\sum s_n}{n_{\text{offen}}} \quad (4-23)$$

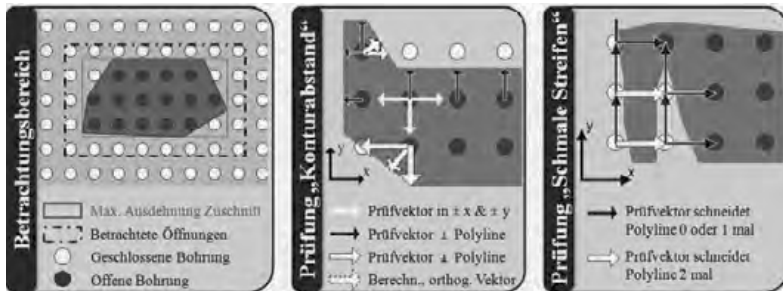


Abbildung 85: Betrachtungsbereich und Prüfung der Nebenbedingungen
„Konturabstand“ und „Schmale Streifen“

Schmale Streifen, deren Breite zwischen Bohrungsdurchmesser und Bohrungsabstand liegt, können nur dann erfolgreich gegriffen werden, wenn durch die Positionierung Haltepunkte innerhalb der Kontur geschaffen werden können. Gerade Zuschnitte für Faserverbundanwendungen werden oftmals seitlich eingeschnitten, um sich verengende Konturen im Formwerkzeug drapieren zu können (vgl. *Abbildung 27*, Form 2). Die zweite Nebenbedingung prüft die Position dahingehend, dass jeweils zwei Vektoren pro Öffnung (+x- und +y-Richtung) hinsichtlich der Anzahl an Schnittpunkten mit der Zuschnittkontur überprüft werden (vgl. *Abbildung 85*, rechts). Ist die Anzahl der Schnittpunkte größer als eins, so liegt ein dünner Streifen zwischen diesen Bohrungen und die Nebenbedingung ist nicht erfüllt. Der zu minimierende *Energiewert E* setzt sich folglich aus der Summe der *Anzahl geschlossener Bohrungen n* sowie dem hundertsten Teil des *mittleren Abstands \bar{s}* zusammen (vgl. *Gl. 4–24*). Weitergehend wird, falls eine der beiden Nebenbedingungen nicht erfüllt ist („Konturabstand größer Grenzwert“ oder „Streifen zwischen Bohrungen“), als *Strafterm $n_{\text{offen,Straf}}$* die Anzahl der offenen Bohrungen addiert, um einen extrem hohen Energiewert zu erreichen.

$$E = n_{\text{geschl}} + \frac{\bar{s}}{100 \cdot \text{mm}} + n_{\text{offen,Straf}} \quad (4-24)$$

Somit wird sichergestellt, dass unter den zulässigen Positionen mit gleicher Anzahl an geöffneten Bohrungen diejenige gewählt wird, die über den kleinsten mittleren Konturabstand verfügt, da sich dies auf die Nachkommastellen des Energiewerts auswirkt. Die Position des Greifers wird, ausgehend von der gewählten Startposition, so lange durch Translation (x, y) bzw. Rotation um den Mittelpunkt (TCP) verändert, bis der Energiewert ein globales Minimum erreicht hat.

4.6.5 Dynamische Differenzdruckregelung

Neben der Positionierung kommt der Einstellung des richtigen *Differenzdrucks* Δp_i und damit auch der richtigen *Haltekraft* F_H maßgebliche Relevanz zu und ist durch das Ansteuerungssystem zu gewährleisten. Hierbei lassen sich folgende, grundsätzliche Anforderungen formulieren, die den Einsatz einer angepassten Druckregelung bedingen (vgl. *Abbildung 86*):

- Gewährleistung eines konstanten, gezielt veränderbaren Differenzdrucks (Flexibilität, Wirtschaftlichkeit)
- geringe Abweichungen vom Sollwert und v. a. auch kurzfristig keine zu hohen Drücke bzw. Kräfte (Materialschonung)
- schneller Aufbau des Differenzdrucks (Senkung der Taktzeit)
- (schneller) Ausgleich von Störeinflüssen (z. B. Fehlluft durch Undichtigkeit, Versagen eines Verschlussaktors, Abklappen an einer Öffnung)
- Unabhängigkeit vom Betriebszustand, vom textilen Material (v. a. Luftdurchlässigkeit) und der Zuschnittsgröße (Robustheit, Flexibilität)

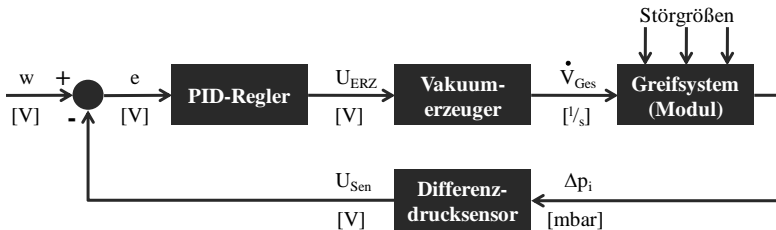


Abbildung 86: Regelstrecke des umgesetzten Greifsystems

Ziel der Druckregelung ist es, das Verhalten der physikalischen Größe *Differenzdruck* Δp_i hinsichtlich der beschriebenen Anforderungen und trotz auftretender Störgrößen zu optimieren. Der Druck wird hierbei mit Hilfe eines Drucksensors erfasst, dessen *Ausgangsspannung* U_{Sen} (*Regelgröße*) aufgezeichnet und mit dem *Vorgabewert* w (*Sollgröße* bzw. *Führungsgröße*) durch Differenzbildung verglichen wird. Der Vorgabewert kann für eine automatisierte Anpassung an unterschiedliche Flächenmassen bzw. Prozessphasen (mehr Haltekraft beim Herauslösen) aus einer Datenbank extrahiert oder mittels eines Umrechnungsfaktors vorgegeben werden. Es ergibt sich die *Regelabweichung* e , welche durch Anpassung der *Steuerspannung* U_{Vak} des Vakuumerzeugers (*Stellglied*) auszugleichen ist. Dementsprechend stellt sich ein bestimmter *Volumenstrom* \dot{V}_{Ges} ein. Durch den Einsatz eines optimierten PID-Reglers kann das dynamische Übertragungsverhalten des Gesamtsystems hinsichtlich einer typischen minimierten *Beruhigungszeit*

4.7 Zusammenfassendes Fazit

$T_{\varepsilon=2\%}$ (Differenzdruck bzw. Sensorspannung bleiben innerhalb eines Toleranzbandes von $\pm 0,2\%$ des Sollwerts) und einer minimierten *Überschwingweite* Δh stark verbessert werden (LUNZE 2007).

Hierzu wird das Übertragungsverhalten (Sprungantwort) bei verschiedenen Sprungfunktionen ermittelt, in einer entsprechenden Software modelliert und der Regler daraufhin ausgelegt. Für das realisierte Greifsystem ergeben sich nach der Auslegung des Reglers bei einer Vorgabe von 20 mbar sehr schnelle und exakte Antwortfunktionen, trotz der Trägheit des Fluidsystems (vgl. *Abbildung 87*).

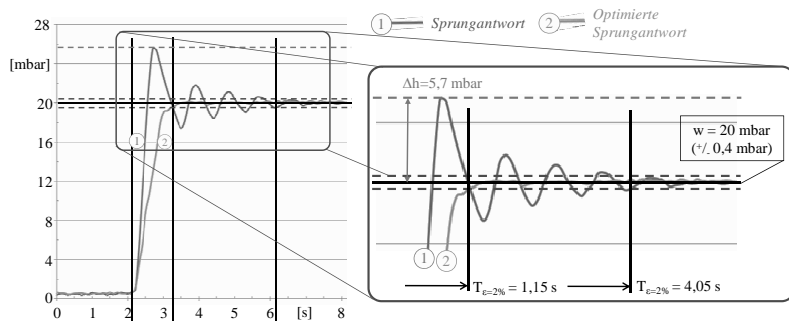


Abbildung 87: Optimiertes dynamisches Übertragungsverhalten

4.7 Zusammenfassendes Fazit

Durch das vorgestellte Konzeptionsvorgehen kann auf Basis eines ausgewählten Greifprinzips und anhand einer funktionsorientierten Modularisierung ein hochflexibles Greifsystem entwickelt werden. Hierbei sind die verschiedenen Ebenen eines mechatronischen Produkts zu berücksichtigen, indem die notwendigen Funktionalitäten übergreifend durch Mechanik, Steuerungselektronik und Ansteuerungssoftware dargestellt werden. Am Beispiel eines unterdruckbasierten Systems können diesbezüglich neben dem verallgemeinerbaren Vorgehen auch explizite methodische Hilfestellungen zur Auswahl und Auslegung einzelner Sub-Systeme beschrieben werden. Das somit im Rahmen der vorliegenden Arbeit prototypisch umgesetzte Greifsystem zur Handhabung technischer Textilien ist im Folgenden hinsichtlich der Anwendbarkeit zu untersuchen, wobei die erfolgreiche Umsetzungsphase schon für sich eine grundlegende Validierung des methodischen Vorgehens darstellt.

5 Experimentelle Validierung des Greifsystems

5.1 Validierungsansatz und -szenarios

Nach erfolgreicher Konzeption und Umsetzung des hochflexiblen Greifsystems anhand des erarbeiteten methodischen Vorgehens wird in den folgenden beiden Kapiteln die Einsatzfähigkeit des Systems durch experimentelle Untersuchungen analysiert. Dies erfolgt auf Basis des in *Abschnitt 3.2.4* aufgezeigten Referenzszenarios, wodurch gezeigt wird, dass das System die zugrunde gelegte Aufgabenstellung erfüllt und die greiftechnologische Lücke in der Handhabung von Faserverbundhalbzeugen schließt. Letztlich wird dadurch, neben der Funktionsfähigkeit des neuartigen Systems, auch die Anwendbarkeit des vorgestellten Vorgehens abgesichert. Auf Basis der grundlegenden Anforderungserfüllung wird weitergehend das prozesstechnische Potenzial des Systems unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit untersucht. Dies bildet die Grundlage, um über den ursprünglichen Einsatzbereich hinaus die Relevanz des Greifsystems hinsichtlich differierender Materialien und Prozesse zu analysieren (vgl. *Kapitel 6*). Zunächst wird durch die Beschreibung der Versuchsumgebung und der eingesetzten Messtechnik sowie durch die detaillierte Untersuchung der Prozessphasen und -größen die Grundlage für die Beurteilung der Greiftechnologie gelegt.

5.2 Versuchsumgebung und eingesetzte Messtechnik

Die Versuchsumgebung zur Durchführung der Validierungsuntersuchungen basiert auf dem gewählten Referenzszenario (vgl. *Abschnitt 3.2.4*), in welchem vier unterschiedliche textile Halbzeuge nach dem Schneidprozess aus dem Absortierbereich des Cutters aufgenommen und vereinzelt auf einem Ablagetisch abgelegt werden (vgl. *Abbildung 88*).

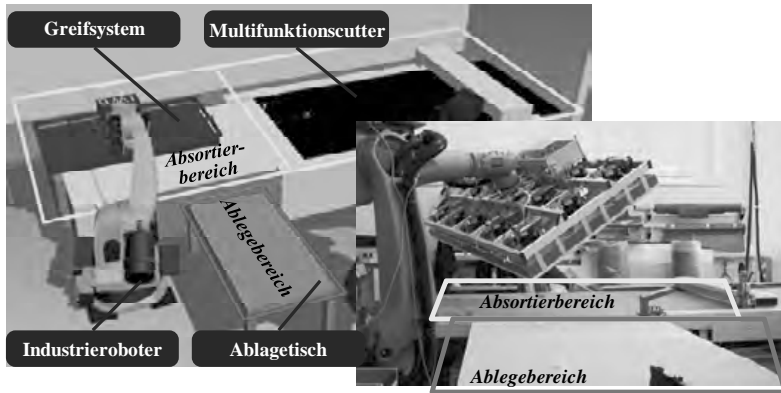


Abbildung 88: Versuchsumgebung zur Validierung des Greifsystems (links CAD-Modell und rechts reale Anlage)

Als Kinematiksystem dient ein Industrieroboter (KUKA KR 270-2; Sechachs-Knickarm; vgl. Datenblattauszug Abbildung 143; Anhang) mit 270 kg Nenn-Traglast. Das Schneidsystem stellt ein Multifunktionscutter mit Rundmesser-Werkzeug der Firma TopCut-Bullmer GmbH dar (Schneidfläche: 2,5 m x 1,8 m), welcher um ein Materialzuführsystem zur automatisierten Zufuhr des textilen Halbzeugs sowie um eine Conveyorverlängerung (Absortierfläche: 2,5 m x 1,8 m) erweitert ist (vgl. Datenblattauszüge Abbildung 144; Anhang). Dieser verlängerte Bereich des Cutters wird bisher im industriellen Umfeld als manuelle Abnahmestelle benutzt und im Folgenden als *Absortierbereich* bezeichnet. Der Ablagetisch ist eine einfache Konstruktion, bei der die Auflagefläche aus einem Lochblech und einem Vlieswerkstoff besteht. Dieser Bestandteil des Gesamtsystems dient als Ersatz für ein potientes Lagerungs- oder Verkettungssystem zur Weiterverarbeitung der Zuschnitte in der späteren industriellen Anwendung (vgl. Abschnitt 6.1).

Zur detaillierten Analyse des Greifsystems ist eines der Module mit entsprechender Messtechnik ausgestattet (vgl. Abbildung 89). Neben dem ohnehin integrierten piezoresistiven Drucksensor zur Aufnahme des Differenzdrucks Δp_i zwischen der Umgebung und dem Raum über der Abschlussplatte (AllSensors; 20Inch-G-4V-Mini; 0-50 mbar) wird ein Volumenstromsensor zur Erfassung des Gesamtvolumenstroms \dot{V}_{Ges} eingesetzt (Wagner; MFM D-6270SV/LDP; 0-1000 l/min). Dieser beruht auf dem Prinzip der Heizdrahtmassenmessung und wird direkt mit dem Auslass des Vakuumerzeugers verbunden (DURST 2006; GEVATTER & GRÜNHaupt 2006).

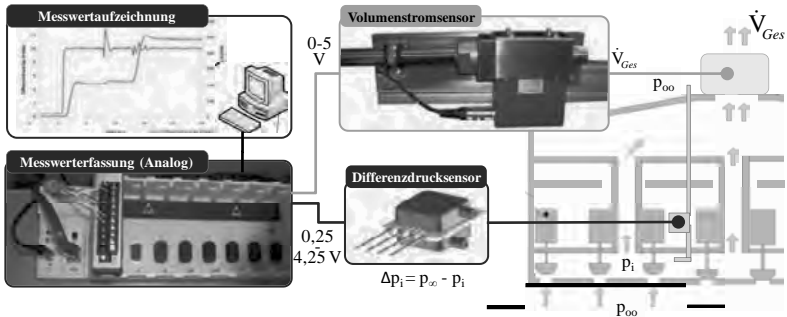


Abbildung 89: Messtechnik und Datenerfassung eines Greifer-Moduls

Beide Sensoren geben proportional zum aufgenommenen Messwert Spannungen aus, welche durch ein Datenerfassungs-Interface (*National Instruments; NI cDAQ 9172*) und eine analoge Eingangskarte (*National Instruments; NI 9215*) erfasst werden. Durch die Anbindung an einen Rechner können die aktuellen Messwerte und deren Zeitverläufe unter Anwendung einer Messsoftware (*National Instruments; LabView SignalExpress*) aufgezeichnet und analysiert werden.

5.3 Ziel- und Untersuchungsgrößen

Grundlage einer fundierten und strukturierten Validierung des Systems ist die Definition von Ziel- und Untersuchungsgrößen. Als Zielgrößen werden in diesem Zusammenhang die durch das System zu erfüllenden Anforderungen verstanden, die auf Basis der Anforderungsdefinition aufgestellt (vgl. *Abbildung 34, Abschnitt 3.4.5*) und bereits auf die Ermittlung von Wirkprinzipien übertragen wurden (vgl. *Abbildung 40, Abschnitt 3.5.2*). Die Untersuchungsgrößen bilden zum einen einstellbare Parameter (*Parameter - Input*), welche zur Bestimmung des Prozessoptimums oder zur Anpassung an verschiedene Anwendungen variiert werden können, und zum anderen bewertbare Eigenschaften des Systems/Prozesses (*Analysewert - Output*). *Abbildung 90* zeigt eine Übersicht der Zielgrößen, welchen jeweils konkrete Anforderungen zugeordnet sind. Die Erfüllung der Anforderung kann durch die Variation und Beurteilung der Parameter und Analysewerte erreicht werden. Während sich die Zielgrößen und Anforderungen von der Ausprägung des Wirkprinzips unabhängig gestalten, sind die einzelnen Untersuchungsgrößen spezifisch auf unterdruckbasierte Prinzipien zugeschnitten.

5.3 Ziel- und Untersuchungsgrößen

Zielgröße	Anforderung	Untersuchungsgrößen		
		Abheben - A	Transport - T	Ablegen - L
Funktionalität	Selektives Greifen	✓	✓	✓
	Definiertes Halten	Δp_A \dot{V}_A Δz_A	Δp_T \dot{V}_T φ_T a_T	Δp_L \dot{V}_L Δz_L
	Definiertes Lösen			
Leistungsfähigkeit	Hohe, def. Haltekräfte	Δp_A	Δp_T	Δp_L
	Taktzeit / Geschw.	Δt_A	Δt_T	Δt_L
	Flexibilität	✓	✓	✓
Qualität	Materialintegrität	Rückstände	Rückstände	Rückstände
	Strukturintegrität	Strukturverr.	Strukturverr.	Strukturverr.
	Genauigkeit	Δx_T Δy_T	Δx_L Δy_L	
Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten	K_{WB}	K_{WB}	K_{WB}
	Betriebskosten	Δp_A \dot{V}_A P_{eA}	Δp_T \dot{V}_T P_{eT}	Δp_L \dot{V}_L P_{eL}

✓ i. O.	Δp Druckdiff.	φ, E Prozesswinkel	Δx Verschiebung x	Δt Taktzeit
Δz Abstand	\dot{V} Volumenstr.	a Beschleunigung	Δy Verschiebung y	P_e Elektr. Leistung
Parameter	Analysewert	K_{WB} Wiederbeschaffungswert		

Abbildung 90: Übersicht und Zuordnung von Ziel- und Untersuchungsgrößen

Da im Folgenden die einzelnen Prozessphasen separat betrachtet werden, existieren einzelne Werte mehrmals und werden durch entsprechende Indizes unterschieden (vgl. Abbildung 91).

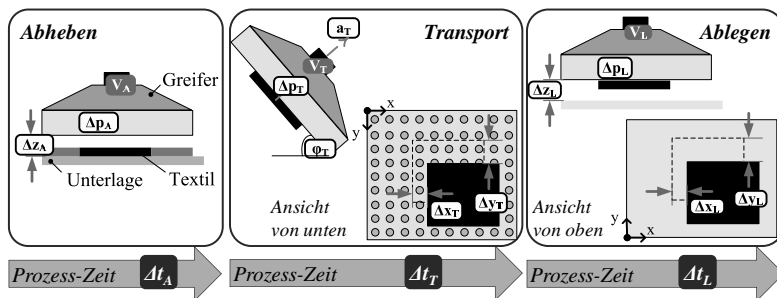


Abbildung 91: Untersuchungsgrößen bei unterschiedlichen Prozessphasen

Die wichtigsten Prozessgrößen stellen Differenzdruck und Volumenstrom dar, da mit Hilfe der eingeführten Zusammenhänge Rückschlüsse auf die erreichte Haltekraft (Δp), auftretende Druckverluste und somit auch auf die Wirtschaftlichkeit (\dot{V}) getroffen werden können. Einstellbare Abstände zur Unterlage beim Aufnehmen Δz_A und Ablegen Δz_L sowie die kinematischen Randbedingungen des Transports (a_T und φ_T) bilden Variationsmöglichkeiten, deren Einfluss auf die Zielgrößen zu untersuchen ist (vgl. Abschnitt 5.4). Mögliche Taktzeiten Δt lassen

eine Aussage zur Leistungsfähigkeit zu, beeinflussen aber auch die Wirtschaftlichkeit des Systems, welche neben den Investitionskosten K_I stark von den Betriebskosten und damit von der elektrischen Leistungsaufnahme P_e des Gesamtsystems abhängen. Weitergehend wird die Qualität des automatisierten Prozesses in verschiedenen Phasen maßgeblich durch die Integrität des Greifgutes (*Rückstandsfreiheit* und *Strukturstabilität*) und die erreichbare Genauigkeit bestimmt. Letztere kann durch die Messung der auftretenden Verschiebungen Δx und Δy während der Transport- bzw. nach der Ablegephase beurteilt werden.

Im Vorfeld der folgenden Untersuchungen sei erwähnt, dass die Strukturintegrität des Greifguts zwar eine der bedeutendsten Zielgrößen darstellt, aber durch die sehr schonende Krafteinleitung über alle Experimente hinweg innerhalb des relevanten Differenzdruckbereichs keinerlei analysierbare Beeinflussung durch das Greifsystem festgestellt werden konnte. Selbst bei maximal erreichten Differenzdrücken am Textil Δp_T von ca. 30 mbar sind keine der in *Abbildung 42* aufgezeigten Fehlerbilder erkennbar. Lediglich ab Differenzdrücken von ca. 40 mbar lassen sich erste, zum Teil reversible Beulen durch das Einsaugen in die Öffnungsbohrungen feststellen (vgl. *Abbildung 145*; *Anhang*). Durch das unterdruckbasierte Greifen werden prinzipbedingt keine Zusatzwerkstoffe angewendet, welche Rückstände am Textil bilden könnten. Lediglich eine Partikelimmission aus dem Umgebungsmedium (Luft) kann durch die Durchströmung nicht ausgeschlossen werden. Entspricht die Umgebung einer gewöhnlichen industriellen Fertigung, ist durch das entstehende Ausmaß mit keinerlei negativen Folgen im angeschlossenen Fertigungsprozess zu rechnen, zumal das Textil in der Regel bereits während des Schneidprozesses angesaugt und damit ohnehin ohne negativen Prozesseinfluss durchströmt wird.

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

5.4.1 Grundlegende Funktionalität

„*Selektives Greifen durch die flächenspezifische Aufbringung von Haltekraft mittels definierter Differenzdrücke*“ charakterisiert die grundlegende Funktionalität des erforschten Greifsystems. Daraus lässt sich ableiten, dass durch das System beliebig konturierte Zuschnitte einzeln oder gemeinsam aus dem flächigen Verbund auf dem Schneidtisch herauszulösen und anschließend einzeln auf einem Zwischenlagerplatz abzulegen sind. Mit Hilfe drei verschieden konturierter Zuschnitte, welche kritische Geometrielemente wie *dünne Ausschnitte* (1, 2) und *Bögen* (2, 3) enthalten, wird dies anhand der vier Referenzmaterialien

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

überprüft (vgl. *Abbildung 92*). Sowohl nebeneinander angeordnete Zuschnitte (1, 2), als auch durch Verschnittteile separierte Elemente (3) lassen sich erfolgreich einzeln und gemeinsam durch das Greifsystem vereinzeln. Die Tatsache, dass singuläre, auf der Schnittkante liegende Öffnungen geschlossen werden müssen (*worst case*), beeinflusst die Prozessfähigkeit dabei nicht.

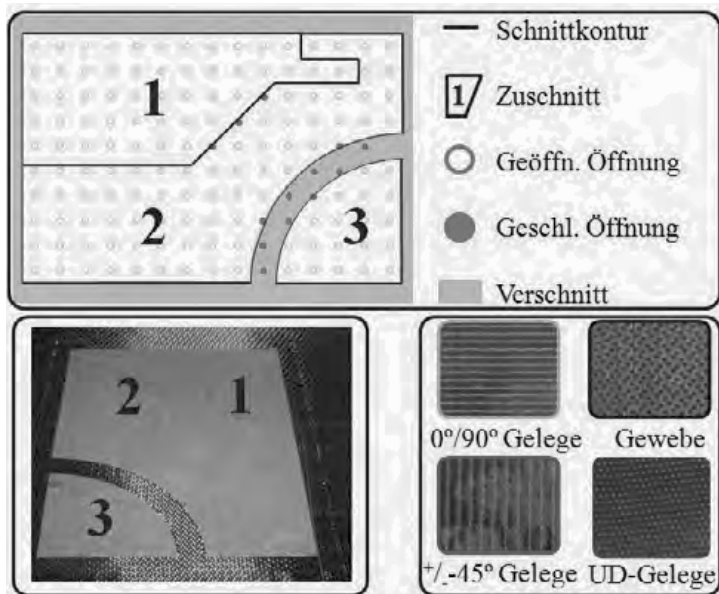


Abbildung 92: Grundlegende Konturen (oben) und Materialien (unten) zur Analyse der Funktionalität des Greifsystems (unten links: im Schneidbereich verbleibender Verschnitt)

Die Sicherstellung der Funktionalität des Greifsystems ist über diesen Funktionstest hinaus auf Basis von realen Zuschnitten des Referenzszenarios zu erbringen. *Abbildung 93* zeigt eine Auswahl an Zuschnitten aus den drei Referenzprodukten, welche sowohl einzeln (1-3) als auch mehrteilig (4) erfolgreich absorbiert werden können. Unter anderem befindet sich der in der Analysephase (vgl. *Abschnitt 3.4.2* und *Abbildung 126; Anhang*) identifizierte größte Zuschnitt (2; Produkt C, Nr. 53; Länge 2116 mm, Breite 955 mm) zusammen mit diversen Kleinteilen in diesem Schnittmuster. Der Vorgang kann unter Verwendung aller Referenzmaterialien dargestellt werden und ist bis zur gleichzeitigen Aufnahme aller Zuschnitte erweiterbar.

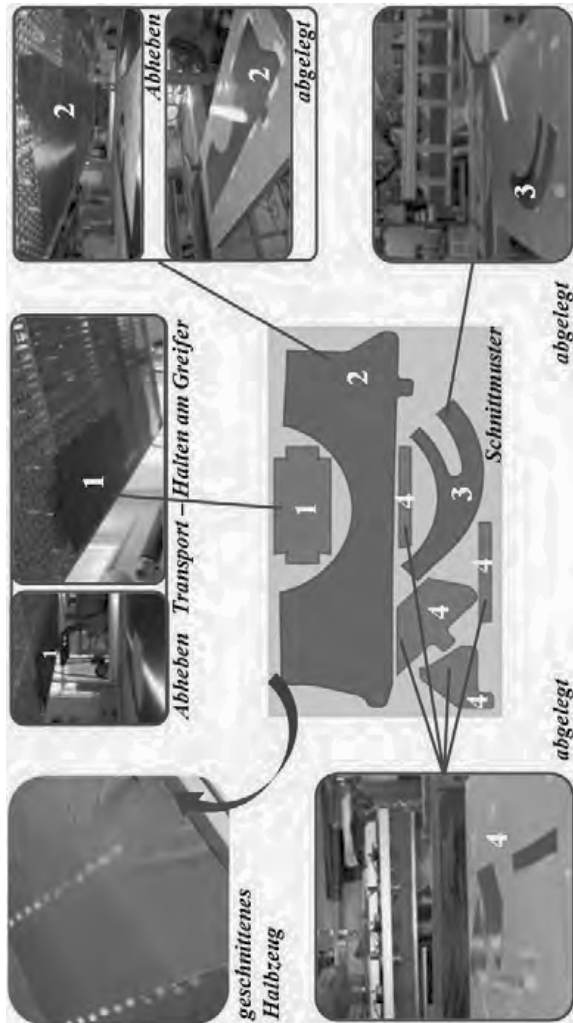


Abbildung 93: Differierende Referenzzuschnitte (1-4) werden absorbiert

Über die Sicherstellung der grundlegenden Funktionen hinaus wird die Dichtheit der gewählten Verschlussaktuatorik exemplarisch an einem vollständig geschlossenen Greifermodul analysiert (*Normalzustand B*, Abbildung 94). Hierzu wird gegenüber einem *Referenzzustand A* (alle Öffnungen an der Abschlussplatte abgedichtet) der Volumenstrom \dot{V} bei unterschiedlichen Differenzdrücken Δp_i gemessen (vgl. Abbildung 94, links). Zusätzlich wird der Einfluss eines Fehlers

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

untersucht, indem eine Bohrung durch die Verschlussaktorik freigegeben wird (Zustand C). Dadurch kann beurteilt werden, ob eine nicht verschlossene Bohrung durch die signifikante Veränderung des Volumenstroms detektiert werden kann. Durch Quotientenbildung gegenüber dem Referenzzustand bzw. dem Normalzustand werden belastbare Kennwerte für den Anteil der Fehlluft geschaffen.

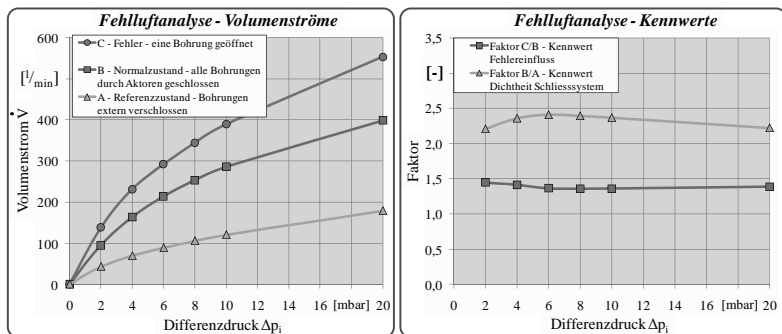


Abbildung 94: Fehlluftanalyse zur Beurteilung der Dichtigkeit des Schließsystems und des Einflusses von Schließfehlern

Erwartungsgemäß steigt der Fehlluftstrom mit höheren Differenzdrücken in allen Fällen an. Im Referenzzustand bilden lediglich die Undichtigkeiten zwischen einzelnen Greiferbauteilen und der gewünschte Volumenstrom über den Reinraum die gemessenen Fehlluftströme (vgl. Abschnitt 4.3.8). Das realisierte Schließsystem verursacht gegenüber der abgedichteten Variante um den Faktor 2,2 bis 2,4 erhöhte Volumenströme. Ist eine Bohrung nicht verschlossen, erhöht sich der Volumenstrom um 50 bis 150 l/min oder ca. den Faktor 1,4. Hinterlegt man den Normalzustand in der Anlagensteuerung, lässt sich diese signifikante Abweichung automatisiert erkennen, so dass ein nicht schließender Aktor ohne aufwändige zusätzliche Sensorik detektiert werden kann. Auch Prozessfehler, wie das Abklappen des Textils, die zur Freigabe einer Öffnung führen, lassen sich auf diese Weise identifizieren.

5.4.2 Flexibilität

Überprüft man die erreichte Flexibilität anhand der in Abschnitt 2.2.4 definierten Einteilung und hinsichtlich der für den Anwendungsfall geforderten hochflexiblen Ausprägung eines Greifsystems (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 18), lassen sich auf Basis der Untersuchungen aus Abschnitt 5.4.1 folgende Schlussfolgerungen treffen:

- Die geometrische Anpassungsfähigkeit des Systems ist durch die selektiv aktivierbare Greiffläche hinsichtlich differierender Konturen gegeben.
- Das System verfügt über eine sensorbasierte Greifkraftregelung, indem der erforderliche Differenzdruck material- und prozessphasenspezifisch geregelt wird.
- Sowohl die geometrische als auch die materialspezifische Adaptionfähigkeit ist vollautomatisiert ausgeprägt, da die Höhe des erforderlichen Differenzdrucks und die Ausdehnung der Greiffläche auf Basis hinterlegter Daten (Schnittbild, 2D-Kontur, Materialeigenschaften) automatisiert parametrisiert wird.
- Die Prozessstrategie ist in Ansätzen (Prozessphasen-abhängige Greifkraft; konturbasierte Positionierung des Greifsystems; Absortier-Reihenfolge der Zuschnitte) automatisiert adaptierbar. Die aufgezeigte Möglichkeit, Prozessfehler autonom, d. h. ohne zusätzliche externe Systeme, zu erkennen, verstärkt diesen Aspekt.

Zusammenfassend lässt sich die erforschte Technologie als hochflexibles Greifsystem einordnen und erfüllt somit die geforderten Flexibilitätsforderungen.

5.4.3 Untersuchung auftretender Durchströmungszustände und möglicher Optimierungen

Anhand der in *Abschnitt 5.3* erarbeiteten Modellvorstellung ist das reale Durchströmungsverhalten des Greifsystems während der unterschiedlichen Prozessphasen zu analysieren. Hierzu wird der *Differenzdruck* Δp_T und der zugehörige *Volumenstrom* \dot{V} bei der Durchströmung der Referenztextilien im Falle einer einzelnen, geöffneten Bohrung gemessen (vgl. *Abbildung 75* und *Abbildung 76*). Der quadratische Zuschnitt (25 mm x 25 mm) wird hierzu an den Kanten abgedichtet, um Quereinströmung zwischen Textil, Greiferunterseite und Unterlage zu vermeiden und eine rein orthogonale Durchströmung zu gewährleisten. So lassen sich die Ergebnisse auf größere Zuschnitte extrapolieren. Beim Vergleich der aufgenommen Graphen wird deutlich, dass sich zwischen den Referenztextilien, trotz variierender Luftdurchlässigkeiten, kaum ein Unterschied in der Höhe des Differenzdrucks ergibt (vgl. *Abbildung 146*; *Anhang*). Lediglich die Vergleichskurve für den Zustand *ohne Textil* erzeugt bei gleichen Volumenströmen deutlich kleinere Differenzdrücke. Trotz der zusätzlich zu durchströmenden Unterlage (erhöhter Strömungswiderstand) liefert die Auswertung der Aufnahmephase kaum erhöhte Differenzdrücke bei vergleichbaren Volumenströmen.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der Einströmung von Fehlluft durch die Undichtigkeiten im Greiferaufbau (Fügestellen), den nicht vollständig

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

verschlossenen Rest-Bohrungen und der gezielt über den Reinraum zuströmen- den Luft. Es ergeben sich somit mehrere parallele Strömungszweige mit differie- renden Einzelwiderständen. Die Erhöhung des Strömungswiderstands im zu analysierenden Zweig bewirkt analog zur Elektrotechnik eine wesentlich kleinere Erhöhung des Gesamtwiderstands, welcher die Ursache für den ermittelten Ab- fall des Differenzdrucks bei einem bestimmten Volumenstrom darstellt. Ein diesbezüglicher Vergleich der Durchströmungszustände ist somit nicht zielfüh- rend.

Durch die Eliminierung zusätzlicher paralleler Luftströme (externes Verschließen durch Abdichtungsmaterial) wird der ermittelte Volumenstrom auf die zu unter- suchenden Bohrungen konzentriert und für die Materialien Gewebe und UD- Gelege die entsprechenden Kurven ermittelt. Um erfassbare Volumenströme zu erzeugen, sind hierzu mehrere Bohrungen zu öffnen. *Abbildung 95* zeigt die Ergebnisse für die beiden Textilien bei unterschiedlicher Anzahl geöffneter Boh- rungen (angestrebte Verdopplung der Bohrungen bei verschiedenen Variationen; 288 entspricht gesamtes Modul). Der gemessene *Differenzdruck* Δp_i besteht in diesem Fall aus den Druckabfällen am Textil Δp_T und der Platte Δp_P . Letzterer kann durch eine Messung ohne Textil ermittelt werden, liefert aber für einen Volumenstrom von $1000 \frac{l}{min}$ lediglich einen geringen Differenzdruck $\Delta p_P = 0,41$ mbar bei der Konfiguration mit 128 geöffneten Bohrungen.

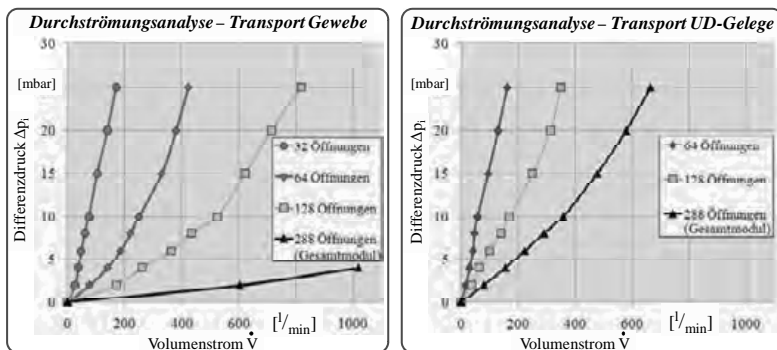


Abbildung 95: Durchströmungsverhalten Gewebe und UD-Gelege während des Transports bei unterschiedlichen Öffnungskonfigurationen

Die Kurven für die Transportphase zeigen die typische polynomische Abhängig- keit (1. und 2. Grades) der beiden Größen, welche letztlich durch die Beschrei- bungen des Druckverlusts bei durchströmten, porösen Medien durch die Gleichungssysteme von Darcy (KOLYMBAS 2007, HERWIG 2008) und Forchheimer

(KUNH 2006) analytisch belegbar sind. BRASQUET & CLOIREC (2000) leiten daraus für die Durchströmung von Textilien einen Zusammenhang ab, der den *Druckabfall* Δp über der *Textildicke* t_T in Abhängigkeit der *Strömungsgeschwindigkeit* u charakterisiert (vgl. Gl. 5–1). Während der lineare Gleichungsanteil (*Koeffizient* N) auf Viskositätsverluste zurückzuführen ist, folgt der quadratische Anteil (*Koeffizient* M) aus Turbulenzen beim Durchströmen der Mikrostruktur textiler Gebilde und ist damit extrem geschwindigkeits- und damit auch volumenstromabhängig.

$$\frac{\Delta p}{t_T} = N \cdot u + M \cdot u^2 \quad (5-1)$$

Die proportionalen Abhängigkeiten bei Vergrößerung der Bohrungsanzahl – und damit auch der durchströmten Fläche – lassen sich zwar nicht exakt experimentell nachbilden, jedoch stimmen diese für einen mittleren Druck- und Volumenstrombereich gut überein. Bei kleinen Volumenstromwerten befindet sich das Mess- wie auch das Vakuumzeugungssystem an der unteren Betriebsgrenze und bei größeren Differenzdrücken stellen sich reversible Verformungen des textilen Flächengebildes ein, die die Luftdurchlässigkeit verändern. Im Vergleich der beiden Referenzmaterialien lässt sich feststellen, dass das UD-Gelege schon bei wesentlich niedrigeren Volumenströmen die einzustellenden Differenzdrücke erbringt. Die aus der Materialanalyse für einen Differenzdruck von 2 mbar erreichten Unterschiede in der Luftdurchlässigkeit (Faktor 3,75, vgl. *Tabelle 3*) werden auch hier im mittleren Betriebsbereich in der Größenordnung richtig abgebildet (Faktor 2,5 - 4,5, vgl. *Abbildung 95*). Eine exaktere Analyse bedürfte verbesserter Messtechnik, ist aber im Rahmen der vorliegenden experimentellen Validierung des Systems nicht erforderlich.

Bei Betrachtung der Aufnahmesituation wird deutlich, dass die Permeabilität der Cutterauflage erhöht werden muss, um ein „Ansaugen“ des Greifsystems an der zunächst luftdichten PE-Platte zu verhindern. Durch den Einbau einer gelochten Cutterplatte wird die Absortierfähigkeit und Prozesssicherheit wesentlich erhöht (vgl. *Abschnitt 5.4.4.*), indem die gewünschte orthogonale Durchströmung der Unterlage erreicht wird. Zu durchströmen sind in diesem Fall die Cutterplatte und das Transport- bzw. Schneidvlies, auf welchem das abzusortierende Textil liegt (vgl. *Abbildung 96*). Der gemessene Differenzdruck Δp_i fällt somit nur zum Teil am Textil ab und lässt ein Aufnehmen zu. Wesentliche Anteile können als Druckverlust Δp_U der Unterlage zugeordnet werden und fallen am Vlies ab, wie die Kurve „*Kein Textil – Vlies*“ in *Abbildung 96* zeigt. Eine weitere Optimierung am Cuttersystem kann somit durch die Erhöhung der Luftdurchlässigkeit des

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Vlieses erreicht werden. Hierzu wird eine Versuchsreihe mit einer gelochten Vliesunterlage durchgeführt. Somit können für beide Textilien die Differenzdrücke Δp_i bei vergleichbaren Volumenströmen erheblich reduziert werden. Für das Gewebe liegen die gemessenen Werte nahe an den im Transportfall ermittelten Werten. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerten Druckverluste mehr an dem optimierten Vlies entstehen. Eine Messung der Differenzdrücke am gelochten Vlies ohne Textil ergibt kaum erfassbare Werte. Diese liegen in der Größenordnung der oben angeführten Druckdifferenzen an der Abschlussplatte Δp_p .

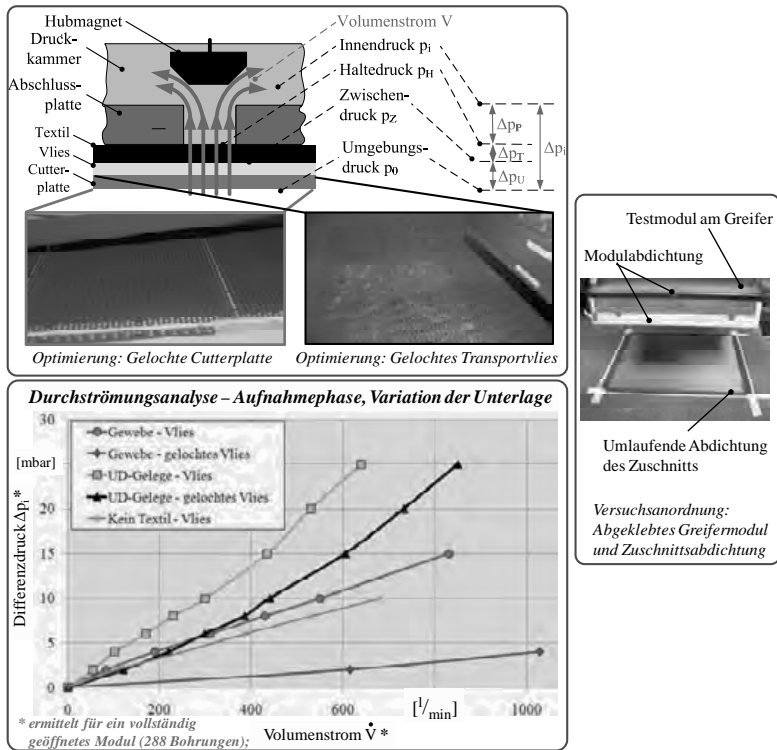


Abbildung 96: Durchströmungsverhalten während der Aufnahme- phase bei unterschiedlichen Konfigurationen der Unterlage (Cuttersystem)

Ein Vergleich der für ein gesamtes Greifermodul aufgenommenen Differenzdrücke bei unterschiedlichen Unterlagen der beiden Textilien UD-Gelege und Gewebe zeigt den Einfluss der Luftdurchlässigkeit der Unterlage deutlich auf. Bei gleichen Volumenströmen fallen an der Unterlage „gelochtes Vlies“ wesentlich

kleinere Differenzdrücke ab, was die Wirtschaftlichkeit sowie die Prozesssicherheit des Aufnehmens stark erhöht. Eine isolierte Aufnahme der Vliesdurchströmung (*Kein Textil – Vlies*) zeigt den erheblichen Druckverlust an der Unterlage. Eine Schwierigkeit der Ermittlung des Durchströmungsverhaltens während der Aufnahmephase ist die Gefahr von seitlich einströmender Fehlluft zwischen Greifer und Textil, welche durch eine umlaufende Abdichtung des Zuschnitts reduziert, aber nicht eliminiert werden konnte. Daher liegen im Vergleich zum Transportfall bei ähnlichen Differenzdrücken leicht erhöhte Volumenströme vor. Für einen späteren industriellen Einsatz kann an dieser Stelle die Verwendung einer umlaufenden Dichtlippe entlang der Kontur des Greifsystems empfohlen werden.

Eine hohe Luftdurchlässigkeit des Vlieses bringt auch Effizienzvorteile beim Ansaugen der Textilien, während des Schneidens verschlechtert jedoch die Belochung die Prozesssicherheit dieses Vorgangs, da die textile Struktur dem mechanischen Messer in die Öffnungen ausweichen kann.

5.4.4 Prozessphase Abheben

Das prozesssichere Herauslösen definierter textiler Zuschnitte aus dem flächigen Verbund auf dem Schneidtablett stellt die Herausforderung beim *Abheben* im Rahmen des Absortierens dar. Wie schon gezeigt, können durch das Greifsystem konturspezifische Saugflächen erzeugt werden, innerhalb welcher ein regelbarer Unterdruck eingestellt werden kann. Vorliegender Abschnitt beleuchtet die relevanten Prozessparameter und Aufgabenstellungen bei der Durchführung der Prozessphase näher, wobei dies ausschließlich anhand der beschriebenen Prozesskette, Versuchsumgebung (gelochte Cutterplatte, geschlossenes Vlies) und Referenzmaterialien (Rechteckzuschnitt: 192 mm x 167 mm) untersucht wird.

Die Grundlage für die Fähigkeit des Absortierprozesses stellt die Sicherstellung einer vollständigen Durchtrennung aller Fasern und Filamente dar. Dies kann nur durch die Erhöhung der Prozesssicherheit des Schneidprozesses gewährleistet werden und findet in den weiteren Ausführungen keine Betrachtung. Durch die Existenz der zusätzlich zu überwindenden Verhakungskräfte sind beim Abheben jedoch auch wesentlich höhere Haltekräfte und Differenzdrücke zu erwarten (SPIEGELMACHER 1991). Im Verlauf der Untersuchungen konnten für den vorliegenden mechanischen Trennprozess drei maßgebliche Quellen für die Verhakungen der Zuschnitte identifiziert werden (vgl. *Abbildung 97*). Einerseits erzeugt das Ansaugen des Zuschnitts während des Schneidprozesses eine großflächige Verwicklung der faserigen Oberfläche des Textils mit derer des Cuttervlies.

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Dieser Effekt spielt eine untergeordnete Rolle und kann durch die Umkehrung des Luftstroms nach dem Schneiden („Gegenblasen“) erheblich reduziert werden. Wesentlich stärker sind die Verhakungskräfte in der Schnittkante, welche aus den Verschränkungen bereits durchtrennter Fasern sowie aus einem Verkleben der Faserenden im Schnittkanal des Vlieses resultieren.

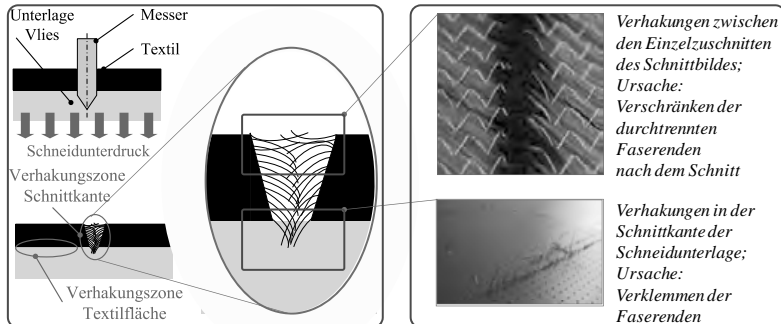


Abbildung 97: Maßgebliche Verhakungsarten des textilen Zuschnitts bei mechanischen Trennverfahren als Ursache erhöhter Rückhaltekräfte

Die Höhe der Verhakungskräfte kann nach dem bisherigen Stand der Forschungsarbeiten nicht eindeutig von bestimmten Faktoren abhängig gemacht werden. Folgende Randbedingungen konnten als relevant identifiziert werden:

- Der Schneidunterdruck und die Faserigkeit der beteiligten Materialien bestimmt die Höhe der flächigen Verhakungen.
- Das Material der Schneidunterlage hat entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Verhakungen in der Schnittkante in der Form, dass feste, nicht-textile Materialien, wie beispielsweise eine PVC-Unterlage, die Faserenden stärker klemmen.
- Der Winkel zwischen Schnittrichtung und Faserorientierung beeinflusst die Verhakungskräfte in der Schnittkante: Je geringer der Winkel, desto kleiner die Verhakungskräfte.
- Die Schneidparameter Vorschub, Drehzahl und Schnitttiefe in Zusammenhang mit dem Winkel und der Materialpaarung wirken einen undefinierten Einfluss auf die Höhe der Verhakungskräfte aus.

Zur Steigerung der Flexibilität des Handhabungssystems existieren über die Veränderung von Parametern hinaus verschiedene Prozessvarianten hinsichtlich der Abfolge der Teilfunktionen *Positionieren*, *Öffnungen freigeben* (Saugfläche definieren) und *Vakuumerzeuger aktivieren*. Daraus ergeben sich die in

Abbildung 98 dargestellten Alternativen A – C mit den exemplarischen Verläufen des Volumenstroms \dot{V} und Differenzdrucks Δp_i .

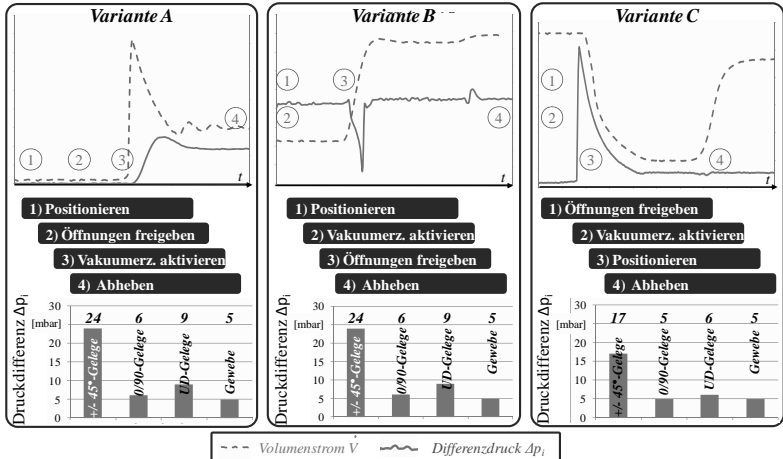


Abbildung 98: Abhebevarianten: Verläufe der Prozessgrößen, Abfolge der Einzelschritte und notwendige Differenzdrücke zum erfolgreichen Absorbieren der Referenzmaterialien (bei $\Delta z_A = 2 \text{ mm}$)

Während bei A und B das Greifsystem zunächst in die richtige Position über dem Zuschnitt gebracht wird und dann der angestrebte flächenspezifische Differenzdruck erzeugt wird, läuft bei Variante C bereits der Vakuumzeuger bei freigebenen Öffnungen. Im Einzelnen kann bzgl. der Varianten Folgendes festgehalten werden:

- **Variante A:** Durch die Aktivierung des Vakuumzeugers bei geöffneten Bohrungen steigt der Unterdruck langsam an. Die Variante eignet sich prinzipbedingt nicht zur gestaffelten Aufnahme mehrerer Zuschnitte im Bereich eines Moduls.
- **Variante B:** Der Vakuumzeuger sichert den Differenzdruck bei geschlossener Saugfläche. Durch das schlagartige Öffnen sinkt dieser kurz ab, bis das Textil an die Abschlussplatte heran gesaugt ist und der Vakuumzeuger den erforderlichen Volumenstrom erreicht hat. Durch regelungstechnische Optimierungen und prädiktives Aktivieren des Erzeugers kann der Druckabfall eliminiert werden, so dass sich diese Variante am besten zur Aufnahme mehrerer Zuschnitte eignet und auch energetisch am günstigsten ist, da keine unnötige Fehlluft erzeugt wird.

- **Variante C:** Nähert man sich dem Greifgut bereits mit aktivierter Saugfläche, wird der Zuschnitt zu einem undefinierten Zeitpunkt an die Abschlussplatte gesaugt, wodurch die Permeabilität des Gesamtsystems schlagartig absinkt und der Differenzdruck bei zunächst hohem Volumenstrom stark ansteigt. Da weder der erreichte Differenzdruck noch der genaue Zeitpunkt exakt definierbar sind, birgt diese Variante erhebliche Risiken für die Prozessqualität hinsichtlich der auftretenden Beeinflussung der Strukturintegrität und der Verschiebungen Δx_A und Δy_A bei steigenden Δz_A .

Zur Evaluierung der Differenzdrücke, die bei den unterschiedlichen Abhebevarianten erforderlich sind, werden die Drücke in 1 mbar Schritten solange erhöht, bis zehn aufeinanderfolgende Abhebeversuche erfolgreich verlaufen. Zunächst ist festzustellen, dass die Werte aufgrund der dargestellten Verhakungskräfte das theoretisch notwendige sowie das für die Transportphase evaluierte Niveau erheblich übersteigen (vgl. auch *Abschnitte 5.4.3 und 5.4.5*). Weitergehend ist kein Unterschied zwischen Variante A und B ermittelbar, während Vorgehen C z. T. wesentlich geringere Druckniveaus aufzeigt, welche jedoch auf den undefiniert hohen Drucksprung zurückzuführen sind, der die Verhakungen löst.

Ein entscheidender Prozessparameter bei der Aufnahme der textilen Zuschnitte ist der Abstand zur Unterlage Δz_A und dessen Einfluss auf die Prozesssicherheit sowie die erforderliche Druckdifferenz. Durch die Größe des Greifers und die damit verbundene Verformung ist ein gewünschtes vollständiges Aufsetzen ($\Delta z_A \rightarrow 0$) schwer realisierbar. Weitergehend ist bei gestaffelter Aufnahme ein gewisser Sicherheitsabstand bereits haltender (saugender) Bereiche einzuhalten, um nicht darunterliegende, ungewünschte Teile des Schnittbildes anzusaugen. Zur Untersuchung der Zusammenhänge wird bei Variante B der Abstand des Greifsystems schrittweise erhöht und für die Referenzmaterialien jeweils der kleinste prozesssichere Differenzdruck ermittelt (zehn erfolgreiche Abhebeversuche). *Abbildung 99* zeigt die Ergebnisse.

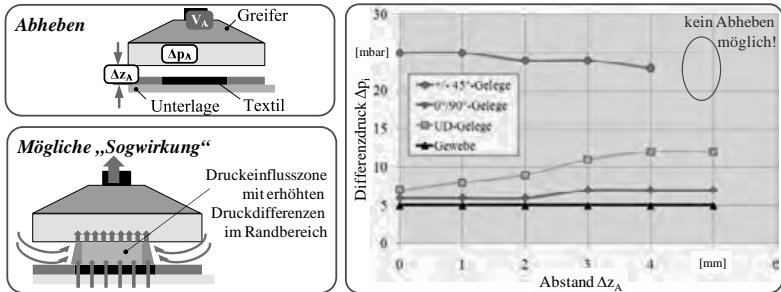


Abbildung 99: Einfluss des Abhebeabstands Δz_A auf den notwendigen Differenzdruck Δp_i (Variante B)

Während sich erwartungsgemäß für die Materialien $0^\circ/90^\circ$ -Gelege und UD-Gelege ein schwach steigender Differenzdruck bei höheren Abständen einstellt, weist das Gewebe trotz hoher Luftdurchlässigkeit keine Erhöhung auf. Bei dem am stärksten verhakten Material $\pm 45^\circ$ -Gelege ist paradoxerweise sogar ein leichter Rückgang des notwendigen Differenzdrucks ersichtlich, wobei ab 5 mm Abstand keine Aufnahme mehr möglich ist. Eine mögliche Erklärung für diesen Zusammenhang ist, dass durch die hohen notwendigen Differenzdrücke auch hohe Volumenströme entstehen, welche bei steigenden Abständen zunehmend auch durch Quereinströmung unter der Abschlussplatte gedeckt werden. Die hohe Strömungsgeschwindigkeit könnte durch eine Sogwirkung zu einer zusätzlichen Verstärkung des Unterdrucks gerade im Bereich der starken Verhakungen der Schnittkanten führen. Die anderen Materialien benötigen wesentlich kleinere Volumenströme, wodurch der Effekt hier nicht auftritt. Die explizite Untersuchung dieses Zusammenhangs liegt nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und ist somit in zukünftigen Forschungsarbeiten zu ermitteln. Bis zu dem untersuchten Abstand von 5 mm konnten bei der Vorgehensvariante B keinerlei Verschiebungen Δx_A sowie Δy_A gemessen werden. Abschließend wird ein optimaler Abstand von 2 mm empfohlen.

Zur Verbesserung der Absortierfähigkeit durch die Reduktion des notwendigen Differenzdrucks werden folgende Ansätze erarbeitet und stichpunktartig erprobt:

- **Erhöhung der Unterlagenpermeabilität:** Durch die Verminderung des Strömungswiderstands der Unterlage (Vlies) kann der Druckverlust und damit auch der einzustellende Differenzdruck signifikant um 20 – 30 % reduziert werden (vgl. Abbildung 96).

- **Lateralbewegung:** Nach dem Ansaugen des Zuschnitts werden kleine Lateralbewegungen parallel zur Textilebene ausgeführt, die die Verhakungen lösen sollen. Eine Verminderung der Rückhaltekräfte hierbei kann nicht festgestellt werden. Bei größeren Amplituden wird das Greifgut an der Schnittkante zerstört.
- **Umlaufender Unterdruckstoß an der Schnittkante:** Durch umlaufendes, kurzzeitiges Freigeben der Randöffnungen eines Zuschnitts sollen die Verhakungen in der Schnittkante gelöst werden. Dieser Effekt konnte leider nicht nachgewiesen werden. Zudem erhöht sich die Prozesszeit.

Es lässt sich konstatieren, dass das Greifsystem trotz erhöhter Differenzdrücke aufgrund von Verhakungskräften sehr gut in der Lage ist, Zuschnitte aus dem flächigen Verbund auch bei größeren Abständen prozesssicher abzuheben. Die Flexibilität des Systems resultiert in einer Reihe von möglichen Prozess- und Parametervariationen, wobei die Reduzierung der Verhakungskräfte sowie der Permeabilität der Unterlage die maßgeblichen, jedoch externen Stellhebel darstellen.

5.4.5 Prozessphase Transport

Die *Transportphase* beschreibt die Bewegung des Greifers mit gehaltenen Zuschnitt(en) vom Schneidisch zu einem Ablageort. Durch den eingestellten Differenzdruck ist dabei sicherzustellen, dass die notwendige Haltekraft bei unterschiedlichen Zuständen (Beschleunigung, Winkel) ausreichend hoch ist, um das Greifgut verschiebungsfrei zu transportieren. Eine undefinierte Verschiebung würde den Ordnungszustand des Zuschnitts in der Prozesskette aufheben und eine anschließende sensorielle Erfassung erforderlich machen. Die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge wurden bereits in *Abschnitt 4.4.2* beschrieben und sind nun experimentell abzusichern. Der Haftreibungskoeffizient μ_H zwischen Textil und Greifsystem wird auf Basis der Anforderungsermittlung auf ca. 0,1 festgesetzt (vgl. *Tabelle 3*).

Aus den *Gleichungen 5–7* und *5–11* lassen sich entsprechende, theoretisch notwendige, Prozessgrößen errechnen. Exemplarisch ist in *Abbildung 100* die erforderliche Haltekraft bzw. der dazu einzustellende Differenzdruck für ein Referenzmaterial ($^+ / 45^\circ$ -Gelege), in Abhängigkeit der Prozesswinkel und unter Annahme realistischer Randbedingungen, dargestellt. Während für das klassische Halten im waagrechten, unbeschleunigten Zustand des Greifers ($\varepsilon = 0^\circ$ und $\varphi = 0^\circ$) lediglich 3,1 N (0,38 mbar) aufzubringen sind, ergibt sich für das beschleunigte Bewegen ($a = 2,3 \text{ m/s}^2$) unter bestimmten Prozesswinkeln ($\varepsilon = 0^\circ$ und

$\varphi = 90^\circ$) eine Haltekraft von 25,7 N bei 3,16 mbar Druckdifferenz. Dies entspricht um nahezu eine Zehner-Potenz höhere Werte.

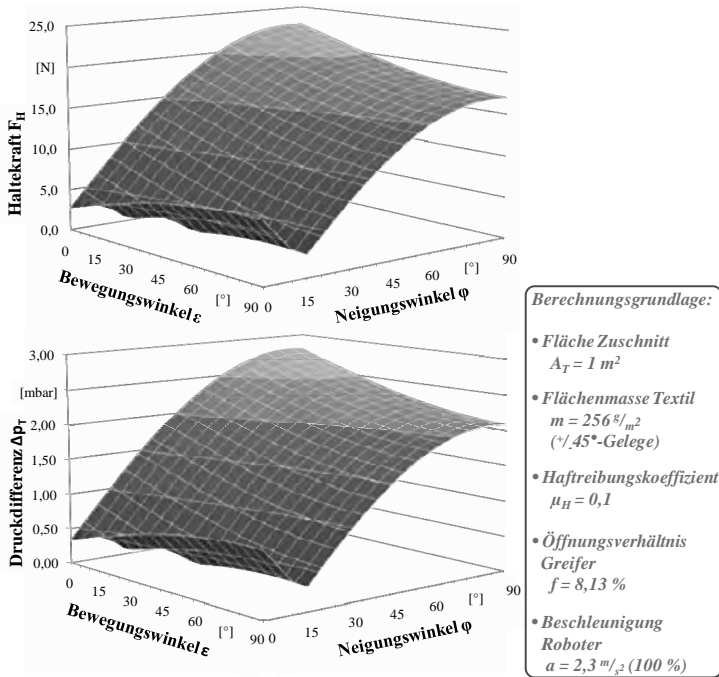


Abbildung 100: Analytisch ermittelte Abhängigkeit der notwendigen Haltekraft F_H bzw. Druckdifferenz Δp_T von den Prozesswinkeln ε und φ (Exemplarisches Beispiel)

Die aufgezeigten Abhängigkeiten verdeutlichen den signifikanten Einfluss des Neigungswinkels φ auf die erforderlichen Differenzdrücke und legen eine möglichst parallele Bewegungsart ohne Neigung des Greifers nahe. Der für ein sicheres Halten der textilen Halbzeuge ausreichende minimale Differenzdruck innerhalb des Systems $\Delta p_{i,min}$ wird weitergehend experimentell ermittelt, indem die Referenzmaterialien unter verschiedenen Bedingungen am Greifer gehalten bzw. transportiert werden und die entstehende Verschiebung Δx_T bzw. Δy_T gegenüber der Ausgangsposition gemessen wird. Unter Vernachlässigung der Druckverluste Δp_V durch die Abschlussplatte kann dieser Wert mit dem analytischen Pendant Δp_T verglichen werden. Für das ruhende, nicht geneigte Greifsystem lassen bereits Differenzdrücke in Höhe von 0,4 – 0,5 mbar ein Halten der Textilien zu (vgl. Abbildung 101). Darunter löst sich das Textil vom Greifer ab.

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

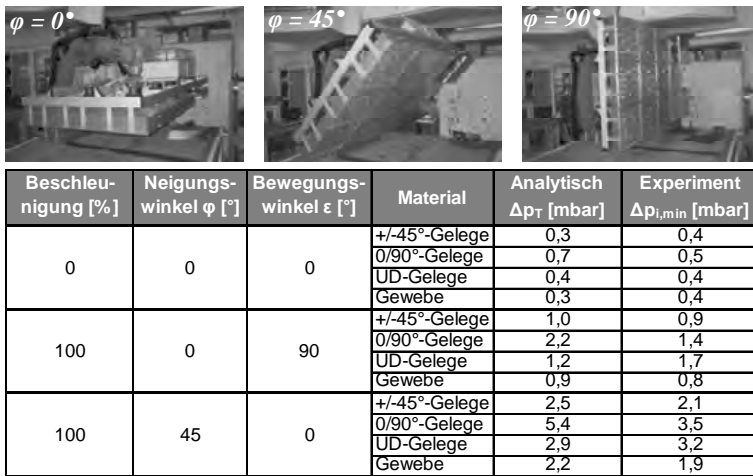


Abbildung 101: Experimentelle Ermittlung erforderlicher Differenzdrücke $\Delta p_{i,min}$ und Vergleich mit den analytischen Resultaten für Δp_T

Im beschleunigten Fall oder bei Neigung des Systems ergeben sich höhere Werte, die gerade im geneigten Fall hinter den analytisch berechneten Werten zurückbleiben. Ein Grund dafür ist die Verhakung des angesaugten Textils mit der belochten Greiferunterseite, insbesondere in dessen Bohrungen, wodurch eine wesentliche Erhöhung des Haftreibungskoeffizienten erreicht wird. Lediglich das UD-Gelege erfordert z. T. höhere Differenzdrücke als berechnet, da die hohe Anisotropie der Biegesteifigkeit bei geringen Neigungswinkeln zu einem abklappenden Löseverhalten führt, welches analytisch im Rahmen der Arbeit nicht erfassbar ist. Die für Referenzmaterialien und Prozessparameter ermittelten Verschiebungen steigen mit erhöhter Beschleunigung und sinkenden Differenzdrücken an, wie *Abbildung 102* beispielhaft zeigt.

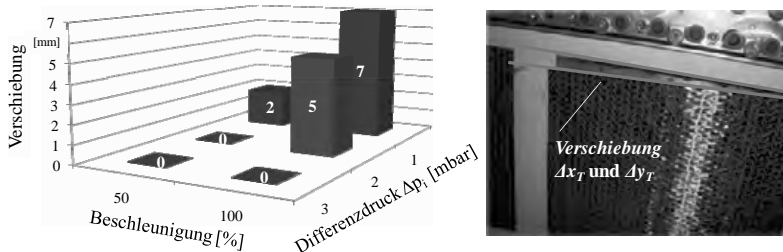


Abbildung 102: Verschiebungen bei unterschiedlichen Differenzdrücken (Material 0°/90°-Gelege, $\varepsilon = 0^\circ$ und $\varphi = 45^\circ$)

Die Leistungsfähigkeit des Greifsystems hinsichtlich der erzeugten Haltekräfte während der Transportphase lässt sich anschaulich durch die Ermittlung der *Querkraft* F_Q bestimmen. Hierzu wird ein Zuschnitt des Referenzmaterials UD-Gelege in der Größe eines Greifermoduls angesaugt, wobei sowohl die Saugfläche durch die Öffnung bestimmter Bohrungen als auch die aufgebrachte Leistung des Vakuumerzeugers variiert wird (vgl. *Abbildung 103*). Mit Hilfe eines Kraftmessers wird die verschiebungsfrei aufnehmbare Querkraft bestimmt, welche durch eine klemmende Vorrichtung möglichst gleichmäßig in die textile Struktur eingeleitet wird.

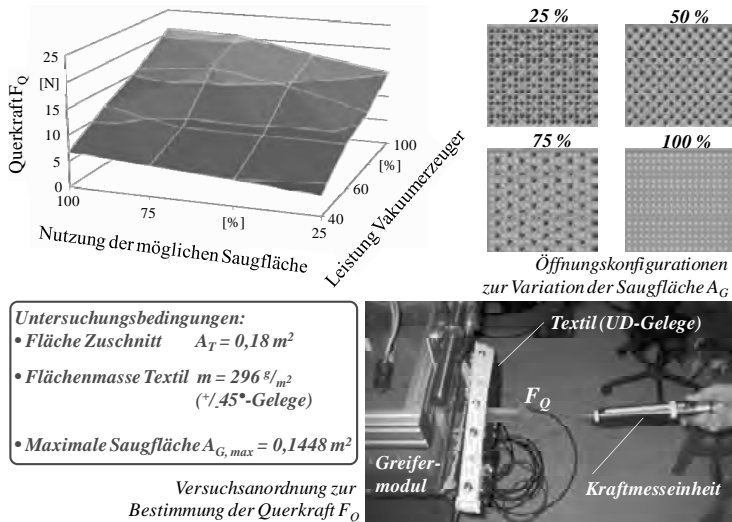


Abbildung 103: Bestimmung der aufnehmbaren Querkraft F_Q

Schon bei geringen Nutzungsgraden der möglichen Saugfläche (25 %) und kleinen Leistungsgraden des Vakuumerzeugers (40 %) lassen sich erhebliche Querkräfte von bis zu 4 N übertragen, ohne die textile Struktur zu beschädigen. Bezogen auf das geringe Eigengewicht des textilen Zuschnitts entspricht dies ca. der 8-fachen Gewichtskraft und ermöglicht somit theoretische Querbeschleunigungen des Greifsystems in Höhe der 8-fachen Erdbeschleunigung, was jedoch die Struktur des Gesamtsystems keinesfalls zulassen würde. Ein Verrutschen des Zuschnitts kann demnach durch entsprechende Differenzdrücke für relevante Transportszenarios prozesssicher verhindert werden. Mit steigender Saugfläche und Leistungsstufe des Erzeugers erhöht sich die ermittelte Querkraft kontinuierlich und es lassen sich hohe Werte von bis zu 21 N erreichen. Hier weist das Textil aber bereits eine erhebliche Beulenbildung durch die hohen

Differenzdrücke auf (vgl. *Abbildung 145; Anhang*), welche auch den Reibungskoeffizienten μ_H enorm auf Werte von ca. 0,6 „erhöhen“ (nicht mehr reine Reibung sondern z. T. Formschluss).

5.4.6 Prozessphase Ablegen

Die Prozessphase *Ablegen* stellt sicher, dass der gehaltene Zuschnitt exakt an der definierten Position vom Greifsystem gelöst wird. Der Vorgang bietet relativ wenige Freiheitsgrade, da lediglich der *initiale Differenzdruck* Δp_L und der eingestellte *Abstand* Δz_L zur Unterlage variiert werden kann. Weitergehend besteht die Option, das Lösen (Aufhebung der Haltekraft) durch eine Deaktivierung des Vakuumerzeugers (*integral*) oder durch Verschließen der zuschnittsspezifischen Bohrungen (*flächenspezifisch*) zu erreichen. Beide Prozessvarianten sollen im Folgenden betrachtet werden.

Wird der Vakuumerzeuger deaktiviert, so nimmt der für die Haltekraft verantwortliche *Differenzdruck* Δp_L am gesamten Greifermodul ab, indem Luft in den Greifer nachströmt. Unter anderem strömt die Luft dabei weiter durch die geöffneten Bohrungen und das noch haftende Textil nach. Dieses Vorgehen ist für das gleichzeitige Absortieren mehrerer Zuschnitt nur bedingt einsetzbar, da mehrere Zuschnitte innerhalb des Wirkungsfeld eines Erzeugers (Modul) nicht einzeln abgelegt werden können und der Zeitpunkt einer Ablösung nicht exakt zu definieren ist. Dies beeinflusst die angestrebte Systemflexibilität nachhaltig. *Abbildung 104* zeigt die ermittelte *Lösezeit* Δt_{AL} als Zeitspanne zwischen Deaktivierung des Vakuumerzeugers und dem Ablegen auf der Unterlage und somit maßgeblichen Teil der *Taktzeit* Δt_L dieses Prozessschrittes, in Abhängigkeit des initialen *Differenzdrucks* Δp_L .

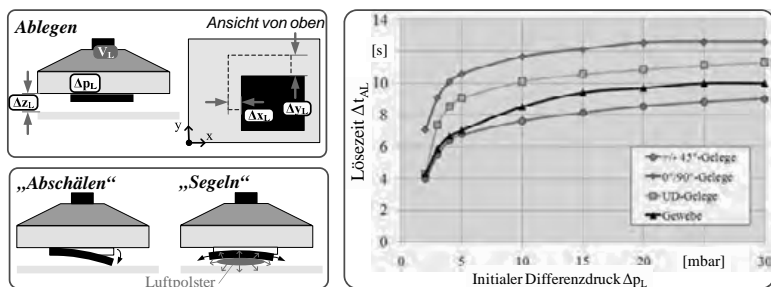


Abbildung 104: Ablöseverhalten beim Ablegen des Zuschnitt und Differenzdruckabhängige Lösezeiten bei Deaktivierung des Vakuumerzeugers

Selbst bei niedrigen Differenzdrücken im Bereich von 2 – 5 mbar ergeben sich erhebliche Lösezeiten von bis zu 10 s, was zu einer signifikanten Erhöhung der Taktzeit gegenüber einem flächenspezifischen Ablegen (ca. 1 - 2 s) führt (vgl. auch Prozesszeitanalyse in *Abschnitt 5.4.8*). Für die Referenztextilien lassen sich deutliche Unterschiede erkennen, indem aus identischen Drücken verschiedene Lösezeiten resultieren. Dies ist nicht nur auf ein differierendes Nachströmverhalten zurückzuführen, sondern hängt in komplexer Art und Weise von der Kombination der Materialkenngrößen *Luftdurchlässigkeit*, *Flächenmasse* und *Biegesteifigkeit* sowie der Prozessgröße *Abstand* Δz_L ab. Die Flächenmasse bestimmt, wie bereits aufgezeigt, den notwendigen Differenzdruck und die Biegesteifigkeit in Verbindung mit der Zuschnittsgröße das Ablöseverhalten. Während kleinere, steifere Zuschnitte bei ausreichendem Abstand auf einem entstehenden Luftpolster nach unten „segeln“, lösen sich extrem formlabile Materialien abschälend von der Greiffläche (vgl. *Abbildung 104*). In beiden Fällen kommt es jedoch bei entsprechenden Abständen zu erheblichen Verschiebungen Δx_L bzw. Δy_L und einer damit verbunden Prozessunsicherheit. Insbesondere das untersuchte unidirektionale Gelege (UD-Gelege) weist orthogonal zur Faserorientierung eine extrem kleine Biegesteifigkeit auf (vgl. *Tabelle 3*) und löst sich daher durch Abschälen schneller als das wesentlich luftdurchlässigere und schwere 0°/90°-Gelege.

Eine Untersuchung der Auswirkungen erhöhter Abstände des Greifers gegenüber einer luftdurchlässigen Unterlage während des flächenspezifischen Ablegens lässt erkennen, dass für die meisten Referenzmaterialien bis zu 10 mm Abstand noch prozesssicher möglich sind, während das UD-Gelege bereits bei Abständen größer 4 mm unzulässige Verschiebungen des Zuschnitts erzeugt. Auch dies ist auf das abklappende Löseverhalten dieses Halbzeugs zurückzuführen. Ein Einfluss des initialen Differenzdrucks ist nicht ersichtlich (vgl. *Abbildung 105*).

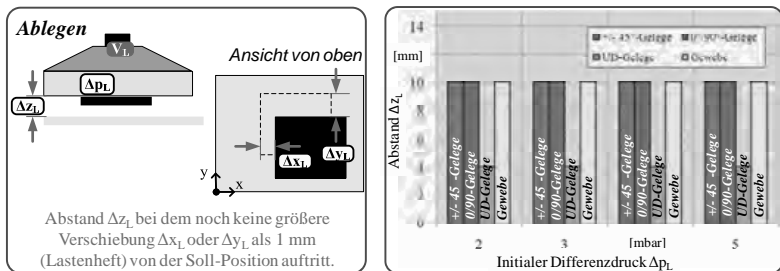


Abbildung 105: Einfluss des Abstands Δz_L und des initialen Differenzdrucks Δp_L auf die Verschiebungen Δx_L und Δy_L

Die flächenspezifische Ablegevariante durch Schließen der Bohrungen bei aktiviertem Unterdruckerzeuger verfügt somit über maßgebliche Vorteile in der erreichbaren Prozesszeit und bietet die Option, mehrere Zuschnitte aufzunehmen und diese einzeln prozesssicher abzulegen. Für die betrachteten Referenzmaterialien lässt sich ein maximaler Ablegeabstand zur Unterlage von 4 mm bestimmen. Ein vollständiges, planparalleles Aufsetzen des großflächigen Greifers ist aufgrund der Kollisionsgefahr mit der Unterlage als schwierig einzustufen. Weitergehend würde damit die Ablegeflexibilität eingeschränkt, indem noch am Greifer gehaltene, mit bereits abgelegten Zuschnitten in bestimmten Greiferpositionen kollidieren könnten. Die Gefahr, dass bereits abgelegte Zuschnitte durch nicht vollständig schließende Bohrungen wieder an den Greifer herangezogen werden, steigt mit höheren *Differenzdrücken* Δp_L (>10 mbar) sowie kleinerem *Abstand* Δz_L an und führt zu einem optimalen Abstandsbereich zwischen dreifacher *Textildicke* t_T (vgl. *Tabelle 3*) und maximal 4 mm. Auch sollte die Ablegeunterlage möglichst luftdurchlässig gestaltet werden, um die Prozesssicherheit und -taktzeit zu erhöhen (minimiertes Luftpolster).

5.4.7 Prozesssicherheitsanalyse

Da die negative Beeinflussung der Prozessqualität durch Verletzung der Materialintegrität bereits ausgeschlossen wurde (vgl. *Abschnitt 5.3*), folgt nun die Betrachtung der Prozesssicherheit des Absortierens durch die Analyse der erreichbaren Genauigkeiten und weiterer möglicher Fehlerquellen. Fokus der Untersuchung ist die Ermittlung der Kennzahlen *Prozesspotenzial* c_p und *-fähigkeit* c_{pk} (GRESSLER & GÖPPEL 2010, ROENPAGE ET AL. 2007) hinsichtlich der auftretenden *Verschiebungen* Δx und Δy gegenüber der Soll-Position an der Ablegestelle. Demzufolge werden für einen Zuschnitt die Verschiebungen auf dem Ablagetisch bei 40 Absortierprozessen gemessen und die entsprechenden Kennwerte für eine geforderte Genauigkeit von ± 1 mm (*U-/OSG – Untere/Obere Spezifikationsgrenze*) ermittelt (vgl. *Abbildung 106*). Nahezu alle 40 Versuchsläufe sind erfolgreich und der Zuschnitt wird unbeschadet mit einer Geschwindigkeit 30 % der Maximalgeschwindigkeit gehandhabt. Es wird hierbei jedoch ausschließlich das Kinematik-Greifer-System betrachtet, d. h. die aus dem Schneid- und Vorschubprozess resultierenden Ungenauigkeiten werden vernachlässigt.

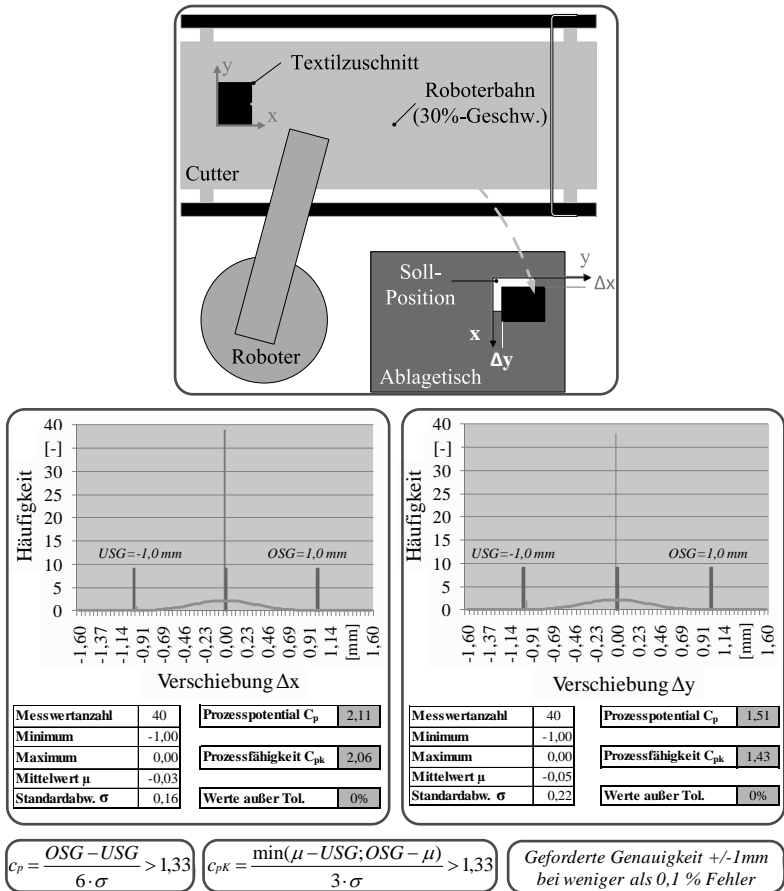


Abbildung 106: Ermittlung des Prozesspotenzials c_p und der -fähigkeit c_{pK} hinsichtlich der erreichbaren Absortiergenauigkeit (± 1 mm)

Der Prozess kann im Ergebnis für beide Verschiebungen als fähig betrachtet werden, da der jeweilige c_{pK} -Wert die Grenze von 1,33 übertrifft. Das Greifsystem ist also in der Lage, Zuschnitte prozesssicher innerhalb eines Toleranzbandes von ± 1 mm abzulegen, was hinsichtlich der Anforderungen als ausreichend zu bezeichnen ist. Durch genauere Messeinrichtungen zur Erfassung der Verschiebungen könnte diese Aussage noch präzisiert werden und auch auf die einzelnen Prozessphasen bezogen werden (Transport: Δx_T , Δy_T ; Ablegen Δx_L , Δy_L).

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Über die erreichbare Genauigkeit hinaus können über die gesamte Validierungsphase hinweg folgende mögliche Fehlerquellen und Unzulänglichkeiten ermittelt werden, welche letztlich Prozessrisiken darstellen:

- **fehlerhaftes Bewegen der Hubmagnete:** In ca. 1 % der Schließ- bzw. Öffnungsbewegungen der Aktoren kommt es zu Störungen, welche, falls die Bohrung in einem kritischen Bereich liegt (Rand, schmaler Streifen) zu Prozessfehlern führen. Ein fehlerhaftes Schließen ist auf ein Rückprallen des elastischen Pstopfens an der Bohrung (Einstellung der Aktorposition unzureichend) und ein missglücktes Öffnen auf zu geringe Magnetkräfte zurückzuführen.
- **Verschmutzung durch herausgelöste Filamentfragmente:** Durch das unterdruckbasierte Greifprinzip werden beim Schneidprozess entstehende Filamentfragmente aus dem Textil herausgelöst und verschmutzen das System. Eine Untersuchung von zehn Absortiervorgängen mit einem an der Unterseite des Greifers angebrachten Filtervlies ergeben bereits erhebliche Ansammlungen dieser Kontaminationen (vgl. *Abbildung 107*, links).
- **Verschieben abgelegter Zuschnitte durch geklemmte Filamente:** Im Laufe des Ablegeprozesses können eingesaugte Faserfilamente durch schließende Aktoren geklemmt werden, wodurch beim Anheben des Greifers der Zuschnitt verschoben bzw. sogar zerstört wird (vgl. *Abbildung 107*, rechts). Die Integration eines Filtervlieses löst diese Herausforderung und führt zu einem vertretbaren Reinigungsaufwand und einem Druckverlust von ca. 1-3 mbar.

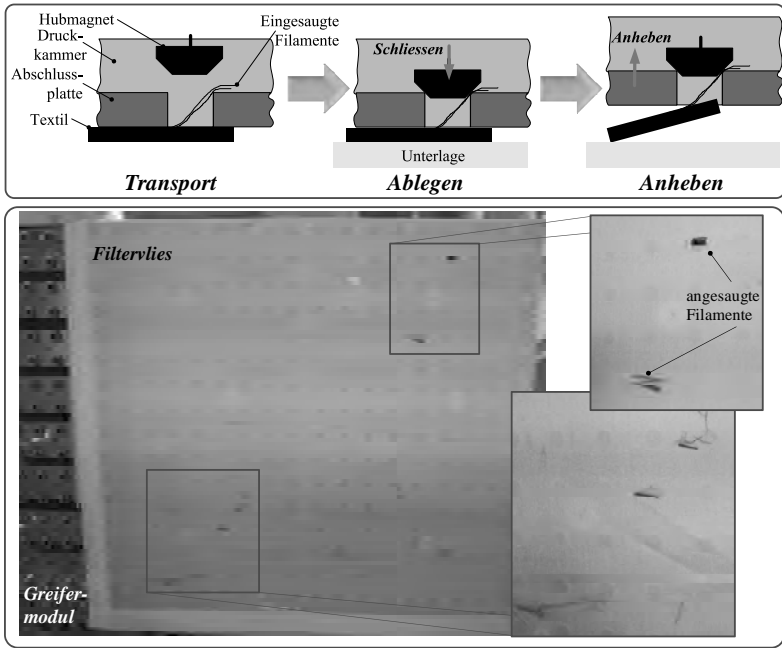


Abbildung 107: Prozessunsicherheiten: Verschmutzung durch herausgelöste Filamentfragmente (unten) und eingesaugte Filamente (oben)

Bestimmung der Geräuschemission

Der Einsatz von mehreren Vakuumerzeugern wirft die Fragestellung nach der Größe der Geräuschemission auf, welche durch die Durchführung einer Schalldruckpegelmessung untersucht wird. Hierzu werden mit einem geeigneten Messgerät der unbewertete Schalldruckpegel L_p in Abhängigkeit des Leistungslevels P_L und der Anzahl betriebener Vakuumerzeuger n_{vak} ermittelt (vgl. Abbildung 108). Die aufgenommen Messwerte ergeben aufgrund der Anwendung einer Pulsweitenmodulation zur Leistungsregelung einen schwankenden, mit der Leistung leicht ansteigenden Pegel, der sich gemäß der zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten mit steigender Anzahl an Geräuschquellen logarithmisch erhöht. Mit der zur Verfügung stehenden Leistungsversorgung können Spitzenwerte von 85 dB erreicht werden, welche bereits im typischen Leistungsbereich bei Verwendung des gesamten Greifsystems auftreten.

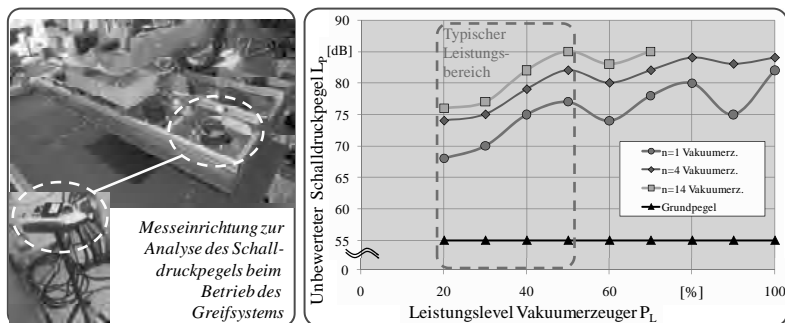


Abbildung 108: Messung des Schalldruckpegels zur Bestimmung der Geräuschemission

Gegenüber dem ermittelten Grundpegel in der Versuchsumgebung (55 dB) ist durch das Betreiben des Handhabungssystems eine deutliche Geräuschemission festzustellen, die zur Klassifizierung als Lärmbereich führt und den Einsatz persönlicher Schutzausrüstung nach sich zieht. Für die industrielle Anwendung stellt diese Geräuschemission keine besondere Problematik dar und kann ggf. durch Schalldämpfer und Einhausung weiter reduziert werden.

5.4.8 Prozesszeitanalyse

Die Erreichung der geforderten niedrigen Taktzeit beim Absortieren eines Zuschnitts bildet eine zentrale Bedingung bei der Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Greifsystems und wirkt sich nachhaltig auch auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems aus. Zunächst wird die initiale Taktzeit der einzelnen Prozessschritte gemessen, wobei zwischen den Systemen *Kinematik* und *Greifsystem* sowie zwischen den ausführenden Aggregaten zu unterscheiden ist. Bei einer rein seriellen (nacheinander-folgenden) Bearbeitung der Vorgänge werden, abhängig von der gewählten Ablegestrategie und unter der Annahme, dass alle Aktoren betätigt werden müssen, für einen einzelnen Zuschnitt Taktzeiten von ca. 120 s erreicht. Bereits bei Betrachtung der singulären Prozesse lassen sich erhebliche Optimierungen erreichen, die maßgeblich durch Erhöhung der Kinematik-Beschleunigung (30 % der Robotergeschwindigkeit) zu einer Halbierung der Taktzeit führen (vgl. *Abbildung 147* und *Abbildung 148*; *Anhang*). Bezogen auf das Greifsystem lässt sich durch eine Reduktion der Schaltzeit der Verschlussaktoren von 50 ms auf 20 ms eine erhebliche Verminderung der Einstelldauer der Greifkonfiguration erreichen. Versuchsreihen zeigen hier, dass die Fehlerhäufigkeit erst bei Impulsdauern unter 15 ms signifikant ansteigt, da dem Hubmagnet

die zum Schalten ausreichende Energie nicht mehr zugeführt werden kann. Die aufgezeigten Defizite beziehen sich maßgeblich auf den prototypischen Aufbau des Demonstrators und können bei einer späteren industriell einsetzbaren Anlage noch optimiert werden.

Weiteres Potenzial ergibt die Parallelisierung von Prozessschritten durch die Zusammenfassung zu den fünf in *Tabelle 6* dargestellten Sequenzen, in welchen die einzelnen Aggregate möglichst gleichzeitig arbeiten. Die Gesamttaktzeit lässt sich so für den worst-case (alle Aktoren sind zu betätigen) auf ca. 42 s reduzieren ($\Delta t_A=16,2$ s; $\Delta t_T=13,27$ s; $\Delta t_L=12,44$ s). Weitere, im Rahmen der Arbeit nicht zu realisierende Verkürzungsoptionen liegen in der Verbesserung der Steuerbefehle.

5.4 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Tabelle 6: Prozesszeitoptimierung durch Reduzierung der einzelnen Vorgänge und Parallelisierung von Prozessschritten

Seq.	Prozessschritt	Opt. [s]	Σ [s]	Seq. [s]	Sequenz	Kinematik	Greifsystem	Aggregat
	Anfahren Cutter	7,85	9,05					Achsen
1	Anfahren Zuschneit	1,20		12,44				Achsen
	Nachrichten verarbeiten	9,35	12,44					Software
	Greifkonfig. einstellen	3,09						Aktorik
2	Unterdruck aktivieren	2,00	2,00	3,75				Türhümmern
	Abheben	1,75	1,75					Achsen
	Anfahren Lagersystem	8,18	10,18					Achsen
3	Anfahren Ablageposition	2,00		10,18				Achsen
	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35					Software
4	Greifkonfig. einstellen	3,09	3,09	3,09				Aktorik
	Unterdruck deaktivieren	12,00	12,00					Türhümmern
5	Nachrichten verarbeiten	9,35						Software
	Greifkonfig. Reset	3,09	12,44	12,44				Aktorik
	Home-Pos. anfahren	1,18	1,18					Achsen
Gesamt:		73,48		41,90		Initial, nicht optimiert 121,93 s		
				41,90 s				

Anhand von drei Szenarios wird im Folgenden, auf Basis des realen Anwendungsfalles, die tatsächlich im Betrieb erreichbare Taktzeit je Zuschnitt abgeschätzt (vgl. *Abbildung 109*).

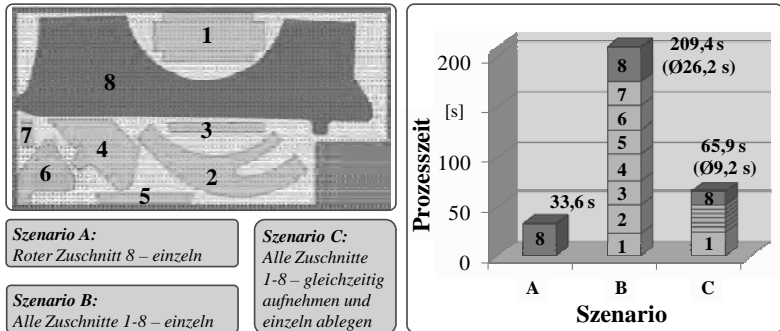


Abbildung 109: Szenarios zur Validierung der Taktzeit

Wird der großflächige Zuschnitt 8 einzeln entnommen (*Szenario A*), so müssen alle Prozessschritte durchlaufen werden und es lassen sich mit 33,6 s gegenüber der Soll-Taktzeit nur wenige Sekunden einsparen, indem lediglich zehn der 15 Module zu aktivieren sind. Werden alle Zuschnitte nacheinander absorbiert (*Szenario B*), ergeben sich durch die Nutzung unterschiedlicher, singulärer Module kleinere Taktzeiten je Zuschnitt (Ø 26,2 s), jedoch verbleibt der hohe Anteil an Transferzeiten. Werden alle Zuschnitte des Schnittbilds durch die Aktivierung von 14 Modulen gleichzeitig abgehoben und dann einzeln abgelegt (*Szenario C*), so lassen sich äußerst kurze Taktzeiten je Zuschnitt von ca. 9,2 s erreichen, wobei beim ersten Zuschnitt (1) die Aufnahme (*Initial.*, *Greifen*) und beim letzten Zuschnitt (8) das Abschalten (*Reset*, *Home*) enthalten ist. Das gesamte Schnittbild kann in ca. 65,9 s absorbiert werden, was im Bereich der Dauer des Schneidprozesses liegt, so dass eine hohe Systemauslastung erreicht werden kann. In allen Szenarios liegen die Taktzeiten je Zuschnitt deutlich unter den geforderten 60 s.

Die Dauer des manuellen Absortierprozesses ist im Vergleich dazu stark von der Position, den Abmessungen und der Komplexität der Zuschnittskontur abhängig, da der Werker die einzelnen Zuschnitte erreichen, vorsichtig herauslösen und handhaben sowie ablegen muss, wobei er ggf. Hilfsmittel bzw. einen zweiten Werker zur Unterstützung benötigt. Erfahrungswerte aus der industriellen Faserverbundfertigung weisen mittlere Absortierzeit je Zuschnitt von deutlich mehr als 60 s Sekunden aus. Dokumentations- und Prüfschritte verlängern diese Prozesszeiten zum Teil noch erheblich.

5.4.9 Energieverbrauchsanalyse

Unterdruckbasierte Greifsysteme werden in der industriellen Praxis oftmals aufgrund der beständigen Energiezufuhr für die Aufbringung der Haltekraft kritisch diskutiert (HESSE 1991). Speziell bei der Handhabung hochpermeabler Materialien, wie textiler Halbzeuge, müssen signifikante Volumenströme erzeugt werden. Die Energieverbräuche und -kosten werden daher bereits während der Auswahl des Greifprinzips in *Abschnitt 3.5.3* abgeschätzt und sind für das umgesetzte Greifsystem anhand einer Energieverbrauchsanalyse zu überprüfen.

Unter Einsatz spezieller Energiemesstechnik kann exemplarisch für das $0^\circ/90^\circ$ -Gelege die Leistungsaufnahme des Vakuumerzeugers P_{ev} für ein Greifermodul in Abhängigkeit vom entstehenden Differenzdruck Δp_i ermittelt werden (vgl. *Abbildung 110*). Die Messwerte lassen sich durch Flächenextrapolation sowohl auf die gesamte Greiffläche ($2,7 \text{ m}^2$) als auch spezifisch für einen Quadratmeter umrechnen. Zur Erzeugung einer ausreichenden Druckdifferenz von 10 mbar werden 0,62 kW durch das Greifsystem aufgenommen. Dies entspricht bei einem zugrunde gelegten Energiepreis von $0,09 \text{ €/kWh}$ Kosten von lediglich 1,34 € um einen Zuschnitt für 24 h am Greifer zu halten und liegt damit nahe an dem in *Abschnitt 3.5.3* abgeschätzten Wert.

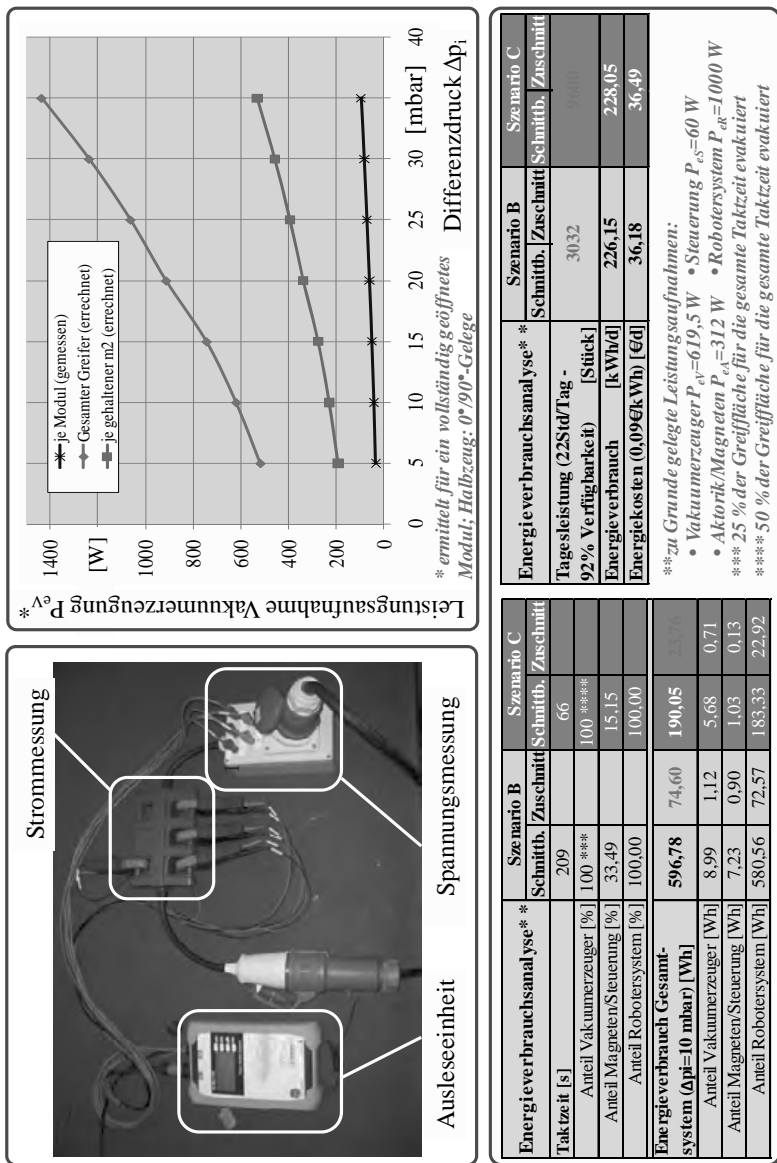


Abbildung 110: Messung und Analyse der Leistungsaufnahme der Vakuumzerger und Energieverbrauchsanalyse des Gesamtsystems (unten)

Bezieht man die Leistungsaufnahme auf die tatsächlichen Betriebsanteile (vgl. *Tabelle 6*) während der in *Abschnitt 5.4.8* dargelegten Szenarios B und C, lässt sich ein Rückschluss auf den Anteil des Vakuumerzeugers am Gesamtenergieaufwand zum Absortieren der Zuschnitte ermitteln (vgl. *Abbildung 110, rechts*). Szenario A findet keine Betrachtung, da kein vollständiges Schnittbild absortiert wird. Die Leistungsaufnahmen der Verschlussaktorik ($P_{eA}=312\text{ W}$), des Steuerungssystems ($P_{eS}=60\text{ W}$) und der Kinematik (*Roboter*: $P_{eR}=1,0\text{ kW}$) sowie die spezifischen Laufzeitanteile der Prozesse werden angesetzt und somit der Energieverbrauch abgeschätzt. Letztlich ergeben sich moderate Energieaufwände von 25 bzw. 75 Wh, wobei der maßgebliche Energieverbrauch in der Kinematikeinheit anfällt (ca. 97 %). Der Anteil des Vakuumerzeugers liegt je nach Prozessgestaltung zwischen 1,5 und 3,0 % und spielt daher gegenüber den Aufwänden für das Bewegen des Greifsystems eine untergeordnete Rolle.

Aus der Analyse lässt sich weitergehend ermitteln, dass das Absortiersystem mit einem abgeschätzten Tages-Energieverbrauch (22 Std.; 92 % Verfügbarkeit) von ca. 230 kWh (ca. 36 €) sehr effizient betrieben werden kann, während speziell das gleichzeitige Absortieren mehrerer Zuschnitte (Szenario C) erhebliche Betriebskostenvorteile durch die stark reduzierte Taktzeit aufweist. Der gemittelte Energieverbrauch je Zuschnitt liegt mit 24 Wh (0,22 Cent) um ca. 70 % unter dem Vergleichsszenario B.

5.5 Zusammenfassende Betrachtung der Anwendbarkeit

Zusammenfassend kann das erforschte Greifsystem als äußerst geeignet für den Referenzprozess des Absortierens von Faserverbundhalbzeugen betrachtet werden. In den einzelnen Prozessphasen wird durch das System die erforderliche Funktionalität unter Berücksichtigung der Zielgrößen *Leistungsfähigkeit* (Haltekräfte und Taktzeit), *Qualität* (Integrität und Genauigkeit) und *Wirtschaftlichkeit* (Betriebskosten) erreicht. Durch die automatisierte Adaptionsfähigkeit der zentralen Prozessgrößen *Greiffläche* und *Haltekraft* ist die Technologie als hochflexibel einzustufen. Hinsichtlich des industriellen Einsatzes des realisierten Forschungsdemonstrators gilt es, die Themenkomplexe Verschmutzung, Dichtigkeit und Montierbarkeit der Komponenten weiter zu optimieren.

Der Greiftechnologie kann daher im Hinblick auf das bisher nicht automatisiert gelöste Absortieren eines Schneidtisches ein sehr hohes Potenzial zugeordnet werden.

6 Analyse der Systemrelevanz

6.1 Technische Bewertung anhand potenzieller Szenarios der industriellen Nutzung

Aufbauend auf der erfolgten Validierung der Systemeigenschaften anhand des Anwendungsfalles und der erarbeiteten prototypischen Lösung innerhalb des Demonstratoraufbaus wird in diesem Abschnitt die darüber hinausgehende Relevanz der Technologie diskutiert. Vor dem Hintergrund der in *Kapitel 1* skizzierten Aufgabenstellung ist zu untersuchen, wie das erarbeitete Greifsystem industriell genutzt werden kann und welche potenziellen Einsatzfelder sich technisch sowie wirtschaftlich bieten. Schwerpunkt der Evaluierung ist nach wie vor das Umfeld der Faserverbundtechnik, jedoch kann die Breitenwirksamkeit der Technologie durch eine Erweiterung des Betrachtungsraums auf ähnliche Materialien und Prozesse umfassender beleuchtet werden (vgl. *Abschnitt 6.3*).

6.1.1 Kleinst-Serienfertigung

Faserverbundwerkstoffe werden bisher zu einem großen Teil in sehr kleinen Stückzahlen für Nischenanwendungen eingesetzt. Dementsprechend charakterisiert ein vielfältiges, auftragsbezogenes Produktspektrum bei ungleichmäßiger Kapazitätsauslastung die zumeist Kleinst-Serien-orientierte Fertigung der betroffenen Hersteller und Dienstleistungsunternehmen (z. B. Rennsport, Bootsbau). Vor diesem Hintergrund ist ein Anwendungsszenario zu entwerfen, welches die notwendigen Anlageninvestitionen bei gleichzeitig hoher Flexibilität durch Integration weiterer Prozessschritte reduziert. Die im Rahmen dieser Arbeit thematisierte flächenselektive Greiftechnologie kann hierzu sowohl zum Absortieren der entsprechenden Zuschnitte von einem automatisierten Schneidtablett, als auch zur Weiterverarbeitung in einem Preforming-Prozess eingesetzt werden. In parallelen Forschungsarbeiten konnte die Greiftechnologie zu einem Preforming-System für das Legen und Drapieren von FVK-Textilien weiterentwickelt werden (REINHART & EHINGER 2010). Diese Entwicklung kann entweder durch einen dementsprechenden Wechselkopf oder durch einen Doppel-End-Effektor mit der erforschten Handhabungstechnik kombiniert werden, um ein kostengünstiges und flexibel einsetzbares Robotersystem darzustellen (vgl. *Abbildung 111*). Letzterer wird ebenfalls in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsarbeiten realisiert und erfolgreich erprobt, kann jedoch nicht dezidiert beschrieben werden. Insbesondere die Automatisierung der Generierung von Ansteuerungs- und Bahnbefehlen stellt bei diesen extrem kleinen Stückzahlen ein essentielles

6.1 Technische Bewertung anhand potenzieller Szenarios der industriellen Nutzung

Kriterium für die Anwendbarkeit dar. Lediglich die Größe der zu handhabenden Zuschnitte ist bei diesen Systemen eingeschränkt. Prinzipiell ist die Preforming-Technologie auch singulär zur Handhabung der Textilien in der Lage, jedoch kann keine flächenspezifische Ausprägung der Haltekraft erzeugt werden, die dem Prozess des Absortierens gerecht wird. Weitergehend wäre es denkbar, in diesem Umfeld ausschließlich den Prozessschritt des Absortierens zu automatisieren und aufgrund der Komplexität der Folgeprozesse diese weiterhin durch qualifiziertes, flexibles Fachpersonal durchzuführen.



*Konzept
Doppel-End-Effektor zum
Absortieren und Legen*



*Realisierter Prototyp an
KUKA KR-60im Versuchsbetrieb
(Messepräsentation)*



*Absortieren (oben)
und Legen (unten)
von CF-Zuschnitten*

Abbildung 111: Doppel-End-Effektor für integriertes Preforming

6.1.2 Variantenreiche Kleinserienfertigung

Insbesondere in der Luftfahrtindustrie (z. B. Verkehrsflugzeuge, Hubschrauber) herrschen extrem variantenreiche Produktionsrandbedingungen, da die Jahresstückzahl der zu fertigenden Produkte meist im zweistelligen und unterem dreistelligen Bereich liegt. Die technische Komplexität jedoch erzeugt eine hohe Anzahl an unterschiedlichen Einzelkomponenten und Geometrien. Das Produktionsszenario ist damit ähnlich komplex wie im vorhergehenden Fall, jedoch besser planbar und entspricht in weiten Teilen dem skizzierten Referenzszenario dieser Arbeit. Das Absortieren technischer Textilien und auch spätere Prozessschritte wie das Preforming können somit durch spezialisierte Systeme dargestellt werden, müssen aber hinsichtlich der verarbeitbaren Geometrien und Materialien flexibilisiert werden. Dementsprechend kann die erarbeitete Technologie in einem Roboter-Greifersystem, ähnlich dem erzeugten Prototypen, umgesetzt und beispielsweise durch ein Preforming-System erweitert werden (REINHART & EHINGER 2010), welches die Zuschnitte direkt nach dem Vereinzeln aufnimmt (vgl. *Abbildung 112*).

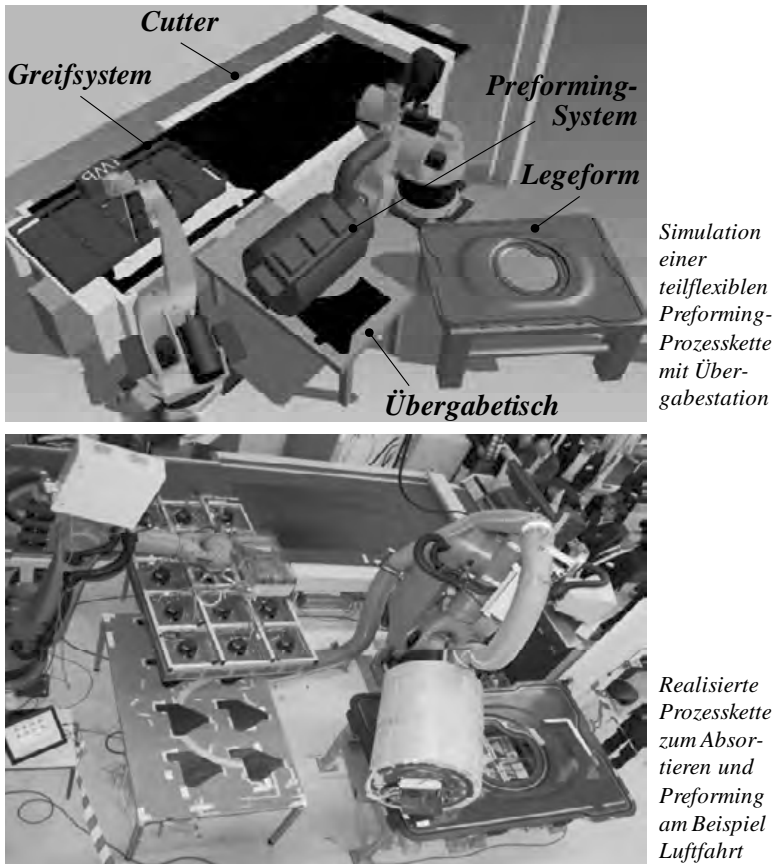


Abbildung 112: Direkte Absortier-Preforming-Prozesskette

6.1.3 Voll-automatisierte Serienfertigung

Zukünftige Fertigungsstrukturen für Faserverbundbauteile müssen maßgeblich auch für die Anforderungen der automobilen Serienfertigung ausgelegt werden und sind daher hinsichtlich der Produktionsleistung, Taktzeit und Systemauslastung zu optimieren. Ein derartiges Szenario impliziert eine voll-automatisierte Prozesskette, deren Einzelsysteme einen hohen Spezialisierungsgrad aufweisen. Ein auf der erforschten Greiftechnologie basierendes Absortiersystem kann in diesem Umfeld entweder roboterbasiert oder durch ein Portalsystem dargestellt werden und über eine hohe Produktionsleistung verfügen (vgl. Abbildung 113).

6.1 Technische Bewertung anhand potenzieller Szenarios der industriellen Nutzung

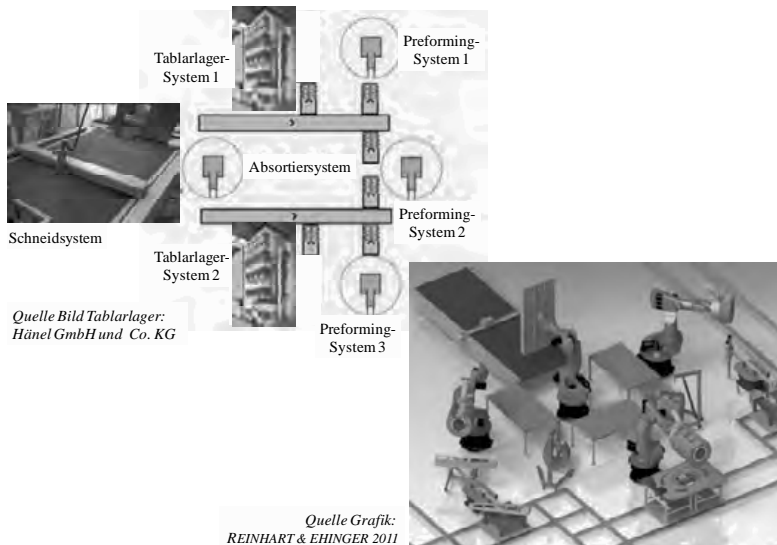


Abbildung 113: Indirekte, voll-automatisierte Preforming-Prozesskette
(optimiert hinsichtlich der Produktionsleistung)

Die Auslastung aller Subsysteme wird durch deren mehrfachen Einsatz erreicht. Weitergehend wird der Materialverbrauch bei einer auf Durchsatz optimierten Fertigung zu einem gewichtigen Faktor, so dass die optimierte Ausnutzung des Halbzeugs eine der dominierenden Zielgrößen wird. Da demzufolge nicht zwangsläufig in Weiterverarbeitungsreihenfolge absortiert werden kann, sind Zwischenlagerungssysteme wie beispielsweise Tablarlager und automatisierte Verkettungseinrichtungen in die Prozesskette zu integrieren. Maßgeblich für die Integrationsfähigkeit in ein derartiges Szenario ist eine hohe Prozesssicherheit der Einzelprozesse, was nach den dargelegten Untersuchungen für das Greifsystem realisiert werden kann. Speziell die Durchtrennungssicherheit des Schneidsystems muss für ein voll-automatisiertes Absortieren gewährleistet werden. Weitergehend kann das Greifsystem datentechnisch in übergeordnete Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme eingebunden werden, was dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz entspricht.

Durch die technische Bewertung der unterschiedlichen Szenarios wird erkennbar, dass die erforschte Greiftechnologie vielfältig einsetzbar ist und die Handhabung, insbesondere aber das Absortieren von FVK-Textilien automatisierbar macht.

6.2 Wirtschaftliche Bewertung

Nach der Betrachtung der technischen Einsetzbarkeit der Greiftechnologie werden nun die wirtschaftlichen Randbedingungen diskutiert. Hierzu ist eine monetäre Bewertung der Automatisierung manueller Absortierprozesse in der Faserverbundfertigung durchzuführen. Basis ist hierbei eine Wirtschaftlichkeitsberechnung bzw. Investitionsrechnung (HOFFMEISTER 2000, KRUSCHWITZ 2003), um anhand exemplarischer, jedoch realistischer Szenarios die kommerziellen Faktoren hinsichtlich der Entscheidung zur Anwendung des Greifsystems zu beleuchten. Letztlich ist die Wirtschaftlichkeit im industriellen Umfeld essentiell und entscheidet neben der technischen Qualifizierung über die Relevanz einer Technologie bzw. Systemtechnik. Im Vorfeld der Analyse sind folgende grundlegenden Fragestellungen zu behandeln:

6.2.1 Rahmenbedingungen der wirtschaftlichen Bewertung

Berechnungsverfahren: Aus der Literatur sind eine Fülle von unterschiedlichsten Berechnungsverfahren bekannt (DÄUMLER & GRABE 2007, LAU 2010). Die bereits angewendete Nutzwertanalyse (NWA) ist als mehrdimensionale Methode einsetzbar, um neben der Wirtschaftlichkeit auch weitere Aspekte bei einer Investitionsentscheidung zu betrachten (ROSS 2002), jedoch ist an dieser Stelle eine ausschließlich monetäre und damit eindimensionale Betrachtung zu führen. Hierbei kann zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden werden (DÄUMLER & GRABE 2007). Während z. T. komplexe, dynamische Ansätze durch Diskontierung auch die zeitliche Entwicklung der Kostenanteile berücksichtigen (WARNECKE 2003), stellen statische Verfahren eine schlanke, von der Unternehmung losgelöste Variante dar und werden daher ausgewählt. Die sehr verbreitete *Statische Amortisationsrechnung* zeigt hierbei plakativ, nach welchem Zeitraum der Kapitaleinsatz für eine Investition bzw. Automatisierung über die Erlöse zurückgeführt wird (LOTTER & WIENDAHL 2006), wobei das Produktionsszenario oftmals nicht verändert wird. Da jedoch das Potenzial des Greifsystems durch den Vergleich unterschiedlicher Szenarios zu analysieren ist, schafft die ergänzende *Montagestückkostenkalkulation* eine zielkostenorientierte Entscheidungshilfe, welche die Leistungsfähigkeit des Systems berücksichtigt.

System- und prozesstechnischer Betrachtungsraum: Der Betrachtungsraum folgt hierbei der festgelegten Abgrenzung der vorliegenden Arbeit und fokussiert damit die aus Greifsystem sowie Kinematik bestehende Handhabungstechnik und folglich auch den Absortierprozess (vgl. *Abschnitt 2.2.2*). Vor- und nachgelagerte Schritte werden als gegeben bzw. gleichbleibend angenommen. Eine umfassende

6.2 Wirtschaftliche Bewertung

Analyse der Wirtschaftlichkeit eines gesamten Preforming-Centers liefert HENNING ET AL. (2008).

Szenarios und Annahmen: Für das Absortieren von Faserverbundtextilien nach dem Schneidprozess werden in Anlehnung an den Referenzfall (vgl. *Abschnitt 3.2.4*) und die beschriebenen Einsatzmöglichkeiten drei automatisierte (A, B, C) und drei manuelle Szenarios (D, E, F) diskutiert (vgl. *Tabelle 7*).

Tabelle 7: Szenarios und Annahmen zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Szenario	Produktionsleistung	Personalaufwand	Theoret. Einsatzfeld
A Automatisierte Kleinserienfertigung (BRD)	<ul style="list-style-type: none"> • 1-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage a 8 h • Jahres-Nutzungszeit 2000 h bei 100 % Verfügbarkeit • Taktzeit 60 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Betreuung Gesamtanlage (Stundensatz 40 €/h) • Ohne Schichtzulage 	• Kleinserienfertigung in der BRD bei einem OEM oder Dienstleister mit geringen Stückzahlen (z. B. Bootsbau, Rennsport)
B Automatisierte, Serienfertigung (BRD)	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage a 16 h • Jahres-Nutzungszeit 4000 h bei 100 % Verfügbarkeit • Taktzeit 30 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Betreuung Gesamtanlage (Stundensatz 40 €/h) • Mittlere Schichtzulage 10 €/h 	• Serienfertigung in der BRD bei einem OEM oder Dienstleister mit mässigen Stückzahlen (z. B. Luft- und Raumfahrtindustrie)
C Voll-Automatisierte, leistungsopt. Serienfertigung (BRD)	<ul style="list-style-type: none"> • 3-Schicht-Betrieb • 300 Arbeitstage a 24 h • Jahres-Nutzungszeit 7000 h bei 97,2 % Verfügbarkeit • Taktzeit 15 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Betreuung Gesamtanlage (Stundensatz 40 €/h) • Mittlere Schichtzulage 20 €/h 	• Serienfertigung bei einem OEM oder Dienstleister mit hohen Stückzahlen (z. B. Automobilindustrie)
D Manuelles Absortieren in der Kleinserienfertigung (BRD)	<ul style="list-style-type: none"> • 1-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage a 8 h • Jahres-Nutzungszeit 2000 h bei 100 % Verfügbarkeit • Taktzeit 60 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Anlagenbetreuung (Stundensatz 40 €/h) • 1 MA Absortieren (Stundensatz 30 €/h) • Ohne Schichtzulage 	• Kleinserienfertigung in der BRD bei einem Dienstleister oder OEM mit geringen Stückzahlen (z. B. Bootsbau, Rennsport)
E Manuelles Absortieren in der Serienfertigung (BRD)	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage a 16 h • Jahres-Nutzungszeit 4000 h bei 100 % Verfügbarkeit • Taktzeit 30 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Anlagenbetreuung (Stundensatz 14 €/h) • 1 MA Absortieren (Stundensatz 30 €/h) • Mittlere Schichtzulage 10 €/h 	• Serienfertigung in der BRD bei einem Dienstleister oder OEM mit geringen Stückzahlen (z. B. Luft- und Raumfahrtindustrie)
F Manuelles Absortieren in der Serienfertigung (Niedriglohnland)	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Schicht-Betrieb • 250 Arbeitstage a 16 h • Jahres-Nutzungszeit 4000 h bei 100 % Verfügbarkeit • Taktzeit 60 s pro Zuschnitt 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 MA Anlagenbetreuung (Stundensatz 14 €/h) • 1 MA Absortieren (Stundensatz 10 €/h) • Mittlere Schichtzulage 3 €/h 	• Manuelle Serienfertigung in einem Niedriglohnland bei einem Dienstleister oder OEM mit mässigen Stückzahlen (z. B. Ausl. Zulieferer oder OEM)

Investitionsbedarf zur Automatisierung (*Wiederbeschaffungswert K_{WB}*)

Grundlegend wird bei unterschiedlichen Schichtmodellen davon ausgegangen, dass die Gesamtanlage unabhängig vom Automatisierungsgrad von einem Mitarbeiter (MA) überwacht und gerüstet werden muss (z. B. Rüsten Halbzeug, Bereitstellung Transportbehälter).

Der Investitionsbedarf für das automatisierte Handhabungssystem wird anhand von Relationsvorgaben von BINDEL & HOFMANN (2009) sowie der Erfahrungen aus der Realisierung des Demonstrators abgeschätzt und ist für die verschiedenen Szenarios A – C näherungsweise identisch. Dabei ergibt sich für das Gesamtsystem ein *Wiederbeschaffungswert K_{WB}* von 400 T€ welcher sich in folgende Kostenpositionen gliedern lässt:

• Hardware Greifsystem (2,5 m x 1,2 m):	80 T€
• Kinematikeinheit (z. B. Industrieroboter):	70 T€
• Anwendungssoftware (Anbindung Cutter usw.):	20 T€
• Schutzeinrichtungen und Umzäunung:	20 T€
• Engineering (Konzeption und Konstruktion):	170 T€
• <u>Anbahnung, Montage und Inbetriebnahme:</u>	<u>40 T€</u>
• Gesamt:	400 T€

Betriebskosten

Tabelle 8 zeigt die Berechnung der jährlichen Betriebskosten der verschiedenen Szenarios, welche zusammen mit dem Investitionsbedarf die Grundlage für die Ermittlung der Amortisationszeit darstellt. Es wird davon ausgegangen, dass für die manuellen Szenarios D – F keinerlei Investitionen notwendig sind und somit die Betriebskosten lediglich aus Raum- und Personalkosten (PK) bestehen.

Tabelle 8: Berechnung der Betriebskosten des Handhabungssystems

Berechnung der Betriebskosten			Szenario					
Kenngrößen	Formel	Einheit	A	B	C	D	E	F
Kalkulatorische Zinsen ¹	$K_{WB} / 2 \cdot p$	[€]	20.000	20.000	20.000	-	-	-
Instandhaltungskosten ²	$K_{WB} \cdot i$	[€]	16.000	32.000	48.000	-	-	-
Energiekosten ³		[€]	1.000	6.000	10.500	-	-	-
Raumkosten ⁴	$A_{AB} \cdot k$	[€]	600	600	600	600	600	300
PK Anlagenbetreuung	K_{P-A}	[€]	10.000	200.000	420.000	80.000	200.000	98.000
DE: Abschreibungen	K_{P-A}	[€]	-	-	-	60.000	160.000	97.000
Betriebskosten	$\sum (K_Z, K_{WB}, K_{WB}, K_{P-A})$	[€]	119.000	288.000	499.100	140.600	360.600	129.300

¹ Zinssatz $p = 10\%$ (Halber Wiederbeschaffungswert) (LOTTER & WIENDAHL 2006)

³ Energiekosten $K_E = 1,5 \text{ €/h}$ (vgl. Energieverbrauchsanalyse 5.4.9)

² Instandhaltungssatz i in Abhängigkeit der Nutzungsvariante (A $\rightarrow 4\%$; B $\rightarrow 8\%$; C $\rightarrow 12\%$) (LOTTER & WIENDAHL 2006)

⁴ Raumkostenansatz $k = 60 \text{ €/m}^2$ bei Flächenverbrauch $A_{AB} = 10 \text{ m}^2$ (nach BINDEL & HOFMANN 2009) ($k = 30 \text{ €/m}^2$ für Niedriglohnland)

Nach LOTTER & WIENDAHL (2006) ist zur Ermittlung der *Kalkulatorischen Zinsen* K_Z der halbe Wiederbeschaffungswert K_{WB} heranzuziehen, wobei szenario-unabhängig ein Zinssatz von 10 % angenommen wird. Die *Instandhaltungskosten* K_I hängen von der Nutzungsvariante ab und werden mit einem jährlichen Anteil i am Wiederbeschaffungswert von 4 % im 1-Schicht-Betrieb, 8 % im 2-Schicht-Betrieb und 12 % im 3-Schicht-Betrieb angesetzt. Die *Energiekosten* K_E sind auf Basis der Energieverbrauchsanalyse überschlägig mit 1,50 €/für jede Betriebsstunde berechnet (vgl. Abschnitt 5.4.9). Der *Flächenverbrauch* A_{AB} des Gesamtsystems ist mit 10 m^2 unabhängig vom Automatisierungsgrad angenommen. Mittels eines *Raumkostenansatzes* k von 60 €/m^2 (Niedriglohnland 30 €/m^2) ergeben sich somit die jährlichen *Raumkosten* K_R (BINDEL & HOFMANN 2009). Den maßgeblichen Anteil der Betriebskosten stellen jedoch die *Personalkosten* K_P dar und es wird schnell der Kostenvorteil durch die Herstellung in einem Niedriglohnland deutlich, wobei für diese Abschätzung zusätzlich

entstehende Kosten für Transport, Mitarbeiterqualifizierung oder Qualitätssicherung sowie erhöhte Anbahnungskosten nicht berücksichtigt werden.

6.2.2 Berechnung statischer Amortisationszeiten der Automatisierungsinvestitionen

Die *statische Amortisationszeit* AZ_S für die Automatisierung des manuellen Absortierens auf Basis der Greiftechnologie stellt den Zeitraum dar, in welchem der *Investitionsbedarf* K_{WB} durch die anhängigen jährlichen *Betriebskosten-* bzw. *Erlösvorteile* ES refinanziert werden können (vgl. Gl. 6–1):

$$AZ_S = \frac{K_{WB}}{ES} = \frac{K_{WB}}{K_{B,Auto} - K_{B,Man}} \quad (6-1)$$

Die Amortisationszeit für die Automatisierung des manuellen Szenarios D mittels Substitution durch das Szenario A ergibt sich zu 19,0 Jahren (Szenario A) und ist damit für die industrielle Anwendung inakzeptabel. Bei der Anwendung von Szenario B an Stelle der manuellen Variante E kann eine Amortisationszeit von 3,9 Jahren erreicht werden, wobei durch die Automatisierung zusätzlich eine höhere Produktionsleistung erreicht werden kann, die hier nicht berücksichtigt ist. Dieser Wert liegt an der Schwelle zur industriellen Umsetzbarkeit (typisch 3 Jahre; vgl. auch ROSS 2002), überzeugt aber nicht vollständig von der Wirtschaftlichkeit des Greifsystems. Die Szenarien C und F können durch die höheren Betriebskosten des Szenarios C nicht mit dieser Methode verglichen werden.

Zusammenfassend lässt sich für die Amortisationsrechnung festhalten, dass bei kleinen Stückzahlen und der resultierenden geringen Auslastung des Systems kaum erhebliche Kostenvorteile gegenüber der manuellen Handhabung erreicht werden können. Erst bei vollständiger Nutzung der Leistungsfähigkeit des Systems in Szenario B kann ein signifikanter wirtschaftlicher Vorteil erreicht werden, der jedoch nicht in der Betrachtung der Amortisationszeit abbildbar ist.

6.2.3 Berechnung der Montagestückkosten

Verschiedene Montageszenarios können durch die Ermittlung der *Montagestückkosten* K_{ST} verglichen werden (LOTTER 1992). Die notwendigen Eingangsgrößen entsprechen zum Großteil den bereits beschriebenen Annahmen und werden zu den beiden relevanten, Nutzungszeit-bezogenen Kostensätzen verrechnet – dem *Maschinenstundensatz* K_{MH} und dem *Personalkostensatz* K_P , welche die *Montagekosten* K_M bestimmen (vgl. Tabelle 9). Indem diese auf die *Nettoleistung* (*Produktionsleistung*) N_L bezogen werden, lassen sich die tatsächlichen Stückkosten

ermitteln und bilden somit eine kostenbezogene Vergleichsgröße der Varianten, wodurch letztlich Rückschlüsse auf die wirtschaftliche Anwendung der Greiftechnologie möglich sind.

Tabelle 9: Berechnung der Montagestückkosten

Berechnung der Montagestückkosten				Szenario			
Kenngrößen	Formel	Einheit	A	B	C	D	E
Eingangsrößen							
Erreichbare Stückzahl	$n_B \cdot N_L$	$\frac{[Stk]}{[J]}$	120.000	480.000	1.680.000	120.000	240.000
Wiederbeschaffungswert	K_{WB}	[€]	400.000	400.000	400.000	-	-
Nutzungsdauer	N_D	[a]	8	8	8	8	8
Nettoarbeitszeit	E_Z	$\frac{[h]}{[a]}$	2.000	4.000	7.000	2.000	4.000
Nettolohnsatz	N_L	$\frac{[€]}{[h]}$	60	120	240	60	60
Maschinenludensatz							
Kalkül Abschreibung	K_A	$\frac{K_{app} \cdot N_D}{K_Z}$	50.000	50.000	50.000	-	-
Kalkulatorische Zinsen ¹	K_Z	$K_{app} / 2 \cdot p$	20.000	20.000	20.000	-	-
Instandhaltungskosten ²	K_I	$K_{app} \cdot i$	16.000	32.000	48.000	-	-
Energiekosten ³	K_E	$\frac{A_{ab} \cdot k}{[h]}$	3.000	6.000	10.500	-	-
Raumkosten ⁴	K_R	$A_{ab} \cdot k$	600	500	600	600	300
Maschinenludensatz	K_{ML}	$\Sigma (K_A, K_Z, K_I, K_E, K_R) / E_Z$	44,80	27,15	18,44	0,30	0,08
Personalkostensatz							
Mitarbeiter Anlagenbet.	$P_{GA,B}$	[Stk]	1	1	1	1	1
PK-satz Anlagenbet.	$K_{P,B}$	$\frac{P_{GA,B}}{[h]}$	40	50	60	40	50
Mitarbeiter Absorbieren	$P_{GA,A}$	[Stk]	-	-	-	1	1
PK-satz Absorbieren	$K_{P,A}$	$\frac{P_{GA,A}}{[h]}$	30	40	50	30	40
PK-satz Gesamt	K_P	$\Sigma ((m_{GA,B} \cdot K_{P,B}) + (m_{GA,A} \cdot K_{P,A}))$	40,00	50,00	60,00	70,00	90,00
Montagekosten	K_M	$\Sigma K_{ML} \cdot K_P$	84,80	77,15	78,44	70,30	90,15
Montagestückkosten	K_{ST}	K_M / N_L	1,41	0,54	0,43	1,17	0,50

¹ Zinssatz $p = 10\%$ (Halber Wiederbeschaffungswert) (LOTTER & WIEVENDahl 2006)

³ Energiekosten $K_E = 1,5 \frac{€}{kWh}$ (vgl. Verbrauchsanalyse 5.4.9)

² Instandhaltungssatz i in Abhängigkeit der Nutzungsvariante ⁴ Raumkostensatz $k = 60 \frac{€}{m^2}$ bei Flächenverbrauch $A_{ab} = 10 m^2$ (A $\rightarrow 4\%$; B $\rightarrow 8\%$; C $\rightarrow 12\%$) (LOTTER & WIEVENDahl 2006) (nach BUNDEL & HOFMANN 2009) ($k = 30 \frac{€}{m^2}$ für Niedriglohnland)

Analog zur Amortisationsrechnung ergibt sich für eine Automatisierung mit geringen Stückzahlen kein Kostenvorteil. Szenario A erreicht bei einer angenommenen Nutzungszeit der Anlagentechnik von acht Jahren einen Stückkostensatz von $1,41 \frac{€}{Stk}$. Hier ist die manuelle Variante (Szenario D: $1,17 \frac{€}{Stk}$)

erheblich wirtschaftlicher. Bei den manuellen Szenarios kann eine Erhöhung der Produktionsleistung nur durch die Verlängerung der Nutzungszeit und damit auch der täglichen Arbeitszeit erreicht werden, so dass Mehrkosten u. a. durch Schichtzulagen entstehen, die zu einer beträchtlichen Verteuerung der Stückkosten führen (Szenario E: $1,50 \text{ €/Stück}$). Eine Verlagerung der Fertigung in Niedriglohnländer (Szenario F) schafft erhebliche Reduktionspotenziale durch Senkung der Stundensätze und es lassen sich deutlich wirtschaftlichere Stückkosten von $0,50 \text{ €/Stück}$ erreichen. Durch den hohen Anteil Investitions-bedingter und damit Stückzahl-unabhängiger Faktoren (Abschreibung und Zinsen) sowie der Reduktion der Personalkostensätze führt eine Erhöhung der Produktionsleistung bei einem automatisierten Handhabungssystem zu einer deutlichen Stückkostensenkung (Szenario B: $0,64 \text{ €/Stück}$). Wird die Greiftechnologie in einem optimal automatisierten Umfeld eingesetzt (Szenario C), lassen sich weitergehend, durch die Verkürzung der Taktzeiten auf 15 s, hohe Jahresstückzahlen erreichen, welche die Stückkosten auf den niedrigsten Wert von $0,33 \text{ €/Stück}$ senken.

Der grundlegenden Motivation der Arbeit kann somit Rechnung getragen werden. Die auf der erforschten Greiftechnologie basierte Automatisierung ist unter diesen Rahmenbedingungen wirtschaftlicher als eine Verlagerung der Produktion in ein Niedriglohnland. Die ermittelte Kostenstruktur zeigt aber weitergehend, dass bei Erhalt der Wirtschaftlichkeit keine erheblichen Mehrinvestitionen in die Handhabungstechnik möglich sind. Die Flexibilität der erforschten Greiftechnik und die umfassende Einsetzbarkeit für unterschiedlichste Konturen und Materialien sind somit der Schlüssel für eine wirtschaftliche Automatisierung von Handhabungsprozessen in der Faserverbundindustrie.

6.3 Weitere mögliche Einsatzfelder und Anwendungen

Der bisherige Fokus für das erarbeitete Greifsystem kann durch die Betrachtung weiterer möglicher Einsatzfelder erweitert und deren Anwendbarkeit abgeschätzt werden. Eine Anwendung wird in Bezug auf Greifsysteme maßgeblich durch das zu handhabende Material und die durchzuführenden Aufgabenstellung beschrieben. Flächige, formlabile Materialien spannen nach der Definition in *Abschnitt 1.3.1* ein sehr breites und diffuses Spektrum auf und gehen weit über die bisher betrachteten Faserverbundtextilien hinaus. WÖGERER ET AL. (2005) und SAADAT & PING (2002) liefern jeweils einen strukturierten Überblick über industriell relevante Materialklassen und zugehörige Anwendungen, was bereits in *Abschnitt 2.3* zur Einteilung der analysierten Systeme angewendet wird (vgl. auch *Tabelle 2*). Aus diesen Vorarbeiten kann für die Abschätzung der Einsatzbereiche ein relevantes Material- und Anwendungsspektrum abgeleitet werden (vgl. *Abbildung 114*), für welches im nächsten Schritt beispielhafte Materialien ausgewählt und analysiert werden. Die Untersuchungen genügen dabei, vor dem Hintergrund der großen Materialpalette, nicht dem Anspruch der Vollständigkeit und stellen einen heuristischen Ansatz dar, mögliche Einsatzfelder zu identifizieren bzw. grundsätzliche Problematiken aufzuzeigen. Für fundierte Aussagen sind umfassende Versuchsreihen notwendig, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht darstellbar sind.

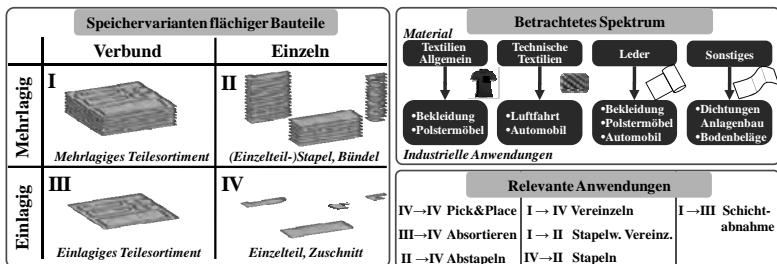


Abbildung 114: Betrachtetes Materialspektrum und relevante Anwendungen auf Basis möglicher Speichervarianten

6.3.1 Einfacher Transport – Pick&Place

Zur Evaluierung der grundlegenden Anwendbarkeit des Greifsystems werden 30 unterschiedliche Materialien untersucht. Darunter befinden sich neben dem Fokus der textilen Faserverbundhalbzeuge (4 Prepreg, 8 trockene Gelege/Gewebe), acht Textilien, zwei Lederapplikationen und acht sonstige Werkstoffe differierender Flächenmassen und Luftdurchlässigkeiten (vgl. *Abbildung 115*).

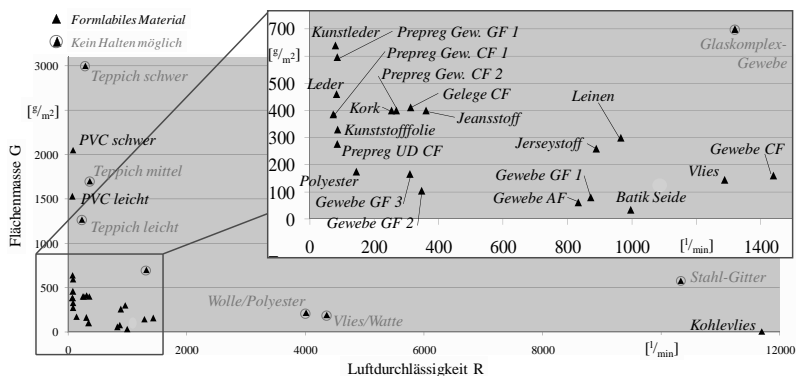


Abbildung 115: Eigenschaftsspreizung (Luftdurchlässigkeit R , Flächenmasse G) untersuchter Materialien und Anwendbarkeit des Greifsystems

Es wird untersucht, welche Materialien durch das Aufbringen einer ausreichenden Haltekraft gegriffen werden können. Hierzu werden die vereinzelt Probekörper durch das System aufgenommen und wieder abgelegt (Pick&Place). Für lediglich sieben der untersuchten Proben kann nicht genügend Haltekraft erzeugt werden, so dass kein Handhaben möglich ist (77 % Erfolgsquote). Zum einen betrifft dies sehr luftdurchlässige Materialien mit einer hohen Flächenmasse ($R > 2000 \text{ l}/\text{min}$; z. B. Stahl-Gitter; Ausnahme leichtes Kohlevlies mit $8 \text{ g}/\text{m}^2$) und zum anderen schwere Materialien, deren Oberflächentextur hohe Fehlluftbeiträge zulässt (z. B. Teppiche). Für diese Halbzeuge ist mit der Leistungsfähigkeit des Demonstratorsystems keine der aufgeführten Anwendungen möglich. Nahezu alle textilen Halbzeuge sowie die lederbasierten Körper können jedoch erfolgreich gegriffen werden und erreichen im Durchschnitt 88 % der möglichen Bewertungspunkte (Kriterien u. a.: Strukturveränderung, Positionsgenauigkeit), wobei es bei sehr formlabilen Materialien, wie beispielsweise Batik-Seide, zu erheblicher Beulenbildung kommt (vgl. *Abbildung 149*; *Anhang*). Sehr gute Ergebnisse lassen sich mit luftundurchlässigen Stoffen wie beispielweise Prepreg, Kunststoffolie oder Leder erreichen (REINHART & STRÄBER 2011).

6.3.2 Absortieren formlabiler Bauteile

Die Systemfähigkeit, flächenspezifisch zu greifen, wurde für die Greiftechnologie bereits erfolgreich nachgewiesen, so dass theoretisch für alle transportierbaren Materialien auch ein Absortieren möglich sein müsste. Stichprobenartig werden hierzu über die Referenzmaterialien hinaus zehn Halbzeuge unterschiedlicher Materialklassen zugeschnitten und absortiert. Das applikationsbedingte Auftreten von Verhakungskräften ist zum Teil jedoch so erheblich, dass die Materialien *Gewebe AF*, *Prepreg Gew. GF 1*, *Prepreg UD CF* und *PVC* schwer nicht prozesssicher absortiert werden können. Die Verhakungskräfte steigern bei den qualifizierten Halbzeugen den erforderlichen Differenzdruck maßgeblich (um bis zu 1800 %, vgl. *Abbildung 116*).

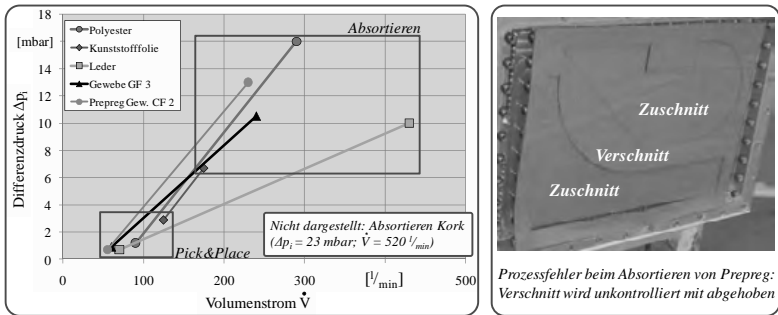


Abbildung 116: Verschiebung der Prozessfenster beim Absortieren (links) und Prozessfehler beim Absortieren von Prepreg (rechts)

Das Absortieren von Prepreg-Zuschnitten wird durch Adhäsionskräfte zwischen den Schnittteilen erschwert und bereits kleine Undichtigkeiten der einzelnen Verschlussaktoren erzeugen bei dem luftundurchlässigen Verschnitt ausreichende Haltekräfte, so dass dieser mit angehoben wird. Entsprechendes vollständiges Abdichten oder der Einsatz von Niederhaltern könnten hier Abhilfe schaffen.

6.3.3 Abstapeln bzw. Stapeln

Die Fähigkeit, Lagen eines mehrlagigen Stapels zu vereinzeln, hängt von der Luftdurchlässigkeit des Materials ab, wird aber nach SPIEGELMACHER (1991) und KOCH (1992) zudem maßgeblich von der Höhe der Verhakungskräfte zwischen den Lagen bestimmt. Besonders das mechanische Durchtrennen mehrlagiger Textilstapel führt zu großen Verhakungen an der Schnittkante, so dass im Folgenden lediglich der lockere, unverhakte Schichtaufbau analysiert wird. Während für luftundurchlässige Materialien (*Leder*, *Prepreg*, *Kunststofffolie*) das Abstapeln einer Schicht mittels des erarbeiteten Greifsystems unproblematisch ist, mehrere Schichten gleichzeitig aber nicht vereinzelt werden können, stellt das gezielte Abnehmen einer oder mehrerer Schichten bei permeablen Halbzeugen eine Schwierigkeit dar. Der Wirkungsbereich der Haltekraft bzw. des Unterdrucks ist nicht eindeutig abgrenzbar und der Luftstrom durchströmt so mehrere Lagen. Eine Untersuchung des Zusammenhangs des eingestellten *Leistungslevels des Vakuumsystems* P_L und der Anzahl an vereinzelt Lagen zweier Referenzmaterialien ($0^\circ/90^\circ$ -Gelege, UD-Gelege) ergibt, dass sich mit steigender Leistung durchaus mehrere Lagen vereinzeln lassen (vgl. *Abbildung 117*).

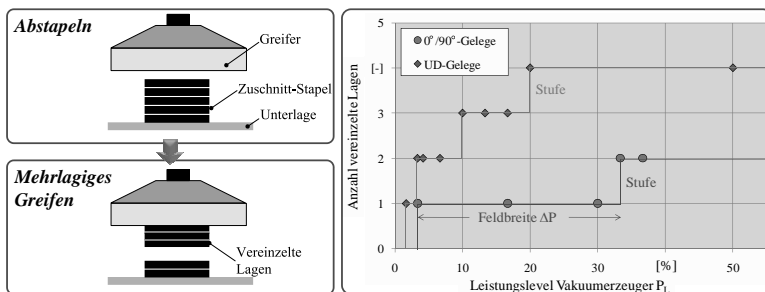


Abbildung 117: Voruntersuchung zur Abhängigkeit der Anzahl vereinzelter Lagen und des Leistungslevels des Greifsystems

Bei kleinerer Luftdurchlässigkeit und Flächenmasse (UD-Gelege) können bereits infolge geringer Leistungsgrade mehrere Lagen angehoben werden. Die Prozesssicherheit, gezielt einzelne Lagen herauszunehmen, ist jedoch gerade im Grenzbereich (Stufe, vgl. *Abbildung 117*) nicht gegeben, da z. T. die gewünschte Anzahl nicht gehalten wird. Je breiter das Leistungsfeld (ΔP) für eine bestimmte Anzahl von Lagen ($0^\circ/90^\circ$ -Gelege), desto höher ist die erreichte Prozesssicherheit.

Das Stapeln der Zuschnitte ist problemlos möglich, wenn die Sollposition auf dem Stapel orthogonal von oben angefahren wird, um Verschiebungen der bereits bestehenden Lagen im Stapel zu vermeiden.

6.3.4 Stapelweise Vereinzeln

Ein Vorgehen zur Erhöhung der Produktionsleistung von Faserverbundbauteilen ist das mehrlagige Schneiden und Weiterverarbeiten von textilen Halbzeugen. Diese werden vor dem Schneidprozess in der gewünschten Schichtung gestapelt und z. T. punktuell untereinander fixiert. Die prozesssichere Handhabung – und damit auch die stapelweise Vereinzelnung eines unfixierten Stapels – ist nur dann möglich, wenn die luftundurchlässigste Schicht unten angeordnet wird, bzw. Leistung in ausreichender Höhe durch das Greifsystem erzeugbar ist, damit beim Durchströmen des gesamten Stapelaufbaus noch genügend Differenzdruck erzeugt werden kann. Ist dies nicht der Fall, werden punktuelle Fixierungen eingebracht, die eine Verbindung der Einzellagen während des Vereinzlungsprozesses herstellen und somit die Anwendung des Greifsystems ermöglichen (vgl. *Abbildung 118*).

In einer stichpunktartigen Untersuchung wird festgestellt, dass das Greifsystem den Vereinzlungsprozess erfolgreich bewerkstelligen kann, vorausgesetzt, die Durchtrennung des mehrlagigen Verbunds ist von ausreichender Güte. Weder die Strukturintegrität noch die notwendige Prozesszeit von weniger als 60 s weisen auf Probleme hin. Dies zeigt gleichzeitig die Leistungsfähigkeit des Systems, da der permeable Lagenaufbau in den Untersuchungen aus Multiaxialgelege bzw. -gewebe mit einem Gesamtflächengewicht von maximal $3000 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ besteht. Auch ein folgendes Stapeln der Einzelstapel kann erfolgreich bewerkstelligt werden.

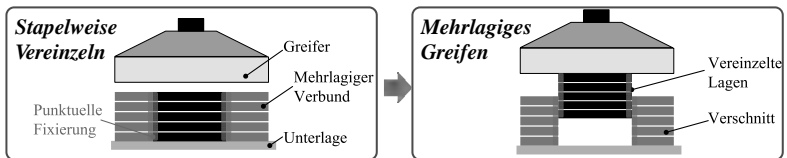


Abbildung 118: Stapelweises Vereinzeln aus dem mehrlagigen Teilesortiment

6.3.5 Weitere mögliche Anwendungen

Die gezielte Abnahme einer einzelnen Schicht ($I \rightarrow III$) sowie das Vereinzeln von Zuschnitten aus dem mehrlagigen Verbund ($I \rightarrow IV$) sind mit dem Greifsystem bei dem Auftreten von Verhakungskräften nicht prozesssicher möglich (vgl. *Abbildung 114*). Der Transport (Pick&Place) eines einlagigen Teilesortiments ($III \rightarrow III$) sowie eines Stapels ($II \rightarrow II$) ist durch das Greifsystem bei entsprechender Leistungsbereitsstellung und Schichtung (luftundurchlässigste Lage unten) möglich. Bei luftundurchlässigen Materialien können keine mehrlagigen Gebilde gehandhabt werden.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Systemrelevanz

Die erforschte Technologie ist anhand des realisierten Greifsystems in unterschiedlichsten Szenarios einsetzbar. Die Wirtschaftlichkeit des Systemeinsatzes hängt jedoch maßgeblich von dessen Auslastung ab. So können bei einer reinen Substitution der manuellen Prozesse ohne Erhöhung der Produktionsleistung kaum Kostenvorteile erreicht werden, wie die durchgeführte Amortisationsrechnung zeigt. Wird die Greiftechnik in einem voll-automatisierten Umfeld eingesetzt, lässt sich über die technischen Vorteile hinaus auch eine deutliche Stückkostensenkung erreichen, welche trotz erheblicher Investitionskosten die Wirtschaftlichkeit rechtfertigt. Über das Absortieren von technischen Textilien in Faserverbundhalbzeugen hinaus, kann das System zur Handhabung vielfältiger flächiger, formlabiler Bauteile aus unterschiedlichsten Materialien eingesetzt werden, wobei unterschiedlichste Aufgaben darstellbar sind. Das prozesssichere Verarbeiten mehrlagiger, hochluftdurchlässiger Materialien bildet hier eine bisher nicht gelöste Schwierigkeit. Die Breitenwirksamkeit der Technologie ist somit in großem Maße gegeben, womit die Relevanz sowohl für den hinterlegten Anwendungsfall als auch darüber hinaus als hoch einzuschätzen ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Potenzial innovativer Werkstoffe wie Faserverbundkunststoffe lässt sich für den Produktionsstandort Deutschland nur durch eine automatisierte Fertigung gewinnbringend nutzen. Insbesondere die automatisierte Handhabung von textilen Vorprodukten zwischen Einzelprozessen und der Montage derartiger Strukturen aus konturvariablen Zuschnitten stellt bisher eine im industriellen Umfeld ungelöste Aufgabenstellung dar. Trotz vielfältiger technischer Ansätze fehlt es bisher im Speziellen an geeigneten Greifsystemen, die den hohen Flexibilitäts- und Qualitätsforderungen des variantenreichen Fertigungsumfelds gerecht werden. Unter anderem das formlabile und permeable Materialverhalten der neuartigen Werkstoffgruppe schaffen hierbei Rahmenbedingungen, bei denen gängige Entwicklungsvorgehen sowie etablierte Lösungen an ihre Grenzen stoßen.

Die vorliegende Arbeit leitet aus dieser Aufgabenstellung die Zielsetzung ab, sowohl eine einsetzbare, hochflexible Greiftechnologie zu erforschen, als auch ein allgemeingültiges, auf der Auswahl eines geeigneten Wirkprinzips basierendes Entwicklungsvorgehen für derartige Systeme zu hinterlegen. Die Schwerpunkte der Vorgehensmethode bilden dabei die Ableitung von Anforderungen aus den vorliegenden Randbedingungen der Faserverbundfertigung sowie die strukturierte Sammlung und Evaluierung potenzieller Wirkprinzipien. Die Entwicklung und die Anwendung des Vorgehens werden hinsichtlich eines anwendungsnahen Referenzszenarios aus der Luftfahrtindustrie erarbeitet, anhand dessen das umgesetzte Greifsystem im Anschluss validiert werden kann. Gewählt wird das flächenselektive Vereinzeln (Absortieren) textiler Zuschnitte vom Schneidsystem, welches derzeit kostenintensiv z. T. durch mehrere Mitarbeiter unter nicht-ergonomischen und nicht-reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt wird. Die Prozesssicherheit und -dokumentationsfähigkeit ist hier nur eingeschränkt gegeben.

Zunächst werden die einzelnen Arbeitsschritte bei der Entwicklung eines Greifsystems aus gängigen Entwicklungsmethoden abgeleitet und an die gegebene Aufgabenstellung adaptiert. Die Folgerung erforderlicher Funktionen und die Definition von spezifischen Anforderungen auf Basis eines vorliegenden Material- sowie Produktspektrums und dem gewünschten Handhabungsprozess bilden die Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Greifprinzips. Hierbei kommt der Ermittlung von belastbaren Kriterien anhand der Materialeigenschaften verschiedener Halbzeuge eine entscheidende Rolle zu. Methoden zur Sammlung und Vorauswahl einsetzbarer Prinzipien werden erarbeitet und ein umfassendes Bewertungsvorgehen auf Basis der Nutzwertanalyse vorgestellt. Hierbei bilden experimentelle Untersuchungen und die erweiterte Bewertung des

zugrunde liegenden Wirkprinzips anhand realisierter Mustergreifer wichtige Kernelemente.

Die Konzeptionsphase wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit für das Wirkprinzip Niederdruckflächensaugen beschrieben und ist im Detail nur eingeschränkt auf andere Prinzipien übertragbar, obwohl die durchgeführte Modularisierung und das chronologische Vorgehen verallgemeinerbare Methoden darstellen. Jedoch bildet die erarbeitete Spezifikation einzelner Module des Greifsystems eine umfassende Betrachtung der Möglichkeiten und Randbedingungen bei der Gestaltung, welche durch analytische Auslegungsgrundlagen beispielsweise der Abschlussplatte bzw. des Vakuumerzeugers vertieft wird. Letztlich wird ein detailliertes Konzept für ein hochflexibles Greifsystem zum flächenselektiven Absortieren von z. T. großflächigen, textilen Zuschnitten vorgestellt, das die aufgezeigte Lücke in der verfügbaren Systemtechnik zum automatisierten Handhaben in der Faserverbundfertigung schließt. Eine erste Absicherung des Konzepts gelingt durch ein Funktionsmuster in kleinem Maßstab.

Anhand der Randbedingungen aus dem Referenzszenario wird das Konzept folglich prototypisch umgesetzt. Es entsteht ein roboterbasierter End-Effektor mit einer evakuierbaren Greiffläche von 2,25 m x 1,2 m. Dieser weist durch die Integration von 4320 verschleißbaren Öffnungen die Funktionalität auf, eine konturselektive Haltekraft auf einzelne Zuschnitte aufzubringen, um diese aus dem flächigen Verbund zu vereinzeln. Neben der mechanischen Realisierung wird ein komplexes softwareunterstütztes Steuerungssystem erforscht, das die entsprechenden Zuschnitts- und Materialdaten für die automatisierte Rekonfiguration (Greiffläche und Positionierung) und Regelung (Differenzdruckregelung) des Greifsystems nutzt.

In der folgenden Validierungsphase können neben dem Nachweis der Funktionserfüllung wichtige Informationen zur Leistungsfähigkeit (z. B. Haltekraft, Taktzeit) und Flexibilität des Greifsystems gewonnen werden. Hierzu wird der Absortierprozess in die Phasen Aufnehmen, Transport und Ablegen unterteilt und diese einzeln evaluiert. Die erreichte Handhabungsqualität übertrifft hinsichtlich der erforderlichen Materialintegrität (Werkstoff und textile Struktur) die Anforderungen erheblich und lässt weitergehend eine gute Reproduzierbarkeit zu. Dies wird in einer Prozessfähigkeitsuntersuchung nachgewiesen. Eine Untersuchung des Energieverbrauchs und Abschätzung der Betriebskosten zeigt die effiziente Arbeitsweise des Systems und die diesbezüglich untergeordnete Relevanz gegenüber dem Verbrauch der erforderlichen Kinematikeinheit auf.

Über das Referenzszenario hinaus hat die Greiftechnologie eine hohe Relevanz, da unterschiedlichste Materialsysteme innerhalb und außerhalb der Faserverbundtechnik erfolgreich hinsichtlich diverser Aufgaben (z. B. Pick&Place, Vereinzeln, etc.) verarbeitet werden können. Lediglich die Kombination aus hohem Flächengewicht und hoher Luftdurchlässigkeit sowie mehrlagige Systeme aus permeablen Zuschnitten schränken die Anwendbarkeit des Greifsystems ein. Aufbauend auf der technischen Analyse des Greifsystems wird die Wirtschaftlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Szenarios nachgewiesen. Eine Kostenreduzierung gegenüber manuellen Prozessen ist lediglich bei hohen Automatisierungsgraden und Nutzung der erreichbaren Produktionsleistung durch Auslastung der Systeme möglich. Unter diesen Rahmenbedingungen lässt sich hinsichtlich der Montagestückkosten sogar ein erheblicher monetärer Vorteil gegenüber der manuellen Fertigung in Niedriglohnländern erreichen, was der ursprünglichen Motivation der Arbeit genügt.

Basierend auf der vorliegenden Arbeit gilt es, im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten die Greiftechnologie auch für andere Materialsysteme wie Prepreg oder mehrlagige Stapel zu qualifizieren. Zudem sollte das Anwendungsfeld auf die nachfolgende Prozesskette ausgedehnt werden, indem sowohl Preforming-Prozesse (Montage der Zuschnitte) als auch weitere Handhabungsaufgaben verschiedenster Vorprodukte (z. B. Preform, Rohteil, etc.) auf dieser Basis automatisiert werden. Zunehmend wird auch die Integration von Inline-Prozessüberwachungseinrichtungen, wie beispielsweise bildoptische Systeme, in der Handhabungstechnik an Relevanz gewinnen, um die industrielle Anwendbarkeit des Greifsystems zu steigern. Durch entsprechende Verfahren sollten zukünftig Prozessfehler wie unzureichende Schnittqualität bzw. Durchtrennungssicherheit oder Materialbeschädigung frühzeitig erkannt und bestenfalls vermieden werden. Andere Schneidverfahren wie beispielsweise das Ultraschallschneiden weisen insbesondere bezogen auf die Integrität der Schnittkante erhebliche Vorteile auf (GROßMANN ET AL. 2010), welche es zukünftig zur Vereinfachung der Handhabungsaufgaben zu nutzen gilt.

Auch die vorgestellte Methode ist auf differierende Materialsysteme auszuweiten (z. B. luftundurchlässiges und formsteifes Prepreg, mehrlagige Stapel etc.), wobei insbesondere Randbedingungen, wie der Alterungszustand der mit harzversetzten Halbzeuge, zu berücksichtigen ist. Der Einfluss des thermoplastischen Binders auf die verwendeten trockenen Halbzeuge wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt und kann in folgenden Forschungsarbeiten betrachtet werden. Einen weiteren Aspekt bildet die Ausweitung der analytischen Prozessmodellierung auf eine detaillierte Abbildung der Strömungsvorgänge im Greif-

system sowie im Textil mittels numerischer Simulation (FEM) zur Auslegung eines optimierten Greifsystems. Im Verlauf der durchgeführten Forschungsarbeiten werden hierzu bereits Grundlagen geschaffen, jedoch erfordern komplexe Fragestellungen wie beispielsweise das Durchströmungsverhalten textiler Handhabungsgüter weitere Anstrengungen.

Zusammenfassend sind im Rahmen der Arbeit die Grundlagen für die Entwicklung und Umsetzung eines hochflexiblen Greifsystems für technische Textilien in der Faserverbundproduktion gelegt worden, um durch die Automatisierung von Handhabungsprozessen zu einer wirtschaftlichen Fertigung dieser innovativen Produkte am Standort Deutschland beizutragen.

8 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ALTMANN 2007

Altmann, J.: Wirtschaftspolitik. 8., völlig überarb. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius 2007. ISBN: 978-3825213176. (UTB Wirtschaftswissenschaften 1317).

ANGERER ET AL. 2010

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W.; Reinhart, G.; Straßer, G.: Automated Cutting and Handling of Carbon Fiber Fabrics in Aerospace Industries. 6th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2010), Toronto, Canada, August 21-24, 2010 (2010).

AURICH ET AL. 1984

SCHUTZRECHT: DDR DE 343375 A1 (04.07.1985). VEB Institut für Spielzeug Pr.: 14.09.1984. Aurich, H.; Aschenbach, B.; Köhler, E.; Malter, G.; Nendel, W.; Neuhaus, Harald; Roß, Ingrid; Ropf, Dietmar; Wollin, Joachim: Verfahren und Vorrichtung zum Vereinzeln textiler Flächengebilde.

BAIER 2008

Baier, H.: Faserverbundwerkstoffe. Kern-Skriptum zur Vorlesung: Lehrstuhl für Leichtbau. Technische Universität München. München (2008).

BARTHELMEß 1987

Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung. Berlin: Springer 1987. ISBN: 0387181202. (*iwb* Forschungsberichte 9).

BAUER 2002

Bauer, F.: Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme. Diss. RWTH Aachen (2002). Aachen: Shaker 2002. ISBN: 383220539X. (Fluidtechnik 27).

BECKER 1993

Becker, R.: Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifern. Diss. Universität Dortmund (1993). Dortmund: Praxiswissen 1993. ISBN: 3-929443-17-1.

BELL 2005

Bell, I.: The future of control. *Manufacturing Engineer* 85 (2005) 4, S. 36–39.

BELLIO ET AL. 1993

SCHUTZRECHT US 5,463,921 (07.11.1995). The Charles Stark Draper Laboratory, Inc. Pr.: 05.03.1993. Bellio, S.; Bernardon, E.; Condon, M.; Flory, R.; Fyler, D.; Hansberry, M.L.; Lee, T.W.; Mueller, J.F.: Method and Apparatus for Automated Handling of Cut Material.

BINDEL & HOFMANN 2009

Bindel, T.; Hofmann, D.: Projektierung von Automatisierungsanlagen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009. ISBN: 978-3834803863. (Automatisierungstechnik).

BOTH ET AL. 2010

Both, J.; Kremser, F.; Rüger, O.: Werkstoffe und Konzepte: Neue Techniken, neue Materialien - das Mute-Elektrofahrzeug der TU München, Insight Automobil Industrie 12 (2010). S. 72-75.

BÖGER 1998

Böger, T.: Beitrag zur Projektierung von Greifelementen für die Handhabung flächiger, biegeweicher Materialien. Diss. Universität Dortmund (1998). Dortmund: Praxiswissen 1998. ISBN: 3-932775-10-4.

BRASQUET & CLOIREC 2000

Brasquet, C.; Cloirec, P. Le: Pressure drop through textile fabrics - experimental data modelling using classical models and neural networks. Chemical Engineering Science 55 (2000) 15, S. 2767–2778.

BRAUN 1999

SCHUTZRECHT: Deutschland DE 199 06 304 A 1 (17.08.2000). Braun, H. P. Pr.: 15.02.1999. Braun, H. P.: Verfahren zum Vereinzeln von biegeschlaffen, textilen Form- und Zuschnittteilen (Stofflagen) mit rauher Oberfläche, die automatisch mittels Greifer von einem Stoffstapel entommen werden.

BREIING & KNOSALA 1997

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

BREUN & SUSANEK 2006

Breun, F.; Susanek, A.: Produktionsstandort Deutschland: Stärken und Herausforderungen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2006 Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. München: Herbert Utz 9./10. 03. 2006, S. 25–38. ISBN: 3-8316-0575-0.

BROETJE-AUTOMATION GMBH 2010

Broetje-Automation GmbH: Automated handling system for fibre composites. Jec magazine 47 (2010) 57, S. 38.

BROWN ET AL. 1986

SCHUTZRECHT US 4,775,290 (04.10.1988). Flow Systems, Inc. Pr.: 03.03.1986. Brown, L. M.; O'Connor, T. H.; Massenburg, J. C.: Flexible Vacuum Gripper.

BUCHNER & FREI 2008

Buchner, H.; Frei, P.: Erfahrungsbericht – Serienfertigung von Faserverbundstrukturen am Beispiel des BMW M3 CFK-Daches. 12. Dresdner Leichtbausymposium. Dresden: 13.06.2008.

BÜHLER ET AL. 1991

Bühler, G.; Dörfler, H.; Heinrich, L.: Vereinzeln der obersten Lage eines Zuschnittsstapels. Wirkerei- und Strickerei-Technik 41 (1991) 10, S. 845-853, 1178-1181, 1288-1291.

BÜHLER ET AL. 1995

Bühler, G.; Dörfler, H.; Heinrich, L.: Automatisierte Handhabung großflächiger Werkstücke in der Maschenkonfektion (Teil 4). *Maschen Industrie* 45 (1995) 4, S. 317–320.

BYRNE 2000

Byrne, C.: Technical textiles market – an overview. In: Horrocks, A. R. et al. (Hrsg.): *Handbook of technical textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited 2000, S. 1–23. ISBN: 1 85573 385 4.

CARDAUN 1981

Cardaun, U.: Systematische Auswahl von Greiferkonzepten für die Werkstück-handhabung. Diss. Universität Hannover (1981).

CEGLAREK ET AL. 2001

Ceglarek, D.; Li, H. F.; Tang, Y.: Modeling and Optimization of End Effector Layout for Handling Compliant Sheet Metal Parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 123 (2001) 3, S. 473–480.

CHEN & BURDICK 1993

Chen, I.-M.; Burdick, J. W.: Finding Antipodal Point Grasps on Irregularly Shaped Objects. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9 (1993) 4, S. 507–512.

CHESTNEY & SARHADI 1996

Chestney, J. A.; Sarhadi, M.: Control and integration techniques in a fully automated manufacturing cell for carbon composites. In: *IEE Proceedings Control Theory and Applications* 143 (1996) 2, S. 159–163.

CHOKRI 2008

Chokri, C.: Aktuelle Trends bei Automobiltextilien. *Technische Textilien* 51 (2008) 2, S. 59.

COOK 1998

Cook, W. J.: *Combinatorial optimization*. New York: Wiley 1998. ISBN: 04715 5894X. (Wiley Interscience series in discrete mathematics and optimization).

CZARNECKI 1994

Czarnecki, C. A.: The development of a robotic handling cell to perform the stripping operation in garment manufacture. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation* (1994), S. 216–221.

CZARNECKI 1995

Czarnecki, C. A.: Automated Stripping: A Robotic Handling Cell for Garment Manufacture. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 2 (1995) 2, S. 4–8.

DÄUMLER & GRABE 2007

Däumler, K.-D.; Grabe, J.: *Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung*. 12., vollst. überarb. Aufl. Herne: Verl. Neue Wirtschafts-Briefe 2007. ISBN: 978-3-482-52302-1. (NWB-Studium Betriebswirtschaft).

DENNINGER 2009

Denninger, F.: Lexikon technische Textilien. Frankfurt am Main: Dt. Fachverl. 2009. ISBN: 9783866410930. (Technische TextilienEdition Textiltechnik).

DIESS 1986

Diess, H.: Automatisierte Montage von Dichtungsprofilen. Industrieanzeiger 74 (1986), S. 40–41.

DIESS 1988

Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse. Diss. Technische Universität München (1988). Berlin: Springer 1988. ISBN: 3540187995. (*iwb* Forschungsberichte 11).

DIN 1969

DIN 60000: Textilien Grundbegriffe. Berlin: Beuth 1969.

DIN 1985

DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 1985.

DIN 1997

DIN 12127: Textile Flächegebilde - Bestimmung der der flächenbezogenen Masse unter Verwendung kleiner Proben. Berlin: Beuth 1997.

DIN 2003A

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2003.

DIN 2003B

DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

DIN 2003C

DIN 53362: Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächegebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff - Bestimmung der Biegesteifigkeit - Verfahren nach Cantilever. Berlin: Beuth 2003.

DIN 2004

DIN 8295: Kunststoffe - Folien und Bahnen - Bestimmung der Reibungskoeffizienten. Berlin: Beuth 2004.

DIN 2007

DIN 23606: Textilien- Maschenstoffe- Darstellungsformen und Patronierung. Berlin: Beuth 2007.

DIN 2008

DIN 9237: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächegebilden. Berlin: Beuth 2008.

DIN 2009

DIN 13934: Zugeigenschaften von textilen Flächegebilden. Berlin: Beuth 2009.

DINI 1993

Dini, G.: A Module for the Automated Planning of Grasps in Robotized Assembly Operations. Annals of the CIRP 42 (1993) 1, S. 1–4.

DINI ET AL. 2009

Dini, G.; Fantoni, G.; Failli, F.: Grasping leather plies by Benoulli grippers. Annals of the CIRP 58 (2009), S. 21–24.

DRECHSLER 1992

Drechsler, K.: Beitrag zur Gestaltung und Berechnung von Faserverbundwerkstoffen mit dreidimensionaler Textilverstärkung. Diss. Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau. Stuttgart (1992).

DRECHSLER 2006

Drechsler, K.: Textiltechnik und Flugzeugbau. In: Wechselwirkungen - Jahrbuch aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart. Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau. Stuttgart (2006).

DRECHSLER 2008

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

DUDEN 2007

Duden: Duden, Deutsches Universalwörterbuch. 6., überarb. und erw. Aufl. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverl. 2007. ISBN: 3411714239.

DUFLOU ET AL. 2009

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

DUNKMANN & SCHMIERER 2005

SCHUTZRECHT US 2007/0255447 A1 (01.11.2007) 22.07.2005. Dunkmann, W.; Schmierer, G.: Method for Operating a Vacuum Handling Device.

DURST 2006

Durst, F.: Grundlagen der Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006. ISBN: 3540313230.

DURST 2008

Durst, K. G.: Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau. Diss. Universität Stuttgart (2008). Göttingen: Cuvillier 2008. ISBN: 978-3-86727-600-9. (Audi Dissertationsreihe 3).

EHINGER ET AL. 2010

Ehinger, C.; Reinhart, G.; Straßer, G.: Ansteuerungsentwicklung für ein roboter-basiertes, flexibles Handhabungswerkzeug. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18. - 19. Mrz. 2010. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn 2010.

EHRENSTEIN 2006

Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. 2., völlig überarb. Aufl. München-Wien: Carl Hanser 2006. ISBN: 3-446-22716-4.

- EHRENSPIEL 2007 Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 3., aktualisierte Aufl. München: Hanser 2007. ISBN: 9783446407336.
- EMONTS & BRECHER 2011
Emonts, M.; Brecher, C.: Automatisierte Handhabung für die FVK-Großserienproduktion. Aachen: 16. u. 17.02.2011.
- ERMANNI 2007
Ermanni, P.: Composites Technologien: Vorlesungsskript an der ETH-Zürich. Zürich: 2007.
- ERZINCANLI ET AL. 1998
Erzincanli, F.; Sharp, J. M.; Erhal, S.: Design and operational considerations of a non-contact robotic handling system for non-rigid materials. Int. J. Mach. Tools Manufa. 38 (1998) 4, S. 353–361.
- EUROPEAN COMMISSION 2009
European Commission: Panorama of Transport. European Communities. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities 2009. ISBN: 978-92-79-11119-8.
- FAHANTIDIS ET AL. 1997
Fahantidis, N.; Paraschidis, K.; Petridis, V.; Doulgeri, Z.; Petrou, I.; Hasapis, G.: Robot Handling of Flat Textile Material. IEEE Robotics & Automation Magazine 4 (1997) 1, S. 34.
- FAILLI & DINI 2004
Failli, F.; Dini, G.: An Innovative Approach to the Automated Stacking and Grasping of Leather Plies. Annals of the CIRP 53 (2004) 1, S. 31–34.
- FEILER ET AL. 2010
Feiler, M.; Berchthold, G.; Scheitle, J.-P.; Arent, J. C.: Automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen im Bereich Luftfahrt. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik. Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 1-1 – 1-43. ISBN: 978-3-89675-098-3.
- FELDMANN & SLAMA 2001
Feldmann, K.; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. Annals of the CIRP 50 (2001) 2, S. 489–498.
- FELDMANN ET AL. 2010
Feldmann, K.; Franke, J.; Schüßler, F.: Development of micro assembly processes for further miniaturization in electronics production. Annals of the CIRP 59 (2010). S. 1–4.
- FISCHER 2005
Fischer, U.: Tabellenbuch Metall. 43. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 2005. ISBN: 3-8085-1723-9.
- FLEMMING ET AL. 1995
Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Berlin: Springer 1995. ISBN: 3-540-58645-8.

FOIDL 2009

Foidl, G. M.: Einführung in den Simulated Annealing Algorithmus.

<http://www.mycsharp.de/attachments/simulated_annealing.pdf> - 04.09.2010.

GEBAUER ET AL. 2005

SCHUTZRECHT: Deutschland DE 10 2005 047 645 B4 (25.03.2010). Bremer Werk für Montagesysteme GmbH Pr.: 23.09.2005. Gebauer, I.; Dörsch, C.; Echner, F.: Vorrichtung zum Aufnehmen und Ablegen flächiger Teile.

GEHLE-DECHANT ET AL. 2010

Gehle-Dechant, S.; Steinfelder, J.; Wirsing, M.: Export, Import, Globalisierung - Deutscher Außenhandel und Welthandel 1990 bis 2008. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. <www.destatis.de> - 10.09.2010.

GERTHSEN & MESCHEDI 2006

Gerthsen, C.; Meschede, D.: Gerthsen Physik. 23., überarbeitete Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3540299734. (Springer-Lehrbuch).

GEVATTER & GRÜNHaupt 2006

Gevatter, H.-J.; Grünhaupt, U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. 2., vollständig bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-21207-2. (VDI-Buch).

GÖSCHEL 2006

Göschel, B.: Innovationen - Der Treibstoff für die automobilen Zukunft. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2006 Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. München: Herbert Utz 9./10. 03. 2006, S. 137–141. ISBN: 3-8316-0575-0.

GOTTSCHALK 1996

Gottschalk, T.: Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur. Diss. Technische Universität Berlin. Berlin: Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik 1996. ISBN: 3-8167-4531-8. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

GÖTZ 1991

Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile. Diss. Technische Universität München (1991). Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1991. ISBN: 3-540-54401-1. (*iwb* Forschungsberichte 39).

GRAY & CALDWELL 1996

Gray, J. O.; Caldwell, D. G. (Hrsg.): Advanced Robotics & Intelligent Machines. London: Institution of Electrical Engineers 1996. ISBN: 0852968531.

GREB ET AL. 2009

Greb, C.; Grundmann, T.; Gries, T.: Automatisierte Fertigung von Windenergieanlagen. Technische Textilien 52 (2009) 1, S. 24–25.

GREB ET AL. 2010

Greb, C.; Schnabel, A.; Gries, T.; Kruse, F.: Development of New Preforming Processes for High Performance Fibre-Reinforced Plastics (FRP) Components. SAMPE Journal 46 (2010) 5, S. 42–51.

8 Literaturverzeichnis

GRESSLER & GÖPPEL 2010

Gressler, U.; Göppel, R.: Qualitätsmanagement. 7. Aufl. Troisdorf: Bildungsverlag EINS 2010.

GRIES ET AL. 2010

Gries, T.; Niebel, V.; Caudewell, C.; Seliger, G.; Weinert, N.: Technologie zum überlappungsfreien Fügen textiler Halbzeuge. Technische Textilien 52 (2009) 1. S. 37-38.

GROßMANN ET AL. 2010

Großmann, K.; Mühl, A.; Löser, M.; Cherif, C.; Hoffmann, G.; Refah Torun, A.: New Solutions for the manufacturing of spacer preforms for the thermoplastic textile-reinforced lightweight structures. Production Engineering 4 (2010) 6, S. 589-597.

GUTSCHE 1993

Gutsche, C.: Beitrag zur automatisierten Montage technischer Textilien. Diss. Technische Universität Berlin (1993). München Wien: Carl Hanser 1993. ISBN: 3-446-17485-0. (Produktionstechnik - Berlin 115).

HAAS ET AL. 2009

SCHUTZRECHT: Deutschland DE 202009 014 154.3 (07.01.2010). IMA Ingenieurbüro Abele + Partner GmbH, Technische Universität München, TopCut Bullmer GmbH Pr.: 19.10.2009. Haas, B.; Straßer, G.; Ehinger, C.; Scharrer, J.; Stahl, A.: Vorrichtung zur Handhabung von flachen konturierten Bauteilen.

HABISREITINGER & NORDMANN 2001

SCHUTZRECHT: Deutschland DE 10152232 A1 (08.05.2003). DaimlerChrysler AG Pr.: 20.10.2001. Habisreiter, U.; Nordmann, B.: Verfahren und Vorrichtung zum automatisierten Handhaben von Harzmatten bei der Herstellung von SMC-Teilen.

HAGMANN 2008

Hagmann, G.: Grundlagen der Elektrotechnik. 13., durchges. und korrigierte Aufl. Wiebelsheim: AULA-Verl. 2008. ISBN: 978-3891047217.

HARTMANN 1996

Hartmann, M.: DYNAPRO: Erfolgreich produzieren in turbulenten Märkten. Band 1: Anforderungen und industrielle Lösungsansätze. Stuttgart: LOGIS-Verl. für Wissenstransfer 1996. ISBN: 3932298004. (1).

HEINZ 2009

Heinz, N.: REMMERT: Automatisch lasergeschnittene Teile absortieren – Sortierroboter Laser-Sort im Praxistest. <<http://www.openpr.de/news/314912/REMMERT-Automatisch-lasergeschnittene-Teile-absortieren-Sortierroboter-Laser-Sort-im-Praxistest.html>> - 02.09.2009.

HENNING ET AL. 2008

Henning, K.; Gries, T.; Flachskampf, P.: AutoPreforms. Gemeinsamer Abschlussbericht - Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms. Aachen: 2008.

HENRICH & WÖRN 2000

Henrich, Dominik; Wörn, Heinz (Hrsg.): Robot manipulation of deformable objects. London: Springer 2000. ISBN: 1-85233-250-6.

HERWIG 2008

Herwig, H.: Strömungsmechanik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2008. ISBN: 978-3834803344.

HESSE 1991

Hesse, S.: Greifer-Praxis. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 1991. ISBN: 3802304764.

HESSE 1993

Hesse, S.: Handhabungsmaschinen. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 1993. ISBN: 978-3802314506. (Vogel-Fachbuch).

HESSE 2006

Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. München-Wien: Carl Hanser Verlag 2006. ISBN: 978-3446404731.

HESSE ET AL. 2004

Hesse, S.; Monkman, G.; Steinmann, R.; Schunk, H.: Robotergreifer. München: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22920-5.

HILL 1999

Hill, B.: Naturorientierte Lösungsfindung. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl. 1999. ISBN: 3-8169-1770-4.

HILL 2001

Hill, B.: Der Methodenbaukasten. 2., erw. und überarb., als Ms. gedr. Aufl. Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-4470-6.

HJORNET 2008

SCHUTZRECHT: International WO 2008/133974 A2 (06.11.2008). Hjornet, P. Pr.: 25.04.2008. Hjornet, P.: Vacuum Gripping Apparatus.

HOCEVAR & RIEDL 2003

Hocevar, A.; Riedl, L.: Vergleich verschiedener multikriterieller Bewertungsverfahren mit MapModels. In: Schrenk, M. (Hrsg.): Computergestützte Raumplanung – Beiträge zum Symposium CORP. Wien 2003, S. 299–304.

HOFFMANN ET AL. 2006

Hoffmann, H.; Träger, M.; Zäh, M. F.; Oefele, F.: Mit Forschung die Zukunft gewinnen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2006 Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. München: Herbert Utz 9./10. 03. 2006, S. 61–69. ISBN: 3-8316-0575-0.

HOFFMEISTER 2000

Hoffmeister, W.: Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Übungen und Beispielen. Stuttgart Berlin Köln: W. Kohlhammer 2000. ISBN: 3-7-016353-1.

8 Literaturverzeichnis

HOLTMEIER 2007

SCHUTZRECHT EP 1905709 A2 (02.04.2008). Brötje-Automation GmbH Pr.: 02.07.2007. Holtmeier, G.: Verfahren und Transportvorrichtung zum Transportieren von Gegenständen.

HÖPPNER 2002

Höppner, J.: Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler. Diss. Technische Universität München (2002). München: Utz Herbert 2002. ISBN: 3-8316-0125-9. (*iwb* Forschungsberichte 126).

HOßMANN 1992

Hoßmann, J.: Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen. Diss. Technische Universität München (1992). Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1992. ISBN: 3-540-55220-0. (*iwb* Forschungsberichte 43).

HOU 1993

Hou, M.: Verfahren zum automatisierten Handhaben und Positionieren labiler Stoffzuschnitte in der Bekleidungsfertigung. Dissertation: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik. Universität Stuttgart. Denkendorf (1993).

HUFENBACH 2007

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

ITF 2010

ITF: OECD: Transport Outlook 2010 – The Potential for Innovation. <<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10Outlook.pdf>> - 25.09.2010.

JACOBS 2004

SCHUTZRECHT US 7,086,675 B2 (08.08.2006). Goudsmit Magnetic Systems BV Pr.: 08.12.2004. Jacobs, A.: Magnetic Vacuum Gripper Including Inflatable Bel-lows.

JARVIS ET AL. 1991

Jarvis, S.; Wilcox, K.; Chen, X.; McCarthy, R.; Sarhadi, M.: Design of a handling device for composite ply lay-up automation. Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Robotics (1991) 1, S. 790–795.

JENSEN GREIFTECHNIK GMBH 2009

Jensen Greiftechnik GmbH: Nadelgreifer. <<http://www.jensen-greiftechnik.de/index.php?id=54>> - 23.09.2009.

JODIN 1991

Jodin, D.: Untersuchungen zur Handhabung von biegeweichen Flächenzuschnitten aus Leder mit pneumatischen Greifern. Diss. Universität Dortmund. Dortmund (1991).

JÜNEMANN & SCHMIDT 2000

Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflusssysteme. Systemtechnische Grundlagen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3540650768. (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen).

KALUZA & BEHRENS 2005

Kaluza, B.; Behrens, S.: Erfolgsfaktor Flexibilität. Berlin: Schmidt 2005. ISBN: 3-503-08367-7. (Technological economics 60).

KARAKEREZIS ET AL. 1994

Karakerezis, A.; Ippolito, M.; Doulgeri, Z.; Rizzi, C.; Cugini, C.; Petridis, V.: Robotic Handling for Flat Non Rigid Materials. In: Proceedings of IEEE International Conference on Transactions on Systems, Man and Cybernetics (1994), S. 937–946.

KARL 2010

Karl, D.: CFK im Kommen. Automobil Industrie (2010) 11, S. 46–47.

KLEIN 2007

Klein, B.: TRIZ, TIPS – Methodik des erfinderischen Problemlösens. 2., verb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg Verlag 2007. ISBN: 3-486-58083-3.

KOCH 1992

Koch, W.: Untersuchung zum Greifen und Vereinzeln von Zuschnitteilen. Diss. Universität Stuttgart, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik. Denkendorf (1992).

KÖHLER 1983

Köhler, E.: Grundlagen der Handhabetechnik biegeschlaffer Flächengebilde. Diss. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt. Karl-Marx-Stadt (1983).

KÖHLER 1993

Köhler, E.: Handhabung biegeschlaffer Flächengebilde. Textiltechnik (1993) 7, S. 424–427.

KOLLURU ET AL. 1997

Kolluru, R.; Valavanis, K. P.; Hebert, T.: A Robotic Gripper System for Limp Material Handling: Modeling, Analysis and Performance Evaluation. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation (1997), S. 310–316.

KOLLURU ET AL. 1998

Kolluru, R.; Valavanis, K. P.; Hebert, T.: Modeling Analysis and Performance Evaluation of a Robotic Gripper for Limp Material Handling. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 20 (1998) 3, S. 480–486.

KOLLURU ET AL. 2000

Kolluru, R.; Valavanis, K. P.; Smith, S.; Tsourveloudis, N.: Design Fundamentals of a Reconfigurable Robotic Gripper System. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 30 (2000) 2, S. 181–187.

KOLLURU ET AL. 1995

Kolluru, R.; Valavanis, K. P.; Steward, A.; Sonnier, M. J.: A Flat-Surface Robotic Gripper for Handling Limp Material. IEEE Robotics & Automation Magazine 2 (1995) 3, S. 19–26.

8 Literaturverzeichnis

KOLYMBAS 2007

Kolymbas, D.: Geotechnik. 2., korrigierte und ergänzte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007. ISBN: 978-3540689652.

KORDI ET AL. 2007

Kordi, M. T.; Hüsing, M.; Corves, B.: Development of a Multifunctional Robot End-Effector System for Automated Manufacturing of Textile Preforms. IEEE/ASME International conference on advanced intelligent mechatronics 2007. Zurich (Switzerland): 4.-7.09.2007.

KORTE & VYGEN 2008

Korte, B.; Vygen, J.: Kombinatorische Optimierung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-76918-7.

KROCKENBERGER 1995

Krockenberger, O.: Entwicklung einer flexibel automatisierten Nähanlage. Diss. Universität Stuttgart (1995). Berlin Heidelberg New York: Springer 1995. ISBN: 3-540-58939-2. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 209).

KROCKENBERGER & NOLLEL 1991

Krockenberger, O.; Nollel, H.: Handling within an Automated Sewing Cell for Trouser Legs. ICAR Fifth International Conference on Advanced Robotics (1991), S. 1534–1537.

KRUSCHWITZ 2003

Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. 9., neu bearb. Aufl. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 3-486-27260-8. (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

KUHN 2006

Kuhn, C.: Methode zur Auslegung mikrofluidischer Bauteile für beadbasierte Analysesysteme in der medizinischen Diagnostik. Diss. Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (2005). Heimsheim: Jost-Jetter 2006. ISBN: 3-936947-75-9. (IPA-IAO-Forschung und -Praxis Nr. 430).

LAU 2010

Lau, C.: Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-4012-6. (*iwb* Forschungsberichte 238).

LIEN & DAVIS 2008

Lien, T. K.; Davis, P. G.: A novel gripper for limb materials based on lateral Coanda ejectors. Annals of the CIRP 57 (2008) 1, S. 33–36.

LINDEMANN 2005

Lindemann, U.: Produktentwicklung und Konstruktion. Vorlesungsskript: Lehrstuhl für Produktentwicklung. Technische Universität München. München (2005).

LINDEMANN 2007

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007.

LOOS 2001

Loos, U.: Perspektiven für die industrielle Produktion. In: Wiesheu, O. (Hrsg.): Bayern 2020 – Megatrends und Chancen. München 2001, S. 54–59.

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. 2., erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3-18-401168-2.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 9783540214137.

LUNZE 2007

Lunze, J.: Regelungstechnik 1. 6., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007. ISBN: 978-3-540-70790-5. (Springer-Lehrbuch).

LUNZE 2008

Lunze, J.: Automatisierungstechnik. 2., überarb. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 9783486580617.

MANKINS 1995

Mankins, J. C.: Technology Readiness Levels: A White Paper.
<<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>> - 09.01.2010.

MEHRMANN & WIRTZ 2000

Mehrmann, E.; Wirtz, T.: Effizientes Projektmanagement. 4., aktualisierte Aufl. Düsseldorf: ECON-Taschenbuch-Verlag 2000. ISBN: 3-612-21217-6. (ETB 21217: Econ-Praxis).

MELCHER 1997

Melcher, R.: Aktiv-Matrix-Ansteuerungen für Projektions-Displays. Diss. Universität Duisburg (1997). Universität Duisburg. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997. ISBN: 3183258099. (Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 9, Elektronik 258).

MERSMANN 2011

Mersmann, C.: Industrializing metrology – Machine vision integration in composites production. Annals of the CIRP 60 (2011), S. 511–514.

MICHALOSA ET AL. 2010

Michalosa, G.; Makrisa, S.; Papakostas, N.; Mourtzisa, D.; Chrysosolouris, G.: Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. Annals of the CIRP 59 (2010) 2, S. 81–89.

MILBERG ET AL. 1987

Milberg, J.; Diess, H.; Götz, R.: Flächenunterdruckgreifer für nicht formstabile Bauteile. Industrieanzeiger 109 (1987) 73, S. 24–28.

MILBERG & HOßMANN 1989

Milberg, J.; Hoßmann, J.: Automatische Fertigung nichtformstabiler Bauteile: "Fallbeispiele demonstrieren Entwicklungsfortschritt". Montage 2 (1989) 1, S. 16–24.

MILLS 2001

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

MITTELSTRAß ET AL. 2004

Mittelstraß, J.; Blasche, S.; Wolters, G.; Carrier, M.: *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Stuttgart: Metzler 2004. ISBN: 3476020126.

MOLFINO & ZOPPI 2005

Molfinio, R.; Zoppi, M.: Mass Customized Shoe Production: A Highly Reconfigurable Robotic Device for Handling Limp Material. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005) 2, S. 66–76.

MONKMAN 1995

Monkman, G. J.: Robot Grippers for Use With Fibrous Materials. *The International Journal of Robotics Research* 14 (1995) 2, S. 144–151.

MONKMAN & SHIMMIN 1991

Monkman, G. J.; Shimmin, C.: Permatak adhesives for robot grippers. *Assembly Automation* 11 (1991) 4, S. 17–19.

MONKMAN ET AL. 2007

Monkman, G. J.; Hesse, S.; Steinmann, R.; Schunk, H.: *Robot Grippers*. Weinheim: Wiley-VCH 2007. ISBN: 978-3-527-40619-7.

MORENO MASEY & CALDWELL 2007

Moreno Masey, R. J.; Caldwell, D. G.: Design of an Automated Handling System for Limp, Flexible Sheet Lasagne Pasta. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation* (2007), S. 1226–1231.

MÜCKE 2003

Mücke, K.: Konstrukteure nehmen den Bedienern das Justieren ab. *Industrieanzeiger* 125 (2003) 16, S. 42–43.

MUELLER-HUMMEL 2007

SCHUTZRECHT: USA US 2008/0089772 A1 (17.04.2008). EADS Deutschland GmbH Pr.: 10.10.2007. Mueller-Hummel, P.: Suction Gripper for Handling Workpieces.

MÜLLER ET AL. 2011

Müller, R.; Esser, M.; Janßen, M.; Vette, M.; Corves, B.; Hüsing, M.; Riedel, M.: Reconfigurable handling system. *Production Engineering* 2011, Online First, 14.03.2011.

MÜLLER 1997

Müller, J.: Entwicklung eines Expertensystems zur Auswahl von Greifern für Handhabungsaufgaben. Diss. RWTH Aachen. Aachen (1997).

N.N. 2001A

N.N.: Mit modularen Vakuumsystemen zu kompletten Greifersystemen. *Maschinenmarkt* 107 (2001) 9, S. 31.

N.N. 2001B

N.N.: Teamarbeit: Die Evolution des Greiferbaus. *Plastverarbeiter* 52 (2001) 10, S. 226–227.

N.N. 2004

N.N.: Greifer - Magnet und Vakuum arbeiten zusammen. *Industrieanzeiger* 126 (2004) 40, S. 57.

NATIONAL INSTRUMENTS 2008

National Instruments: CompactRIO and LabVIEW Development Fundamentals: Course Manual 2008.

NEITZEL & MITSCHANG 2004

Neitzel, M.; Mitschang, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München-Wien: Carl Hanser Verlag 2004. ISBN: 3-446-22041-0.

NESTLER 1983

SCHUTZRECHT: DDR DE 3347547 A1 (09.08.1984). VEB Textil- und Konfektionsbetrieb Cottbus Pr.: 30.12.1983. Nestler, D.: Verfahren und Greifvorrichtung zum Greifen und Vereinzeln insbesondere textiler Flächengebilde.

NESTLER 1986

Nestler, R.: Beitrag zur Automatisierung des Nähprozesses. *Textiltechnik* 36 (1986), S. 67–72.

NEWELL ET AL. 1996

Newell, G.; Buckingham, R.; Khodabandehloo, K.: The automated manufacture of prepreg broadgoods components - a review of literature. *Composites - Part A* 17A (1996) 3, S. 211–217.

NEWMAN ET AL. 1998

SCHUTZRECHT: USA US 6,024,003 (15.02.2000). Case Western Reserve University Pr.: 19.08.1998. Newman, W. S.; Cawlex, J. D.; Heuer, A. H.: Selective Vacuum Gripper.

NOLTE ET AL. 2003

Nolte, W. L.; Kennedy B.C.; Dziegiel, R. J.: Technology Readiness Level Calculator. San Diego (USA): 20.10.2003.

<<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>> - 09.01.2010.

OBLOZINSKA 2005

Oblozinska, Z.: *Bewertungsverfahren. Vorlesungsunterlagen Verkehrsplanung*. ETH Zürich. Zürich (2005).

OCHS 2010

Ochs, A.: Schwingungsunterstütztes Greifen von technischen Textilien. twbk - Institut für Produktionstechnik - topics (2010) 1, S. 3.

OECD 2008

OECD: *OECD Environmental Outlook to 2030*. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development 2008. ISBN: 978-92-64-01048-9. (Environment).

ONO 2000

Ono, E.: Automated Sewing System and Unfolding Fabric. In: Henrich, D. et al. (Hrsg.): Robot manipulation of deformable objects. London: Springer 2000, S. 135–158. ISBN: 1-85233-250-6.

ONO ET AL. 1992

Ono, E.; Ichijou, H.; Aisaka, N.: Flexible Robotic Hand for Handling Fabric Pieces in Garment Manufacture. International Journal of Clothing Science and Technology Vol. 4 (1992) 5, S. 16–23.

ONO ET AL. 1995

Ono, E.; Kita, N.; Sakane, S.: Strategy for unfolding a fabric piece by cooperative sensing of touch and vision. Proceedings of the IEEE/JSR International Conference on Intelligent Robots and Systems Vol. 3 (1995), S. 441–445.

ONO ET AL. 2001

Ono, E.; Kitagaki, K.; Kakikura, M.: Picking Up a Piece of Fabric from Layers with a Hand with 3 Fingers and a Palm. Proceedings of the 2001 IEEE/JSR International Conference on Intelligent Robots and Systems (2001), S. 931–936.

ONO ET AL. 2005

Ono, E.; Kitagaki, K.; Kakikura, M.: On Friction Picking Up a Piece of Fabric from Layers. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation (2005), S. 2206–2211.

ORTH 2008

Orth, A.: Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen. Diss. RWTH Aachen (2008). Aachen: Shaker 2008. ISBN: 9783832269838. (Berichte aus der Produktionstechnik 4).

OSTHUS 1996

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

OZCELIK & ERZINCANLI 2005

Ozcelik, B.; Erzincanli, F.: Examination of the movement of a woven fabric in the horizontal direction using a non-contact end-effector. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25 (2005) 5-6, S. 527–532.

PAHL ET AL. 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007.

PANTELAKIS ET AL. 2009

Pantelakis, S.; Katsiropoulos, C.; Labeas, G.; Sibois, H.: A concept to optimize quality and cost in thermoplastic composite components applied to the production of helicopter canopies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40 (2009) 5, S. 595–606.

PARASCHIDIS ET AL. 1995

Paraschidis, K.; Fahantidis, N.; Vassiliadis, V.; Petridis, V.; Doulgeri, Z.; Petrou,

- L.; Hasapis, G.: A Robotic System for Handling Textile Materials. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation (1995), S. 1769–1774.
- PETERS 2008
Peters, A.: Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität in Montageanlagen. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium - Innovationen für die Produktion. München: Utz Herbert 2008, S. 115–124. ISBN: 978-3-8316-0844-7.
- PHAM & HEGINBOTHAM 1986
Pham, D. T.; Heginbotham, W. B.: Robot grippers. Kempston: IFS Publications Ltd 1986. ISBN: 3-540-16004-3.
- PHAM & TACGIN 1992
Pham, D. T.; Tacgin, E.: An Expert System for Selection of Robot Grippers. Expert Systems With Applications 5 (1992), S. 289–300.
- PITTSCHELLIS 1998
Pittschellis, R.: Mechanische Miniaturgreifer mit Formgedächtnisantrieb. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998. ISBN: 3-18-371408-6. (Berichte der Institute für Automatisierungstechnik 714).
- POTLURI & ATKINSON 2003
Potluri, P.; Atkinson, J.: Automated manufacture of composites: handling, measurement of properties and lay-up simulations. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 34 (2003) 6, S. 493–501.
- PRESTON & KHAKBIZ 1995
Preston, M.; Khakbiz, H.: Mechatronics applied to low-cost automated garment assembly. Mechatronics 5 (1995) 2/3, S. 321–346.
- PUDENZ 2010
Pudenz, K.: Megacity Vehicle: Erstes Großserienauto mit CFK-Fahrgastzelle. <<http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/12027/Megacity-Vehicle-Erstes-Grossserienauto-mit-CFK-Fahrgastzelle.html>> - 17.09.2010.
- REIFF-STEPHAN 2009
Reiff-Stephan, J.: Gefriergreifer. <<http://www.naiss.de/cryo.html>> - 23.09.2009.
- REINHART 1988
Reinhart, G.: Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze. Diss. Universität München (1988). Berlin: Springer-Verlag 1988. (*iwb* Forschungsberichte 12).
- REINHART 2006
Reinhart, G.: Montage, Handhabung und Industrieroboter. Vorlesungsskript: *iwb*. Technische Universität München. München (2006).
- REINHART 2009
Reinhart, G. (Hrsg.): Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben. München: Herbert Utz 2009. ISBN: 978-3-89675-093-8. (*iwb* Seminarberichte 93).

REINHART ET AL. 2009A

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

REINHART ET AL. 2009B

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

REINHART & EHINGER 2010

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

REINHART ET AL. 2010A

Reinhart, G.; Hoffmann, H.; Zäh, M. F.: Münchener Kolloquium - Innovationen für die Produktion. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium - Innovationen für die Produktion. München: Herbert Utz 2010, S. 3. ISBN: 978-3-8316-4009-6.

REINHART ET AL. 2010B

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Straßer, G.: Überblick über aktuelle Technologien für eine automatisierte Herstellung von Composites. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik. Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 1-1 – 1-16. ISBN: 978-3-89675-098-3.

REINHART ET AL. 2010C

Reinhart, G.; Straßer, G.; Ehinger, C.: Automation Technology for the Efficient Manufacturing of Fiber Reinforced Plastics (FRP). 1st Symposium on Automation in Composite Technology, Sampe Europe Semat, Munich, 10.06.2010. (2010).

REINHART ET AL. 2010D

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

REINHART ET AL. 2010E

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

REINHART ET AL. 2010F

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

REINHART & EHINGER 2011

Reinhart, G.; Ehinger, C.: Novel Draping End-Effector for an Automated Pre-forming Process of Dry Carbon Fiber Textiles. Second JEC 2011 International Composites Summit (I.C.S), Composites for Mass Production, Automation Forum, Paris, 29.-30.03.2011. (2011).

REINHART & HAGEMANN 2007

Reinhart, G.; Hagemann, F.: Industrielle Produktion - weiterhin die Jobmaschine Nr 1 in Deutschland? In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Migration von Wertschöpfung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007, S. 17–30. ISBN: 978-3-8167-7419-8.

REINHART & STRAßER 2011

Reinhart, G.; Straßer, G.: Flexible gripping technology for the automated handling of limp technical textiles in composites industry. Production Engineering 5 (2011) 3, S. 301-306.

REITHOFER 2010

Reithofer, N.: Mobilität neu gedacht. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium - Innovationen für die Produktion. München: Herbert Utz 2010, S. 19-40. ISBN: 978-3-8316-4009-6.

REYNE 2008

Reyne, M.: Verbundwerkstoff-Lösungen: Duroplaste und Thermoplaste. Paris: JEC Group 2008. ISBN: 9782952627627. (JEC Publications).

ROENPAGE ET AL. 2007

Roenpage, O.; Beernaert, C.; John, A.; Lunau, S.; Meran, R.; Staudter, Christian: Six Sigma+Lean Toolset. 2., überarbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007. ISBN: 3-540-46054-3.

ROSS 2002

Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. Diss. Technische Universität München (2002). München: Herbert Utz 2002. (*iwb* Forschungsberichte 170).

SAADAT & PING 2002

Saadat, M.; Ping, N.: Industrial applications of automatic manipulation of flexible materials. Industrial Robot: An International Journal. Volume 29 (2002) 5, S. 434-442.

SARHADI 1990 Sarhadi, M.: Robotic Handling and Lay-Up of Advanced Composite Materials - An Overview. In: Taylor, P. M. (Hrsg.): Sensory robotics for the handling of limp materials. Berlin: Springer 1990, S. 33–50. ISBN: 3-540-52299-9.

SAUBERER 1998

Sauberer, A.: Experimentelle Studien zum Coanda-Effekt. Diplomarbeit. TU Wien. Wien (1998).

SCHEITLE 2008

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

SCHELER 2008

Scheler, P.: Machbarkeitsstudie: NiTi Nadelgreifer. Augsburg: 2008.

SCHILP 2007

Schilp, M.: Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage. Diss. Technische Universität München (2007). München: Herbert Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0631-3. (*iwb* Forschungsberichte 199).

SCHLEICH 2004

Schleich, M.: Formgedächtnismaterialien als Fingerantrieb. Dissertation Technische Universität München. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. ISBN: 3-18-323917-5. (Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 17, Biotechnik/Medizintechnik 239).

SCHLICKSUPP 1985

Schlicksupp, H.: Innovation, Kreativität und Ideenfindung. 2. Aufl. Würzburg: Vogel 1985. ISBN: 2-8023-0650-3. (Management-Wissen).

SCHLICKSUPP 1993

Schlicksupp, H.: Kreativ-Workshop. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 1993. ISBN: 3-8023-1481-6. (Reihe Management).

SCHMALZ GMBH 2008

Schmalz GmbH: Vakuum-Flächengreifer mit Sauggreifern.

<<http://www.schmalz.com/aktuelles/produkte/vakuumgreifsysteme/00314/index.html.de>> - 22.08.2009.

SCHMALZ GMBH 2009

Schmalz GmbH: Firmenbroschüre: Vakuum-Komponenten Neuheiten 2009. Glatten: 2009.

SCHMALZ GMBH 2009

Schmalz GmbH: Hebegerate VacuMaster. <<http://www.schmalz.com/produkte/vakuumhandhabungssysteme/hebegeraete/>> - 17.09.2009.

SCHMALZ GMBH 2011

Schmalz GmbH: Berührungsloses Vereinzeln in Verpackungsprozessen. <<http://de.schmalz.com/aktuelles/presse/vakuumkomponenten/01038/>> - 05.04.2011.

SCHMIDT 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Diss. Technische Universität München (1991). Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer 1992. ISBN: 3540550259. (*iwb* Forschungsberichte 41).

SCHNEIDER 1999

Schneider, B.: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile. Diss. Technische Universität München (1999). München: Herbert Utz 1999. ISBN: 3-89675-559-5. (*iwb* Forschungsberichte 122).

SCHULTE-ZURHAUSEN 2005

Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. 4., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen 2005. ISBN: 3800632055.

SCHUMACHER 2005

Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3540218874.

SCHUNK GMBH & CO. KG 2009

SCHUNK GmbH & Co. KG: Servoelektrische Greifhand mit 8 programmierbaren Freiheitsgraden. <[SEBASTIAN 1993](http://www.de.schunk.com/schunk_websites/products/products_level_3/product_level3.html?product_level_3=7261&product_level_2=250&product_level_1=244&country=DEU&lngCode=DE&lngCode2=DE#> - 22.09.2009.</p></div><div data-bbox=)

Sebastian, V.: Versuche zur Verkettung von Handhabefunktionen. Automatisierte Bekleidungsfertigung. Bekleidung&Wear 45 (1993) 4, S. 15–21.

SEEGRÄBER 1993

Seegräber, L.: Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl. 1993. ISBN: 3-8169-0943-4.

SEIF 2007

Seif, M.: Bereitstellung von Materialkennwerten für die Simulation von Bekleidungsprodukten. Diss. Technische Universität Dresden. Dresden (2007).

SEITZ 2008

Seitz, M.: Speicherprogrammierbare Steuerungen. System- und Programmwurf für die Fabrik- und Prozessautomatisierung, vertikale Integration. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl. 2008. ISBN: 9783446414310.

SELIGER ET AL. 1992

Seliger, G.; Gutsche, C.; Hsieh, L. H.: Process Planning and Robotic Assembly System Design for Technical Textile Fabrics. Annals of the CIRP 41 (1992) 1, S. 33–36.

SELIGER ET AL. 2003

Seliger, G.; Szimmat, F.; Niemeier, J.; Stephan, J.: Automated Handling of Non-Rigid Parts. Annals of the CIRP 52 (2003) 1, S. 21–24.

SELIGER ET AL. 2007

Seliger, G.; Stephan, J.; Weinert, N.: Planung und Anwendung von Greifwerkzeugen für biegeschlaffe Bauteile. Frankfurt am Main: 09.10.2007.

SIKORA 2001

Sikora, J.: Handbuch der Kreativ-Methoden. 2., überarb. und erw. Aufl. Bad Honnef: KSI 2001. ISBN: 392756625X.

SOMMER-AUTOMATIC GMBH & Co. KG 2009

Sommer-automatic GmbH & Co. KG: Serie ST - Nadelgreifer - Produkte.
<<http://217.6.27.203/action/loadProductsAction?id=10701>> 11.09.2009.

SOMMERLATTE 2001

Sommerlatte, T.: Megatrends und deren Auswirkungen auf die bayerische Wirtschaft: Ergebnisse der Studie "Chancen für Bayern - Bayern 2020". In: Wiesheu, O. (Hrsg.): Bayern 2020 – Megatrends und Chancen. München 2001, S. 43–53.

SPIEGELMACHER 1991

Spiegelmacher, K.: Zuschneiden und Vereinzeln textiler Werkstücke. Diss. Universität Kaiserslautern (1991). Düsseldorf: VDI-Verl. 1991. ISBN: 3-18-141902-8. (Reihe 2: Fertigungstechnik 219).

STEPHAN 2006

Stephan, J.: Greifer für biegeschlaffe Materialien. (Hrsg.): A&D Kompendium 2005/2006. München: publish-industry Verlag 2006, S. 282–284.

STEPHAN 2001

Stephan, J.: Beitrag zum Greifen von Textilien. Diss. Technische Universität Berlin (2001). Berlin: IPK 2001. ISBN: 3816756220. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

STRAßER 2010A

Straßer, G.: Automatisierte Handhabung konturvarianter, textiler Halbzeuge für die Faserverbundproduktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik. Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 1-1 – 1-16. ISBN: 978-3-89675-098-3.

STRAßER 2010B

Straßer, G.: Strömungssimulation bei der Entwicklung eines innovativen unterdruckbasierten Greifsystems zur Handhabung von Faserverbundhalbzeugen. Nördlingen: 25.02.2010.

STRAßER & EHINGER 2010

Straßer, G.; Ehinger, C.: Automatisiertes Konfektionieren von trockenen CF-Textilien beim *iwb* Anwenderzentrum Augsburg. CCEV News 4 (2010) 1, S. 7.

STÜTZEL & SPIEGELBERGER 2007

Stützel, B.; Spiegelberger, B.: Vorlesungsskript: Entwicklungsmethodik in der Mechatronik: Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen. Technische Universität München. München (2007).

SZIMMAT 2007

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

TAYLOR 1994

Taylor, P.: A toolbox of garment handling techniques. IEE Colloquium on Intelligent Automation for Processing Non-rigid Products (1994), S. 1/1-1/4.

TAYLOR 1995

Taylor, P.: Presentation and gripping of flexible materials. Assembly Automation 15 (1995) 3, S. 33–35.

TAYLOR 1996

Taylor, P.: Handling of flexible materials in automation. In: Gray, J. O. et al. (Hrsg.): Advanced Robotics & Intelligent Machines. London: Institution of Electrical Engineers 1996, S. 191–211. ISBN: 0852968531.

TAYLOR ET AL. 1988

Taylor, P.; Monkman, G.; Taylor, G.: Electrostatic Grippers for Fabric Handling. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1988. S. 431–433.

TAYLOR ET AL. 1991

Taylor, P.; Wilkinson, A.; Gibson, I.; Palmer, G.; Gunner, M.: The automation of complex fabric handling tasks requiring out of plane manipulation. IEEE-91 ICAR, 5th International Conference on Advanced Robotics in Unstructure Environment (1991), S. 775–780.

TAYLOR ET AL. 1990

Taylor, P.; Wilkinson, A.; Taylor, G.; Gunner, M.; Palmer, G.: Automated fabric handling problems and techniques. IEEE International Conference on Systems Engineering (1990), S. 367–370.

TAYLOR 1990

Taylor, Paul M. (Hrsg.): Sensory robotics for the handling of limp materials. Berlin: Springer 1990. ISBN: 3-540-52299-9.

TAYLOR & TAYLOR 1990

Taylor, P. M.; Taylor, G.: Progress Towards Automated Garment Manufacture. In: Taylor, P. M. (Hrsg.): Sensory robotics for the handling of limp materials. Berlin: Springer 1990, S. 97–109. ISBN: 3-540-52299-9.

THEIS 2005

SCHUTZRECHT: International WO 2006/089327 A1 (31.08.2006). Trumpf Maschinen Austria GmbH & Co. KG Pr.: 28.02.2005. Theis, H.: Gripper Device.

TORGERSON & PAUL 1988

Torgerson, E.; Paul, F. W.: Vision-Guided robotic fabric manipulation for apparel manufacturing. IEEE - Control Systems Magazine 8 (1988) 1, S. 14–20.

VDI 1970

VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Berlin: Beuth 1970.

VDI 1990

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

8 Literaturverzeichnis

VDI 1993

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

VDI 1995

VDI 2740: Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik - Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter. Berlin: Beuth 1995.

VDI 1996

VDI 2803: Funktionenanalyse Grundlagen und Methode. Berlin: Beuth 1996.

VDI 1997

VDI 2222: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth 1997.

VDI 2006

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006.

VERDENHALVEN 2008

Verdenhalven, J.: Industrialization of the Carbon Composite Industry. In: Erath, M. A. (Hrsg.): CFRP: The cost down solution for top performance 2008. Aachen: SAMPE Europe Business Office 2008, S. 2–18. ISBN: 978-3-9522677-8-3.

VÖCKING ET AL. 2008

Vöcking, B.; Alt, H.; Dietzfelbinger, M.; Reischuk, R.; Scheideler, C.; Vollmer, Heribert; Wagner, Dorothea: Taschenbuch der Algorithmen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-76393-2.

VOGGENREITER 2010

Voggenreiter, H.: Automatisierte Produktion von Composite-Bauteilen – Innovative Ansätze des DLR. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik. Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen. München: Utz 2010, S. 1-1 – 1-22. ISBN: 978-3-89675-098-3.

VOGGENREITER ET AL. 1999

SCHUTZRECHT DE 199 17 726 C1 (11.01.2001). DaimlerChrysler AG Pr.: 20.04.1999. Voggenreiter, H.; Hombergsmeier, E.; Eipper, K.; Fußnegger, W.; Weller, M.: Lösbarer Verschluss.

WARNECKE 2003

Warnecke, H.-J.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. 3., überarb. Aufl. München: Hanser 2003. ISBN: 978-3446185937. (Hanser-Studienbücher).

WARNECKE & FRANKENHAUSER 1986

Warnecke, H.-J.; Frankenhauser, B.: Montage biegeschlaffer Teile mit Industrierobotern. wt Werkstattstechnik 76 (1986) 1, S. 8–11.

WARNECKE & SCHRAFT 1990A Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Band 1: Handhabungstechnik. Landsberg am Lech: Verlag moderne industrie 1990. ISBN: 3-478-42203-5. (Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik 1).

- WARNECKE & SCHRAFT 1990B Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Band 3: Montage-
technik. Landsberg am Lech: Verlag moderne industrie 1990. ISBN: 3-478-
42203-5. (Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik 3).
- WATTER 2007
Watter, H.: Hydraulik und Pneumatik. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn
Verlag | GWV Fachverlage GmbH 2007. ISBN: 3834801909.
- WEGENER 2005
Wegener, I.: Simulated Annealing Beats Metropolis in Combinatorial Optimiza-
tion. In: Caires, L. et al. (Hrsg.): Automata, Languages and Programming. Berlin
Heidelberg: Springer-Verlag 2005, S. 589–601. ISBN: 978-3-540-27580-0.
- WEICKER 2002
Weicker, K.: Evolutionäre Algorithmen. 1. Aufl. Stuttgart: Teubner 2002. ISBN:
978-3519003625. (Leitfäden der Informatik).
- WENGENMAYR 2007
Wengenmayr, R.: Mit unbeschränkter Haftung.
<http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/multimedial/techmax/heft2007_03/pdfTM8de.pdf> - 02.05.2009.
- WÖGERER ET AL. 2005
Wögerer, C.; Nittmann, G.; Tatzer, P.: Intelligent Manipulation of Non-Rigid
Parts in industry applications. In: Proceedings of IEEE/ASME International
Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (2005), S. 1120–1126.
- WOHLFAHRT 2005
Wohlfahrt, A.: Reibschlüssige Greifsysteme für die automatische Handhabung
im Materialfluss. Logistics Journal (Online Journal) (2005), S. 1–19.
- WOLF & STEINMANN 2005
Wolf, A.; Steinmann, R.: Greifer in Bewegung. München: Hanser 2005. ISBN:
3-446-22932-9.
- WULFHORST 1998
Wulforst, B.: Textile Fertigungsverfahren. München: Hanser 1998. ISBN: 3-
446-19187-9.
- WULFHORST ET AL. 2006
Wulforst, B.; Gries, T.; Veit, D.; Berndt, E.: Textile technology. Munich: Han-
ser 2006. ISBN: 3-446-22963-9.
- WULFSBERG ET AL. 2010
Wulfsberg, J.; Clausing, N.; Neuhaus, F.; Schildt, R.: Sensorunterstützung in der
automatisierten Montage von CFK-Bauteilen. wt Werkstattstechnik online 100
(2010) 9, S. 692–697.
- ZÄH ET AL. 2006
Zäh, M. F.; Rimpau, C. F.; Hoffmann, H.; Träger, M.: Innovative Strategien für
die Produktion der Zukunft. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium
2006 Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. München: Herbert
Utz 9./10. 03. 2006, S. 109–121. ISBN: 3-8316-0575-0.

ZANGEMEISTER 1973

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 3. Aufl. München: Wittenmannsche Buchhandlung 1973.

ZENTAY ET AL. 1998

Zentay, P.; Zoller, Z.; Arz, G.; Tóth, A.; Merksz, I.; Mikó, Balázs: Handling of Polyurethane Foams with Robot. Proceedings of First Conference on Mechanical Engineering (1998), S. 529–533.

ZHANG 1999

Zhang, Z.: Modeling and Analysis of Eletrostatic Force for Robot Handling of Fabric Materials. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 4 (1999) 1, S. 39–49.

ZIEGLER 2008

Ziegler, J. W.: Handhabungs- und Montagetechnik. Skriptum zur Vorlesung. Fachhochschule Düsseldorf. Düsseldorf (2008).

ZIMMER ET AL. 1990

SCHUTZRECHT US 5,161,844 (10.11.1992). KUKA Schweissanlagen GmbH Pr.: 07.09.1990. Zimmer, D.; Weichard, G.; Hensel, J.: Process and grasping device for picking up, transporting, and depositing flat parts made of textile material, etc.

ZSCHUNKE 2005

Zschunke, F.: Aktoren auf der Basis des magnetorheologischen Effekts. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (2005). Erlangen (2005).

9 Anhang

Im folgenden Anhang der Arbeit sind in Abbildungen und Tabellen Ergebnisse zu finden, die dem Leser Informationen zur Verfügung stellen, welche über das reine Verständnis der Arbeit hinausgehen bzw. beispielhafte Umsetzungen der beschriebenen Methoden und Ansätze darstellen. Dieser Teil dient somit maßgeblich der Verdeutlichung der bisherigen Inhalte, ohne nochmals explizit die Ergebnisse zu beschreiben.

Neben der Detaillierung der Material- und Produktuntersuchungen durch die Darstellung der Verfahren, Berechnungsgrundlagen sowie beispielhafter Ergebnisse (vgl. *Abbildung 119* bis *Abbildung 126*), werden zunächst Unterlagen zur Definition des Anforderungssystems bzw. Lastenhefts aufgezeigt (vgl. *Tabelle 10* und *Tabelle 11* sowie *Abbildung 127*). Weitergehend werden alle im Rahmen der Arbeit vorgestellten Greifprinzipien in ihrer Wirkungsweise und Einordnung katalogartig dargestellt, um den Leser ein Nachschlagewerk derzeit möglicher Prinzipien zur Verfügung zu stellen (vgl. *Tabelle 12* bis *Tabelle 18*).

Die Hintergrundinformationen zur Bewertung von Greifprinzipien werden in *Tabelle 19* und den *Abbildung 128* bis *Abbildung 132* erläutert, während die *Tabellen* *Tabelle 20* bis *Tabelle 22* einen Überblick über die Rahmenbedingungen und Ergebnisse bei der wirtschaftliche Absicherung des unterdruckbasierten Greifprinzips geben. Die *Abbildung 133* bis *Abbildung 141* sowie die *Tabelle 23* enthalten Informationen zur Konzeption einzelner Module und weiterführend wird die zur Validierung verwendete Versuchsumgebung dargestellt (vgl. *Abbildung 142* bis *Abbildung 144*).

Schließlich gehen die *Abbildung 145* bis *Abbildung 149* auf einzelne Ergebnisse der experimentellen Validierung ein.

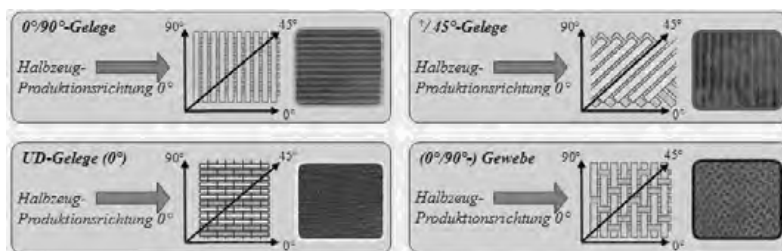


Abbildung 119: Faserorientierungen bezogen auf die Produktions- bzw. Abrollrichtung

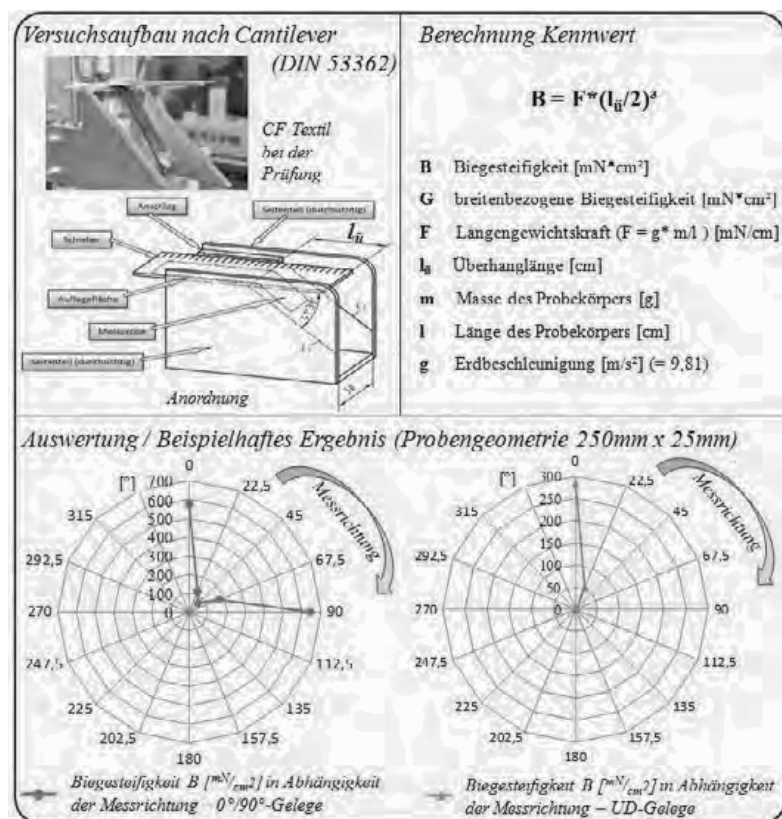
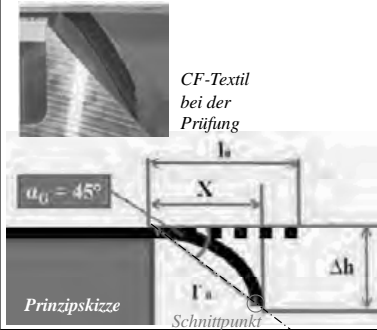


Abbildung 120: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte: Biegesteifigkeit

Versuchsaufbau in Anlehnung an Cantilever (DIN 53362)



Berechnung/Ermittlung Kennwert

a) Messung X oder Δh :

$$l_0 \approx \Gamma_0 = X / \cos \alpha = \Delta h / \sin \alpha$$

$$L_{UG}(\alpha = \alpha_G) = X / \cos \alpha_G = \Delta h / \sin \alpha_G$$

L_{UG} Grenzüberhanglänge [mm]

α_G Grenzwinkel [°]

L_a Überhanglänge [mm]

Γ_a genäherte Überhangl. (Schnittp.) [mm]

X horizontaler Abstand Schnittpunkt [mm]

Δh horizontaler Abstand Schnittpunkt [mm]

b) oder: Messung $l_{ü}$

Auswertung / Beispielhaftes Ergebnis (Probengeometrie 250mm x 25mm)

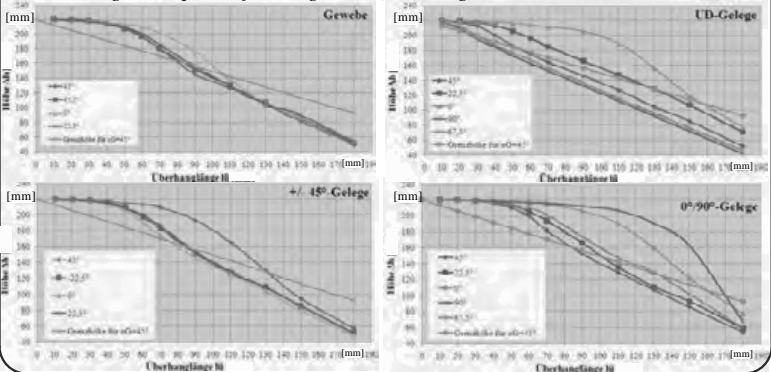
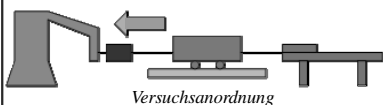


Abbildung 121: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte: Abklappverhalten

Versuchsaufbau in Anlehnung an DIN EN ISO 13934-1



CF-Textil
bei der
Prüfung



Versuchsanordnung

Berechnung/Ermittlung Kennwert

$$\epsilon_D = \Delta L / L_0$$

ϵ_D Dehnung [%]

ΔL Längenänderung [mm]

L_0 Ursprungslänge [mm]

Auswertung / Beispielhaftes Ergebnis

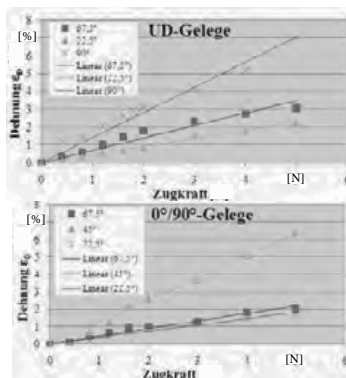
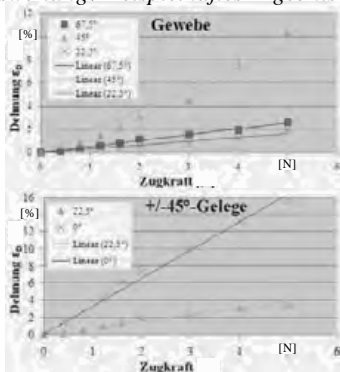
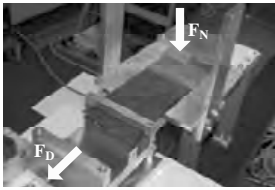
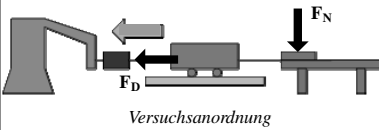


Abbildung 122: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte:
Dehnung

Versuchsaufbau in Anlehnung an DIN EN ISO 8285



CF-Textil
bei der
Prüfung



Berechnung Kennwert

$$\mu_D = F_D / F_N$$

μ_D Dynamischer Reibkoeffizient [-]

F_D Dyn. Reibkraft [N]

F_N Normalkraft [N]

Auswertung / Beispielhaftes Ergebnis

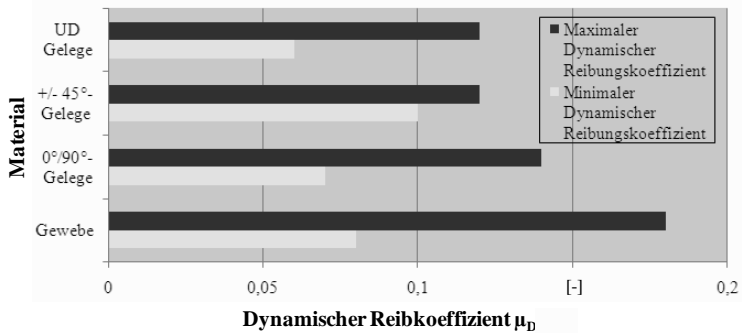


Abbildung 123: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte:
Reibung

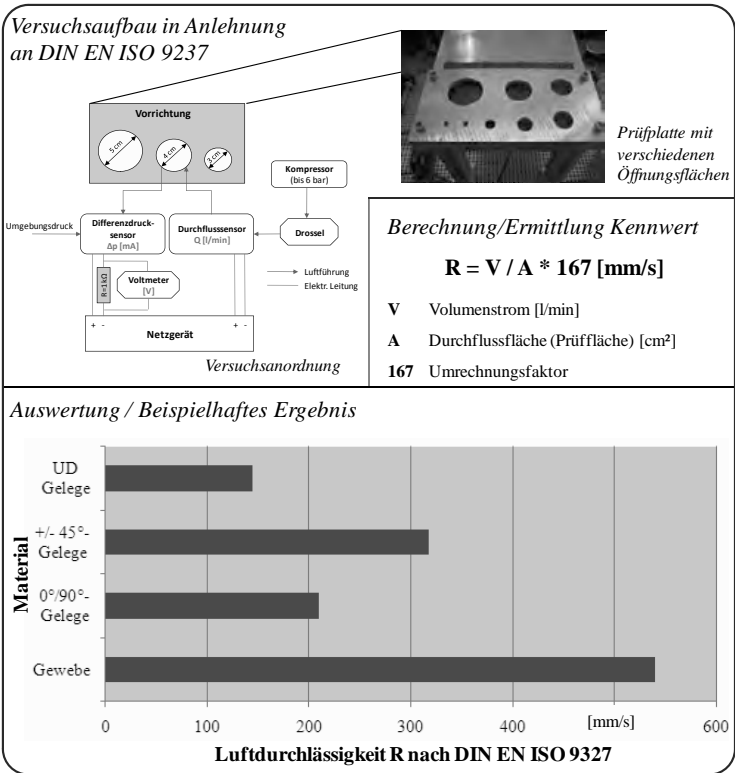


Abbildung 124: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte:
Luftdurchlässigkeit

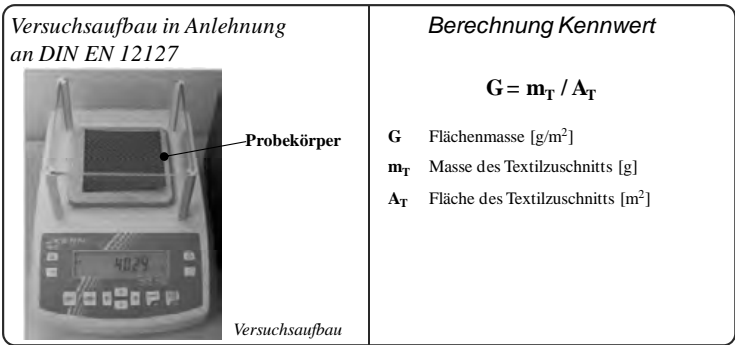


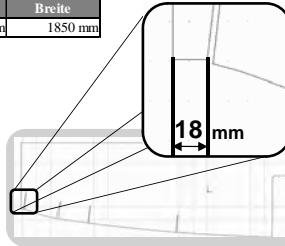
Abbildung 125: Bestimmung handhabungsspezifischer Materialkennwerte:
Flächenmasse

Geometrieanalyse

Maximalwerte	Maximale Abmessungen		Kleinsten Ausschnitt	
Zuschnittsunabhängig	Länge	Breite	Längenricht.	Breitenricht.
Produkt A	2122 mm	667 mm	18 mm	99 mm
Produkt B	701 mm	302 mm	158 mm	64 mm
Produkt C	2116 mm	955 mm	37 mm	51 mm
Gesamt	2122 mm	955 mm	18 mm	51 mm
Maximalwerte	Größter Zuschnitt		Kleinsten Zuschnitt	
Zuschnittsunabhängig	Länge	Breite	Länge	Breite
Produkt A	2122 mm	667 mm	467 mm	167 mm
Produkt B	701 mm	302 mm	158 mm	64 mm
Produkt C	2116 mm	955 mm	389 mm	352 mm
Gesamt	2116 mm	955 mm	158 mm	64 mm
Halbzugabmessungen	Länge	Breite	Nutzbare Breite	
(Länge in Abrollrichtung)	30-50 m (Rolle)	1300 mm	1200 mm	
Cutterabmessungen	Länge	Breite		
(Absortierbereich)	2500 mm	1850 mm		



Größter Zuschnitt
(Produkt C: Nr. 53):
Länge 2116 mm, Breite 955 mm



Kleinsten Ausschnitt in Längsrichtung

Abbildung 126: Ergebnisse Geometrieanalyse der Referenzprodukte

Tabelle 10: Fragenkatalog zur Bestimmung von produkt- und prozessspezifischen Einflussgrößen am Beispiel des Referenzszenarios

Produktspezifika	Fragestellung	Einflussgröße
Vorliegendes Spektrum		
Materialvarianz	Welche Materialvarianz wird verarbeitet?	4 Referenzmaterialien
Formenvarianz	Welche Produkte werden verarbeitet?	3 Referenzprodukte (A, B, C)
Geometrieanalyse	Daraus resultierende Zuschnittsgeometrien? (Min/Max?) (Ausschnitte?)	siehe Geometrieanalyse
Produktqualität		
Strukturintegrität	Maximal zulässige laterale Verschiebung eines Faserbündels (Roving)?	+/- 1 mm
	Maximal zulässige orthogonale Verschiebung eines Faserbündels (Roving)?	+/- 1 mm
	Maximal zulässige Beulenbildung (orthogonale Höhe)?	+/- 1 mm
	Maximal zulässiger Winkeldefekt eines Faserbündels (Roving)?	+/- 1°
Werkstoffintegrität	Zulässige Partikelmission?	Keine
	Zu vermeidende Fremdstoffe?	Silicone, Öle, Wasser
Prozessspezifika		
Vorgelagerte Prozesse	Eingesetztes Trennverfahren?	Mechanisches Trennen (Rundmesser)
	Eingesetzte Schneidunterlage?	Permeables Faservlies
	Verarbeitete Lagenanzahl?	1-lage
Nachgelagerte Prozesse	Anordnung der Zuschnitte?	Durch Nesting nicht vorhersehbar
	Welche Prozesse werden anschließend durchgeführt?	Lagern und anschl. Preforming
Leistungsfähigkeit	Maximale Taktzeit für das Absortieren eines Zuschnittes?	60 s
	Welches Schichtsystem betreibt das Unternehmen im Fertigungsbereich?	1 Schicht a 8 h
	Minimale notwendige Ausbringung des Systems per Stunde?	60 Zuschnitte per h
	Minimale Ablegegenauigkeit des Zuschnitts?	+/- 1 mm
Prozessqualität	Gewünschte Prozesssicherheit/Prozesspotential?	99,67 % (Vollautomatisierung)
	Relevanz der Reproduzierbarkeit?	Hoch (Luftfahrtindustrie)
	Kostenziel für die hardware des Greifsystems?	80.000 €
Randbedingungen Umfeld	Maximal zulässiges Gewicht des Greifsystems (durch Roboterkinematik)?	275 kg
	Maximal zur Verfügung stehender Bauraum?	Freiraum bei 6-Achs Knickarmroboter
	Mit welcher Betriebstemperatur muss gerechnet werden?	18 - 25 °C
	Mit welcher Luftfeuchtigkeit im Betrieb muss gerechnet werden?	20 - 70 %

Einflussfaktoren auf ein Greifsystem zum Absorbieren von technischen Textilien

Anforderungen an ein Greifsystem zum Absorbieren von technischen Textilien

Bewertungsschema

Starke Beeinflussung

Schwache Beeinflussung

Keine Beeinflussung

		Funktionalität			Leistungsfähigkeit			Qualität			Wirtschaftlichkeit			
		Quasi-flüchliges Greifen	formanpassendes Greifen	Selektives, flächen-spezifisches Greifen	Definierter Halten & Lösen	Vom-trichterförmige Ausdehnung	Trichter, deformierbare Halterüste (Normal- und Querkraft)	Geschwindigkeit / Taktzeit	Flexibilität	Präzises Aufnehmen und Ablegen	Minimierung des Greifens (Erhaltung Strukturintegrität)	Rückstandsfreiheit	Investitions- und Wartungskosten	Vertriebskosten
Materialspezifisch	Biegefestigkeit	●	●	●	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	Abklappverhalten	●	●	●	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	Strukturstabilität	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Anisotropie / Faserorientierung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Flächenmasse	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Reißenverhalten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Luftdurchlässigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Adhäsivität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Elektrische Eigenschaften	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Dichte	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Dicke	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Oberflächenbeschaffenheit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Produktspezifisch	Strukturintegrität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Werkstoffintegrität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Abmessungen	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kontur	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Formvarianz	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Prozessspezifisch	Materialvarianz	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Lageranzahl	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Pre-Prozess (Schneiden)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Post-Proz. (Lagern, Preform.)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Genauigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Reproduzierbarkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Prozesssicherheit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Taktzeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kostenrahmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Gewicht	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Platzraum	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 127: Zuordnungsmatrix der Einflussfaktoren und daraus resultierende Anforderungen an das zu entwickelnde Greifsystem

Tabelle 11: Lastenheft: Anforderungen für das Referenzszenario

Anforderung		Ausprägung
Funktionalität	(Quasi-)Flächiges Greifen	Möglichst flächige Krafteinleitung; maximaler Abstand Greifpunkte oder -flächen 25 mm
	Formunterstützendes Greifen	Formunterstützung aufgrund geringer Biegesteifigkeit und Strukturstabilität
	Selektives, flächenspezifisches Greifen	Sowohl einzelne als auch mehrere Zuschnitte gleichzeitig greifbar und gemeinsam oder einzeln ablegbar; flächenspezifisches Greifen mit hoher Auflösung und Konturtreue (Flächige Vereinzelung) aufgrund geringer Biegesteifigkeit und Konturenvielfalt; maximale Ausdehnung eines Greifpunktes / einer Greiffläche 18 mm (kl. Ausschnitt)
	Definiertes Halten & Lösen	Terminierte und eindeutig abgrenzbare Halte- und Lösephasen; Halten trotz textiler, unterschiedlicher permeabler und anisotroper Eigenschaften; Für hohe Prozesssicherheit undefiniertes Halten am System vermeiden
Leistungsfähigkeit	Geometrische Ausdehnung	Mindestlänge 2122 mm und Mindestbreite 955 mm (größter Zuschnitt) Zielwerte: Länge 2250 mm und Breite 1200 mm (Nutzbreite Halbzeug); Maximallänge 2500 mm und Maximalbreite 1850 mm (Absortierbereich Cutter);
	Hohe, definierbare Haltekräfte (Normal- und Querkraft)	Flächenbezogene Normalkraft größer als flächenbezogene Gewichtskraft (resultierend aus unterschiedlichen Flächenmassen), Verhackungs- und Trägheitskraft; Höhe der Kraft definierbar so dass keine Strukturschäden entstehen; Querkraftaufnahme ohne Strukturbeschädigung und Verschiebung (Qualität)
	Geschwindigkeit / Taktzeit	Taktzeit zum Absortieren eines Zuschnitts maximal 60 s;
	Flexibilität	automatisierte Anpassungsfähigkeit in der Greiffläche, Greiferpositionierung, Haltekraft
Qualität	Präzises Aufnehmen und Ablegen	Aufnahme eines Zuschnitts ohne Beeinflussung benachbarter Zuschnitte; Ablegegenauigkeit +/- 1 mm und +/- 1°;
	Minimalinvasives Greifen; Erhaltung Strukturintegrität	Erhaltung der Strukturintegrität bei angreifenden Kräften (Normal-, Gewichts- und Trägheitskräfte); Möglichst kein Eindringen des Greifers in die Struktur (Minimalinvasiv)
	Rückstandsfreiheit	Keine Partikelimmission von Fremdstoffen; Keine Anhaftungen von Fremdstoffen, insbesondere Öle, Silikon, Wasser;
Wirtschaftlichkeit	Investitions- und Deinvestitionskosten	Einhaltung des Kostenrahmens (Invest in Hardware max. 80.000 €)
	Betriebskosten	Möglichst geringe Betriebskosten

Tabelle 12: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 1 von 7

Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipiskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Klemmen	Das Greifen des Handhabungsmaterials über mechanisches Klemmen wirkt rein kraftschlüssig über Reibungskräfte zwischen Material und Greiffläche. Über das Aufbringen von Normalkräften auf das Greifgut durch die beweglichen Greifbacken wird eine Reibungskraft erzeugt, die der Gewichtskraft des Handhabungsmaterials durch Spannen des Materials entgegenwirkt.	<p>Normalkraft: F_N Reibungskoeffizient: μ Reibungskraft: $F_R = \mu \cdot F_N$ Gewichtskraft: $F_g = m \cdot g$ Für Prozesssicheres Halten gilt: $F_g \leq \sum F_R$</p> <p><i>Parallel-Klemmgreifer der Fa. Schunk & Co. KG</i></p>	HESSE 1991; HESSE ET AL. 2004; WOLF & STEINMANN 2005	TRG9	Ausschlusskriterium Nicht anwendbar, da kein flächiges Vereinzeln möglich; Zugänglichkeit der Zugschnittante bei flächigem Verbund nicht gegeben;
Kneifen	Prinzip folgt dem Klemmgreifen, jedoch wirken die Reibungskräfte tatsächlich gegen die Gewichtskraft. Dies wird durch eine Faltenbildung bzw. durch ein Mikro-Klemmgreifen einzelner Rovings erreicht.	<p>Normalkraft: F_N Reibungskoeffizient: μ Reibungskraft: $F_R = \mu \cdot F_N$ Gewichtskraft: $F_g = m \cdot g$ Für Prozesssicheres Halten gilt: $F_g \leq \sum F_R$</p> <p><i>Als Kneifgreifer einsetzbarer Mikro-Greifer der Fa. MF Automation GmbH</i></p>	HESSE 1991; HESSE ET AL. 2004; WOLF ET AL. 2005	TRG9	Ausschlusskriterium Strukturbeeinflussung durch prinzipbedingte Faltenbildung; Resultat: Falten, Beulen und Veränderung der Rovingabstände;
Aufwälzen	Das reibschlüssige Aufwälzen geht auf Systeme zurück, wie sie für das Depaletieren von Stückgütern eingesetzt werden. Hier wird über ein durch zwei Walzen geführtes Förderband das zu handhabende Gut auf den Greifer gezogen. Durch gummierte Elemente auf dem Band wird die Reibung auf das Stückgut erhöht, so dass ein Prozesssicheres Handhaben ermöglicht wird.	<p>Normalkraft: F_N Reibungskoeffizient: μ Reibungskraft: $F_R = \mu \cdot F_N$ Gewichtskraft: $F_g = m \cdot g$ Für Prozesssicheres Halten gilt: $F_g \leq \sum F_R$</p> <p><i>Als Kneifgreifer einsetzbarer Mikro-Greifer der Fa. MF Automation GmbH</i></p>	JUNEMANN & SCHMIDT 2000; WOHLFART 2005	TRG7	Ausschlusskriterium Nicht anwendbar, da kein flächiges Vereinzeln möglich. Besonders bei Zugschnitten mit Hinterschnitten müsste die Zugschnittfläche selektiv angehoben werden.

Tabelle 13: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 2 von 7

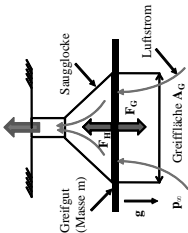


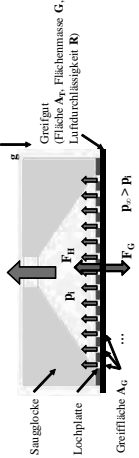
Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Haftsaugen	Durch die Erzeugung eines Volumenstroms wird ein Differenzdruck erzeugt, der über die Saugfläche der Gewichtskraft des Greifgutes entgegenwirkt. Je höher der Differenzdruck, desto höher wird die Haftkraft auf das Bauteil. Der Anwendungsbereich liegt vor allem bei nicht-permeablen Greifgütern.	 <p> $F_G = m \cdot g$ $F_H = \Delta p \cdot A_G$ $\Delta p = p_a - p_i$ mit $p_i \geq p_i$ Für Prozesssicheres Greifen gilt: $F_H \geq F_G$ </p> <p>  <i>Haftsauger</i>  <i>Flachsauger</i> </p>	HESSE 2005	TRG9	Positiv; Greifen ist möglich und hohe Haftkräfte erreichbar.
Niederdruckflächensaugen	Durch die Erzeugung eines Volumenstroms wird ein Differenzdruck erzeugt, der über die kumulierte Saugfläche der Gewichtskraft des Greifgutes entgegenwirkt. Im Gegensatz zum Haftsauger beruht das Prinzip auf einer geringen Druckdifferenz, aber hohem Volumenstrom. Eine gebogene Platte als Kontakt zum Handhabungsmaterial unterstützt den Zugschnitt großflächig. Das Prinzip des Niederdruckflächensaugens ist in der industriellen Anwendung für formlabile Materialien nicht vertreten.	 <p> $F_G = G \cdot A_G$ $F_H = \Delta p \cdot A_G$ </p> <p> $\Delta p = p_a - p_i$ mit $p_i \geq p_i$ Für Prozesssicheres Greifen gilt: $F_H \geq F_G$ </p>	JODIN 1991	TRG5	Positiv; Greifen ist möglich und hohe Haftkräfte sind erreichbar.

Tabelle 14: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 3 von 7

Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Bernoulli	Ist ein Fluid gezwungen, eine schnellere Strömungsgeschwindigkeit einzunehmen, sinkt der Druck in Fluid ab. Die somit erzeugte Druckdifferenz zwischen der Profilunter- und Profiloberseite erzeugt die notwendige, der Gewichtskraft entgegenwirkende, Auftriebskraft und lässt sich auch in einem Greifelement umsetzen. Aufgrund des sich ausbildenden Luftpolsters zwischen Greifer und Greifgut ist dieses Prinzip besonders geeignet, um Bauteile mit sehr empfindlichen Oberflächen handzuhaben. Ein nahezu berührungsfreies Greifen der Bauteile kann durch dieses System erreicht werden. Diese Greifelemente sind bereits in industriellen Handhabungssystemen im Einsatz.	<p>Druckluftzuführung Luftstrom Unterdruckbereich (Wirtdruckbereich A₀) Greifgut (Masse m) F_g g F_g</p> <p>Gewichtskraft: $F_g = m \cdot g$ Haftkraft: $F_H = \Delta p \cdot A_0$ Druckdifferenz: $\Delta p = p_1 - p_2$ Für prozesssicheres Greifen gilt: $p_1 > p_2$ $F_H \geq F_g$</p> <p>Bernoulli-Greifelemente der Fa. J. Schmalz GmbH</p>	GERTHSEN & MESCHDE 2006; SCHILP 2006	TRG9	Positiv: Greifen möglich; Haftkräfte erreichbar; Zerstörung gering;
Coanda	Der Coanda-Effekt beschreibt die Tendenz eines Gas- bzw. Flüssigkeitsstrahles, sich einem konvexen Profil anzunähern anstatt sich abzuheben. Dieser Effekt der Annäherung an das umströmte Profil kann auch in geschlossenen Systemen zur Volumenstromerzeugung angewandt werden. Dazu wird Druckluft in eine ringförmige Kammer geblasen, die über die sogenannte Coanda-Kurve strömt. Der Luftstrom nimmt aufgrund des Ringspaltes eine sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit an, wird über die Profilschneidung umgelenkt und erzeugt somit einen hohen Volumenstrom bei geringem Differenzdruck.	<p>Druckluft Coanda-Kurve Saugluft Greifgut (Masse m) F_g g F_g p₁ > p₂ Greiffläche A₀</p> <p>Gewichtskraft: $F_g = m \cdot g$ Haftkraft: $F_H = \Delta p \cdot A_0$ Druckdifferenz: $\Delta p = p_1 - p_2$ Für prozesssicheres Greifen gilt: $p_1 > p_2$ $F_H \geq F_g$</p> <p>Auswirkung des Coanda-Effekts bei Profilstromung</p> <p>Mustergreifer – Planar Coanda effector (Quelle: LIEN ET AL. 2008)</p> <p>Coanda-Greifer der Fa. Schmalz (Quelle: SCHMALZ 2011)</p>	LIEN & DAVIS 2008; SAUBER 1998; SCHMALZ 2011	TRG9	Funktionstest mit Mustergreifer: Große Saugöffnung (Ø 40 mm) verursacht hohe Strukturveränderung (Beulenbildung), was ein Ausschlusskriterium darstellt. Die Öffnung könnte durch ein Gitter in der Art eines Niederdruckflächensaugers verschlossen werden, wodurch jedoch der Coanda-Effekt auf die Vakuumverzeugung reduziert wird und als eigenständiges Prinzip ausscheidet.

Tabelle 15: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 4 von 7

Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Coulomb-Kraft	Werden elektrische Ladungen in dem Greifgut induziert, können auf dieses durch ein entsprechend entgegengesetzt geladenes Greifelement Kräfte ausgeübt werden, die in entsprechender Größe ein Greifen ermöglichen. Elektrostatistische Kräfte werden durch ruhende elektrische Ladungen hervorgerufen und werden durch das Coulombsche Gesetz beschrieben.	<p>Abstand d</p> <p>Elektrode</p> <p>Dieterikum</p> <p>Greifgut</p> <p>Greiffläche A_G</p> <p>Greifkraft F_G</p> <p>Greifkraft $F_G = m \cdot g$</p> <p>Haltekraft:</p> <p>Für Prozesssicheres Greifen gilt: $F_G \geq F_G$</p>	MONKMAN ET AL. 2007; GERTHSEN & MESCHKE 2006	TRG4	Funktionstest durch Prinzipaufbau. Mit Potenzialkliffern von bis zu 120 V kann keinerlei Haltekraft erzeugt werden. Eine theoretische Abschätzung der notwendigen Spannung zur Kompensation der Gewichtskraft ergibt bei $(\frac{F_G}{A_G})_{\min} = \frac{N}{m^2} \cdot 2; \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{Vs})$ einen Wert von 686 V.
Lorentz-Kraft	Ist das Handhabungsgut elektrisch leitend, ist die Voraussetzung für die Krafterzeugung über den Lorentz-Effekt gegeben. Die Lorentzkraft ist nach Definition eine Kraft, die ein magnetisches Feld auf elektrische Ladungen ausübt. Wird im Greifgut ein Stromfluss erzeugt und in ein magnetisches Feld gebracht, stellt es einen stromdurchflossenen Leiter dar, der aufgrund der wirkenden Lorentzkraft ausgelenkt wird.	<p>Greifgut (elektrisch leitend, Masse m)</p> <p>Greifkraft F_G</p> <p>Greifkraft $F_G = m \cdot g$</p> <p>Haltekraft:</p> <p>Für Prozesssicheres Greifen gilt: $F_G \geq F_G$</p>	GERTHSEN & MESCHKE 2006	TRG2	Reifegrad nicht ausreichend; Funktionstest durch Prinzipaufbau: Einzelne Rovings sind mit Kraft beaufschlagbar, jedoch kann einfach kein gleichgerichteter Stromfluss in einem textilen Werkstoff erreicht werden (Gewebe, Multaxialgelege).
Nadeln	Das Prinzip der Nadelgreifer beruht auf längsbeweglichen Nadeln, die beispielsweise über einen Pneumatizylinder aus dem Gehäuse des Greifers ausgefahren werden können. Durch die schräg in das Greifgut eindringenden Nadeln wird das Material unter dem Greifer gespannt. Die resultierenden Spannkraften verhindern ein unbeabsichtigtes Lösen des Zuschlittes vom Greifer. An jeder der Nadeln wirken punktuell Haltekraften auf das Greifgut.	<p>Greifkörper</p> <p>Nadel</p> <p>Greifkraft F_G</p> <p>Greifkraft $F_G = m \cdot g$</p> <p>Haltekraft:</p> <p>Für Prozesssicheres Greifen gilt: $F_G \geq F_G$</p>	GUTSCHE 1993	TRG9	Positiv: Hohe Haltekraften erreichbar;

Tabelle 16: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 5 von 7

Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Kratzen	Das Greifen über eine Vielzahl Kratzenzähne unterscheidet sich von den Nadelgreifern durch die Art der Kratteinleitung. Während die Nadeln in Längsrichtung vollständig in das Bauteil eingebracht werden, wirken die Kratzenzähne nur geringfügig in die Struktur des Greifguts ein und erzeugen die notwendige Haltekraft über das Verfahren der Zähne parallel zur Bauteiloberfläche (ggf. gegen den Widerstand der textilen Bindung).		GUTSCHE 1993	TRG9	Ausschlusskriterium: Zerstörung der Faserstruktur durch Linearbewegung der Kratzen, Aufweiten der Faserabstände.
Klettverschluss	Das Klettverschlussprinzip für eine formschlüssige Verbindung mit hohen Haltekraften zu nutzen hat in vielen ind. Anwend. ihren Einsatz gefunden. Zum Halten textiler Greifgüter werden einzelne Fasern in biegbare Schlingen oder Plitze eingehakt. Dieser Formschluss wird durch verstärkte Zugkräfte bei gleichzeit. Fixierung des Greifgutes aufgehoben und Lösen ermöglicht.		MONKMAN ET AL. 2007	TRG5	Funktionstest: Zerstörung der Faserstruktur durch Lösevorgang. Verhakung einzelner Fasern, welche orthogonal zur Fläche herausgezogen werden.
Magnetorheologie	Magnetorheologischen Flüssigkeiten (MRF) bestehen aus wenigen um großen magnet. Partikeln, die in einer Trägerflüssigkeit suspendiert sind und deren Viskosität sich unter Einfluss eines magnet. Feldes stark erhöht. Dieses Prinzip lässt sich für das Greifen poröser Materialien anwenden. Ohne Magnetfeld weisen die MRF einen flüssigen, niederviskosen Aggregatzustand auf und können die Struktur des Greifguts infiltrieren. Nach der Beaufschlagung eines Magnetfeldes verfestigt sich das eingebrungene Fluid und bildet eine formschlüssige Verbindung, welche durch Umkehrung des Effekts wieder gelöst werden kann.		ZSCHUNKE 2005	TRG1	Reifegrad nicht ausreichend;

Tabelle 17: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 6 von 7

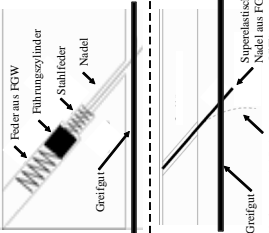
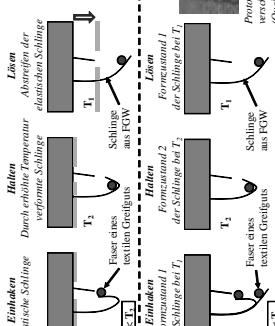
Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	Funktions test (Ergebnis)
Formgedächtnis Nadeln	<p>Unter Formgedächtniseffekt wird im Allgemeinen die Eigenschaft eines Materials, nach einer Formänderung in Niedrigtemperatur-Zustand durch Erwärmen seine ursprüngliche Form nahezu vollständig oder teilweise anzunehmen, verstanden. Bei Nadelgreifern ergeben sich zwei Möglichkeiten zum Einsatz von FGW-Materialien. Zum einen kann der Nadelantrieb aus einer FGW-Feder bestehen, die gegen eine Stahlfeder arbeitet und durch zwei temperaturbedingte Formzustände das Ausfahren der Nadel bewirkt. Zum anderen kann die Nadel (durch den Einsatz der Legierung NiTi (FG-fähig) superelastisch und damit extrem dünn ausgeführt werden.</p>	 <p>FGW ANTRIEB</p> <p>NITi-NADELN</p> <p>Funktionsskizze mit NITi-Feder (Quelle: SCHELER2008)</p> <p>Prototyp mit superelast. Nadeln (Quelle: SCHELER2008)</p>	<p>SCHELER 2008; SCHELECH 2004; PRT-SCHELLIS 1998</p>	TRG3	<p>Reifegrad nicht ausreichend; Der Bau eines ersten NITi-Feder betriebenen Nadelgreifers ergibt erhebliche Probleme durch ein unsynchrones und zeitintensives Abkühlen (Einfahren) der einzelnen Nadeln. Im Falle superelastischer Nadeln lassen sich zwar brauchbare Greifergebnisse erreichen, jedoch liegen die Vorteile gegenüber dem zusätzlichen Entwicklungsaufwand in keinem Verhältnis.</p>
Formgedächtnis Klettverschluss	<p>Unter Formgedächtniseffekt wird im Allgemeinen die Eigenschaft eines Materials, nach einer Formänderung in Niedrigtemperatur-Zustand durch Erwärmen seine ursprüngliche Form nahezu vollständig oder teilweise anzunehmen, verstanden. Die Nutzung von Formgedächtniswerkstoffen (FGW) für Klettverschlussgreifer basiert auf zwei möglichen Ansätzen. Beim Einwegeffekt werden die Fasern in bei T_1 elastische Schlingen eingehakt, welche sich nach der Temperaturänderungen auf T_2 in eine vordefinierte Form verfestigen. Das Lösen wird über eine Abtriebsplatte bei elastischen Nadeln realisiert. Der Zwewegeffekt nutzt zwei definierte Formzustände bei den Temperaturen T_1 und T_2 zum Einhängen und Lösen bzw. Halten des Greifguts.</p>	 <p>Einwegereffekt</p> <p>Zwewegeffekt</p> <p>Prototyp eines Klettverschlusses (Quelle: SCHELER2008)</p>	<p>SCHELER 2008; VOGGENREITER ET AL. 1999</p>	TRG3	<p>Reifegrad nicht ausreichend; Beim Bau eines ersten Prototypen stellen sich erhebliche Probleme beim definierten Erreichen des elastischen Zustandes bzw. dem definierten Schalten zwischen zwei Zuständen ein.</p>

Tabelle 18: Übersicht potenzieller Wirkprinzipien – Teil 7 von 7

Wirkprinzip	Beschreibung	Prinzipskizze	Quellen	Reifegrad	(Ergebnis) Funktionstest
Hydro-Adhäsion	Das Adhäsionsgreifen beruht auf dem Prinzip der molekularen Kräfte zwischen zwei sich berührenden Flächen. Das hydroadhäsive Greifen wird oftmals auch als Gefriergreifen bezeichnet. Über das Gefrieren eines in die Struktur des Handhabungsmaterialies infiltrierten Wirkmediums (meist Wasser) bildet der Gefriergreifer einen Stoffschluss zwischen der Kontaktfläche des Greifers und dem Bauteil. Dieser Stoffschluss ermöglicht es, große Kräfte aufzunehmen, ohne die Struktur des Textils zu beeinträchtigen.		KOCH 1992; STEPHAN 2001	TRG9	Ausschlusskriterium: Freundstoffentzug durch Wasser oder andere Fluide (können nicht vollständig verdampft werden). Funktionstest mit erzeugtem Prototyp ergibt lange Schutzzeiten, welche die geforderte Prozesszeit gefährden.
Adhäsion	Das Adhäsionsgreifen beruht auf dem Prinzip der molekularen Kräfte zwischen zwei sich berührenden Flächen. Eine der beiden Flächen ist das Hallelement, eine Adhäsionsfolie. Die zweite Fläche, die Oberfläche des Greifguts, steht mit dem Adhäsiv im direkten Kontakt, wodurch die Hallefunktion zwischen beiden Flächen erzeugt wird. Bei Abnutzung oder Verschmutzung kann die Folie weiterbewegt werden.		ZIEGLER 2008; MONSKMANN & SHIMMIN 1991; CZARNECKI 1995; PHAM & HEGENBOTHAM 1986	TRG9	Ausschlusskriterium: Verbleibender Fremdstoffentzug durch adhäsive Medien (OCHS 2010) sowie Gefährdung der Faserstruktur beim Lösevorgang (Abschälen).
Nanostrukturierte Oberflächen	Aus der Natur sind Phänomene bekannt, die Hallekräfte durch eine enorme Vergrößerung der Greiffläche über Van-der-Waals-Kräfte erzeugen. Diese Kräfte beruhen auf Ladungsverchiebungen in den Elektronenhüllen der Moleküle. Die technische Nutzung dieses Ansatzes in einem Greifsystem ist denkbar, wobei eine nanostrukturierte Oberfläche mit dem Greifgut in Kontakt gebracht wird.		WENGENMAYR 2007	TRG3	Reifegrad nicht ausreichend. In ersten Funktionstests mit nanostrukturierten Oberflächen konnte keine Hallekraft erreicht werden.

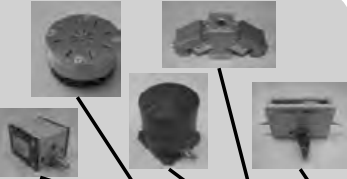
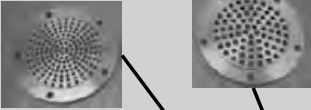
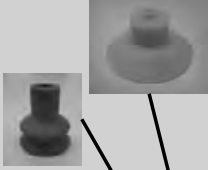


					
Greifelement (Typ)	N1 (SNG M)	N2 (SNG R)	N3 (ST 40)	N4 (NBE2.5)	N5 (Special)
Hersteller	Schnitzl	Schnitzl	Schnitzl	Jensen	Jensen
Anzahl Wirkrichtungen	2	16	4	4	4
Aufbau	2,2	radial	radial je 16	5,5	20/20
Auswahl Nadeln	4	16	40	10	40
Nadeln Ø [mm]	0,8	1,2	0,7	2,5	0,7
Einsteckwinkel [°]	30	45	30	40	20
Wirk-/Kontaktfäche [mm²]	1,1·10 ³	5,0·10 ³	2,8·10 ³	3,5·10 ³	1,4·10 ³
Antrieb	porosan	porosan	porosan	porosan	porosan
Hub [mm]	3	0...4,5	0...2,5	0...2,5	0...2,5
Nadelgreifen					
					
Greifelement (Typ)	NFS1 (90 2)	NFS2 (90 4)	Greifelement (Typ)	H1 (Baipen)	H2 (Flach)
Hersteller	Fundstrom	Fundstrom	Hersteller	MT-Autom	MT-Autom
Trichterabschl.	154	74	Außen Ø [mm]	18	26
Saugloch Ø [mm]	2	4	Innen Ø [mm]	5	5
Außen Ø [mm]	90	90	Verrippung	radial	unverrippt
Kontaktfäche [mm²]	6,3·10 ³	6,3·10 ³	Werk-/Kontaktfäche [mm²]	544	444
Wirk-/Saugfläche [mm²]	550,0	942	Werkstoff	Silikonfries	Silikonfries
Öffnungsverhältnis [%]	8,6	14,8	Vakuumverzeugung	Ejektor	Ejektor
Vakuumverzeugung	Förderer	Förderer			
Lockenrichtung	konzentrisch	konzentrisch			
Niederdruckflächensaugen			Haftsaugen		
					
Greifelement (Typ)	B1 (SBS20)	B2 (SBS30)	Greifelement (Typ)	B1 (SBS20)	B2 (SBS30)
Hersteller	Schnitzl	Schnitzl	Hersteller	Schnitzl	Schnitzl
Außen Ø [mm]	20	30	Außen Ø [mm]	20	30
Auflage Ø [mm]	7,5	7,5	Auflage Ø [mm]	7,5	7,5
Wirkfläche [mm²]	314	707	Wirkfläche [mm²]	314	707
Kontaktfäche [mm²]	44	44	Kontaktfäche [mm²]	44	44
Luftverbrauch [l/min]	100	100	Luftverbrauch [l/min]	100	100
Entsperrezeit	porosan	porosan	Entsperrezeit	porosan	porosan
Betriebsdruck [bar]	2...7	2...7	Betriebsdruck [bar]	2...7	2...7
Bernoullisaugen			Bernoullisaugen		

Abbildung 128: Bestimmungsgrößen der evaluierten Greifelemente

Tabelle 19: Hierarchische Übersicht der angewendeten Bewertungskriterien

	Nr.	Kriterium	Erklärung	Gewichtung [%]
Leistungsfähigkeit (Summe Gewichtung 16,67 %)	1	Maximal übertragbare Normalkraft (F_N)	In den Evaluierungsuntersuchungen erreichbare Normalkräfte zur Übertragung der Haltekraft orthogonal zur Textilfläche;	4,53
	2	Normalkraft-Gradient (Normalkraft über Zuglänge)	Veränderung der Zuglänge bei steigender Normalkraft; Je größer der Gradient, desto steiler ist die Verbindung zwischen Greifer und Textil; Fläche, ungünstige Gradienten resultieren aus Elastizitäten im Greifelement (Balgensauger) oder Nachgiebigkeiten in der Verbindung (Rutschende Nadeln) und führen zu Positionierungsungenauigkeiten;	4,53
	3	Einfluss der Faserausrichtung auf aufnehmbare Normalkräfte	Geringe Differenzen der maximalen Normalkräfte deuten auf eine hohe Flexibilität des Greifelements hinsichtlich der Orientierung zum Faserverkauf hin. Je flexibler sich hier Greifelement zeigt, desto weniger Bedeutung hat die Beachtung der Faserorientierung während des Greifprozesses;	0,36
	4	Maximal übertragbare Querkraft	In den Evaluierungsuntersuchungen erreichbare Querkräfte zur Übertragung der Haltekraft in der Textilfläche;	3,08
	5	Querkraft-Gradient (Querkraft über Zuglänge)	Veränderung der Zuglänge bei steigender Querkraft; (Analog Nr. 2);	3,80
	6	Einfluss der Faserausrichtung auf aufnehmbare Querkräfte	Geringe Differenzen der maximalen Querkräfte deuten auf eine hohe Flexibilität des Greifelements hinsichtlich der Orientierung zum Faserverkauf hin. (Analog Nr. 3);	0,36
Greifgröße (Summe Gewichtung 66,30 %)	7	Faserverzug bei Normalkraft	Maximal auftretende Fehlorientierung einzelner Fasern oder Rovings aufgrund des Einwirkens einer vom Greifelement aufgeprägten Normalkraft; Quantitative, bildoptische Erfassung während der Evaluationsuntersuchungen;	6,88
	8	Faseraufweitung bei Normalkraft	Maximal auftretende Ausweitung einzelner Fasern oder Rovings aufgrund des Einwirkens einer vom Greifelement aufgeprägten Normalkraft; Quantitative, bildoptische Erfassung während der Evaluationsuntersuchungen;	5,98
	9	Beulenbildung bei Normalkraft	Maximal auftretende flächige Erhöhungen orthogonal zur Flächenebene aufgrund des Einwirkens einer vom Greifelement aufgeprägten Normalkraft; Quantitative, bildoptische Erfassung während der Evaluationsuntersuchungen;	2,17
	10	Zerstörungsgrad bei Normalkraft	Summe der Strukturveränderungen aufgrund des Einwirkens einer vom Greifelement aufgeprägten Normalkraft; Qualitative Beurteilung des post-gegriffenen Zustand des gesamten Textils unabhängig von Fehlerbild und maximaler Deformation;	7,07
	11	Einfluss der Faserausrichtung auf Strukturveränderung bei Normalkraft	Abhängigkeit des eingetretenen Zerstörungsgrads bei Normalkraftbeeinflussung von der Faserorientierung; Geringe Differenzen zwischen unterschiedlichen Orientierungen versprechen hohe Flexibilität und erleichtern die Planung des Greifprozesses;	1,09
	12	Faserverzug bei Querkraft	analog Nr. 7;	7,25
	13	Faseraufweitung bei Querkraft	analog Nr. 8;	6,34
	14	Beulenbildung bei Querkraft	analog Nr. 9;	2,17
	15	Zerstörungsgrad bei Querkraft	analog Nr. 10;	6,70
	16	Einfluss der Faserausrichtung auf Strukturveränderung bei Querkraft	analog Nr. 11;	1,09
	17	Positionsgenauigkeit / Greifgenauigkeit unter Querkrafteinfluss	Positionsgenauere Aufnahme und Ablage von Textilien zur Erreichung eines reproduzierbaren Prozesses; Vermeidung von Relativbewegungen zwischen Greifer und Handhabungsgut durch die Übertragung von Querkräften;	6,52
	18	Absortieren sichergestellt	Gewährleistung eines prozesssicheren, selektiven Aufnehmens und Vereinzelns eines Zugschnitts aus dem flächigen Verbund; Beurteilung in experimentellen Untersuchungen;	6,88
	19	Greifsicherheit	Qualitative Beurteilung des gesamten Greifvorgangs durch Beobachtung hinsichtlich der Schwerpunkte unkontrolliertes Lösen und unvollständiges Greifen;	6,16
Wirtschaftlichkeit (Sum. Gewicht: 17,03 %)	20	Alleinstellung	Bewertung, ob das angewendete Greifelement allein stehend in der Lage ist, den gesamten Greifprozess durchzuführen oder ob zusätzliche Einrichtungen notwendig	0,72
	21	Beschaffungskosten bezogen auf die Wirkfläche	Bekannte oder geschätzte Anschaffungskosten für das zu bewertende Greifelement bezogen auf die Wirkfläche;	3,44
	22	Energiekosten bezogen auf die Wirkfläche (1 Greifzyklus)	Auf Basis der experimentellen Untersuchungen ermittelte und hochgerechnete Energiekosten bezogen auf die Wirkfläche und einen Greifzyklus;	5,98
	23	Wartungsaufwand	Abschätzung des Wartungsaufwands und der Verschleißeigenschaften durch Beurteilung der Mechanik, Anzahl bewegte Teile, Dichtungen, Zusatzstoffe, ...;	3,44
	24	Verschleißigenschaften	Erhöhung der laufenden Kosten;	3,44

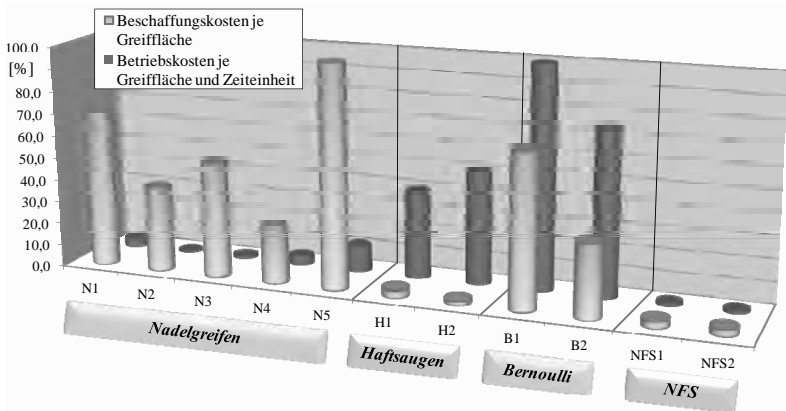


Abbildung 129: Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Greifprinzipien durch Abschätzung der Beschaffungskosten (vordere Reihe) je Greiffläche und Betriebskosten je Greiffläche und Zeiteinheit (Angabe in [%], normiert auf den erreichten Maximalwert)

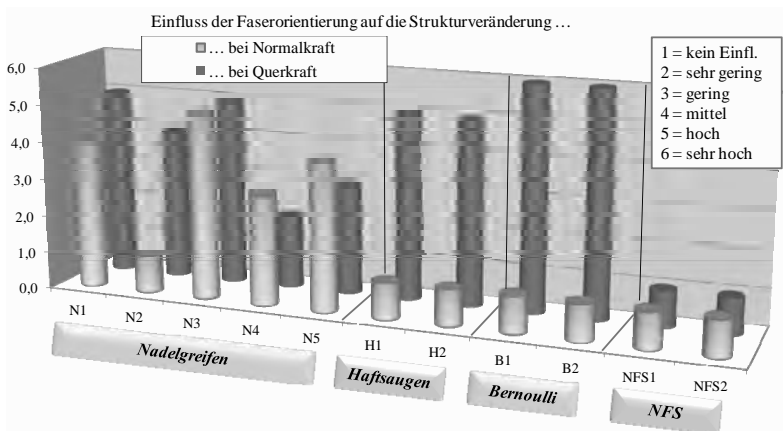


Abbildung 130: Einfluss der Faserorientierung auf das Übertragungsverhalten von Normal- (vordere Reihe) und Querkraft (hintere Reihe)

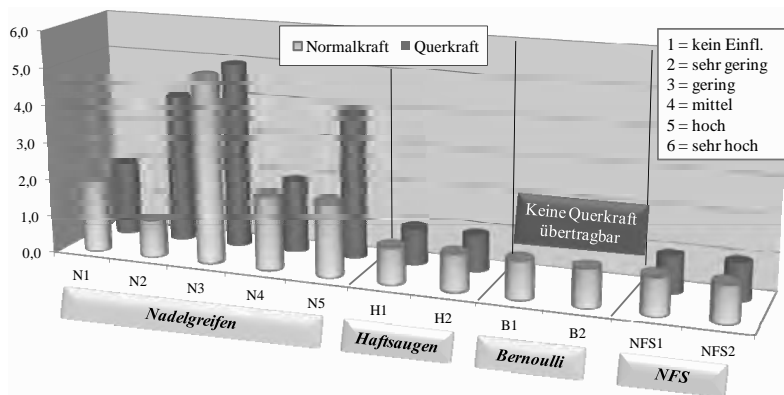


Abbildung 131: Einfluss der Faserorientierung auf die Strukturveränderung bei Normal- (vordere Reihe) und Querkraftübertragung (hintere Reihe)

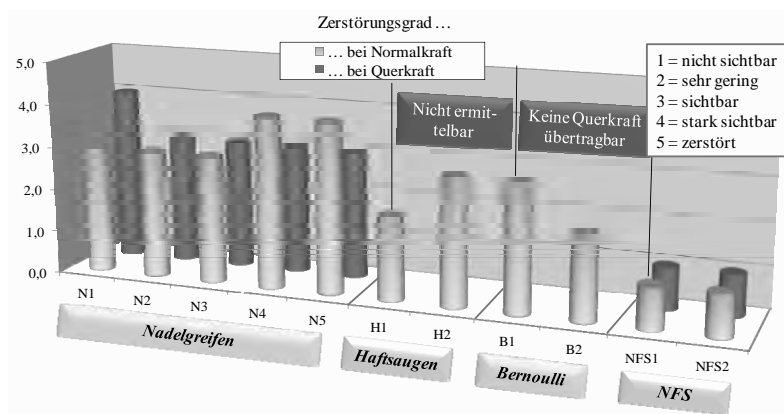


Abbildung 132: Durch die Greifelemente verursachter Zerstörungsgrad bei Normal- (vordere Reihe) und Querkraftübertragung (hintere Reihe)

Tabelle 20: Thermodynamische Daten von Luft bei niedrigen Drücken (WATTER 2007)

Eigenschaftsparameter	Symbol	Betrag	Dimension
Dichte	$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$	1,204 (20°C; 101325 Pa)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Spez. Gaskonstante	$R = \frac{\mathfrak{R}}{M}$	287	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Allg. Gaskonstante	\mathfrak{R}	8314,4	$\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$
Molare Masse	$M = \frac{m}{n_L}$	29	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Isentropenexponent	κ	1,4	[-]
Kin. Viskosität (für 1 bar und 0 ... 20 °C)	ν_0 ν_{10} ν_{20}	$13,28 \cdot 10^{-6}$ $14,18 \cdot 10^{-6}$ $15,10 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Dyn. Viskosität	$\eta = \nu \cdot \rho$...	$\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$
Spez. Wärmekapazität (bei p = konst)	c_p	$1,003 \approx 1$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Spez. Wärmekapazität (bei V = konst)	c_v	0,716	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Tabelle 21: Ergebnisse der Bestimmung von Betriebsdifferenzdruck Δp_B und Volumenstrom \dot{V}

Material	G [^{kg} /m ²]	R _{200Pa} [^m /s] bei ?p _B =200 Pa	?p _{NFS1} [Pa]	?p _{B, NFS1} [Pa]	?p _{NFS2} [Pa]	?p _{B, NFS2} [Pa]	V [m ³ /h]
UD-Gelege	0,296	0,144	33,8	67,5	19,6	39,2	40,6
Gewebe	0,226	0,540	25,8	51,6	15,0	30,0	116,4
0°/90°-Gelege	0,556	0,210	63,4	126,8	36,9	73,7	111,3
+/-45°-Gelege	0,256	0,318	29,2	58,4	17,0	33,9	77,6
Öffnungsverhältnis f der NFS			Randbedingungen				
NFS1	0,086		Sicherheitsfaktor S []				2
NFS2	0,148		Ortsfaktor g [^N /kg]				9,8
(vgl. Abbildung 128; Anhang)			Fläche A (Zuschnitt 1,2m x 2,2m) [m ²]				2,7

Tabelle 22: Abschätzung der Vakuumerzeugungskosten versch. Erzeugertypen

Erzeugungsart	Strömungsart	Leistung [kW]	Luftverbrauch [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	Spezifische Leistungsaufnahme [kW pro $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	Spezifischer Leistungsbedarf Greifer [$\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$]	Spezifische Vakuumbetriebskosten [€ je m^2 und h]	Kosten [€ für 24 h Halten der maximalen Greiffläche (2,7 m^2)]
Kolbenkompressor und Ejektor (Verhältnis Saugluft:Druckluft ist 2:1)	Druckluft	7,5	58,4	0,1284	2,8	0,250	16,2
Seitenkanalverdichter	Saugluft	1	116,8	0,0086	0,4	0,033	2,16
Vakuumpumpe	Saugluft	3	116,8	0,0257	1,1	0,100	6,48
Radialventilator	Saugluft	0,5	116,8	0,0043	0,2	0,017	1,08
Annahme: Kostenfaktor		0,09 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$					
Greiferfläche (1,2 m x 2,25 m)		2,7 m^2					

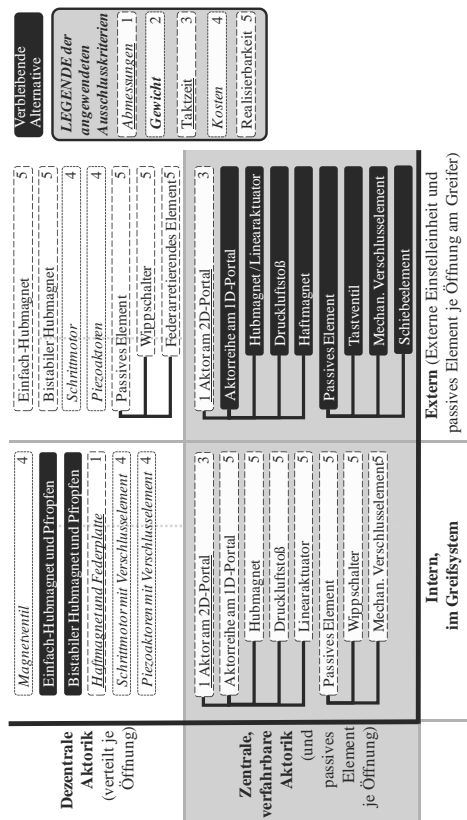


Abbildung 133: Lösungsideen für die Verschlussaktorik: verbleibende Alternativen (helle Schrift) und auf Basis verschiedener Kriterien ausgeschlossener Varianten (siehe Legende)

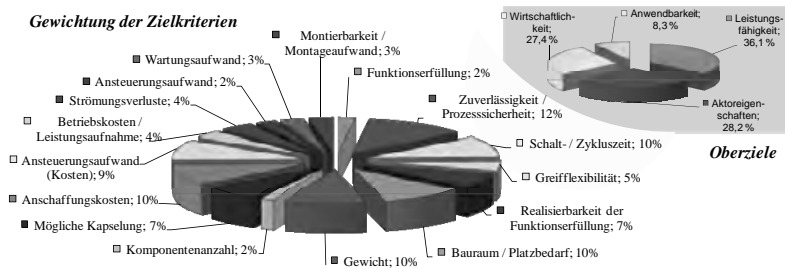


Abbildung 134: Gewichtete Zielkriterien und Oberziele für die Bewertung der Lösungsalternativen des Moduls Verschlussaktorik

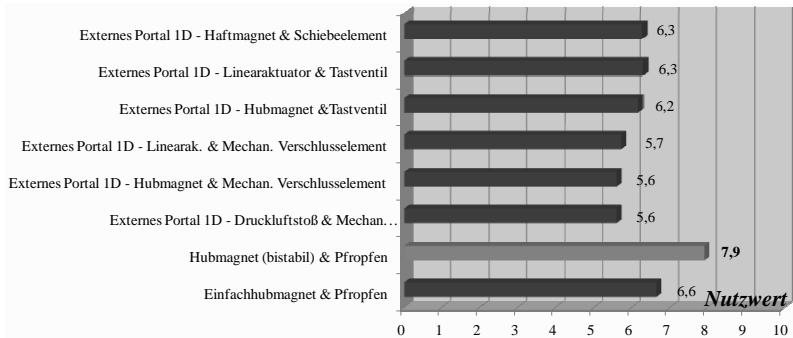


Abbildung 135: Bewertung der Lösungsalternativen des Moduls
Verschlussaktorik

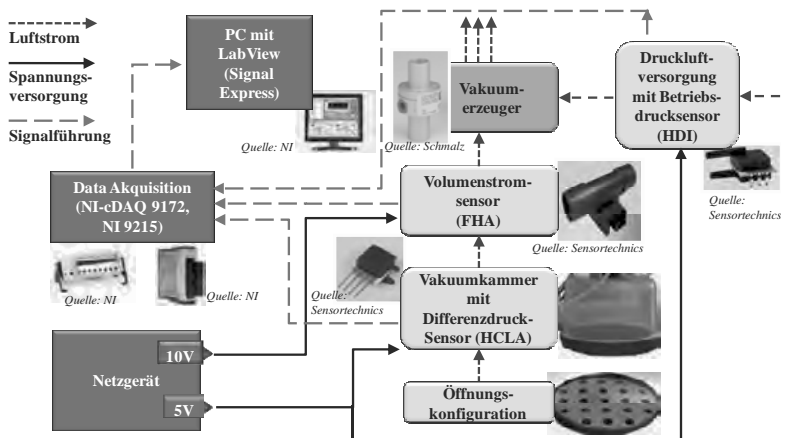


Abbildung 136: Versuchsanordnung zur experimentellen Bestimmung der Drosselkurve bei unterschiedlichen Lochkonfigurationen (Durchmesser)

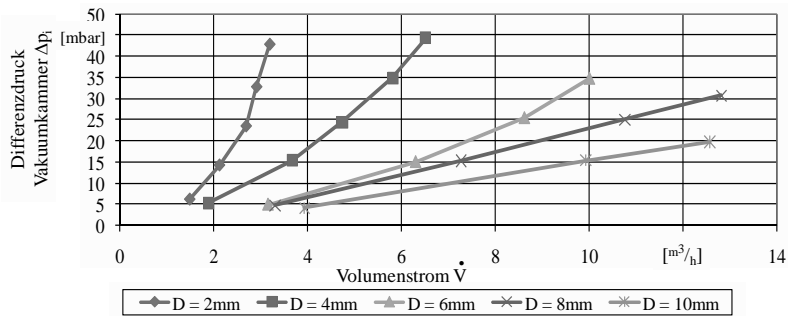


Abbildung 137: Drosselkurve für das Referenzmaterial „Gewebe“ bei unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern ($n = 19$ Bohrungen)

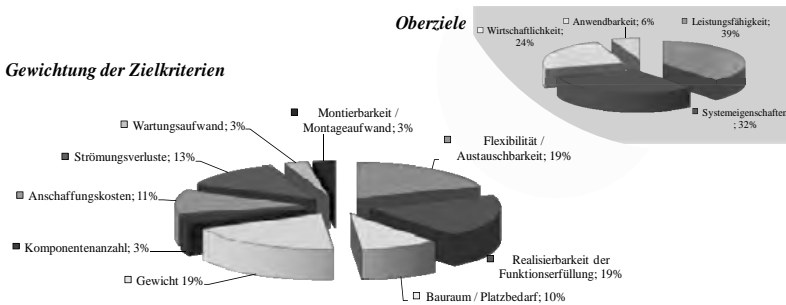


Abbildung 138: Gewichtung der Kriterien zur Bewertung des Vakuumsystems

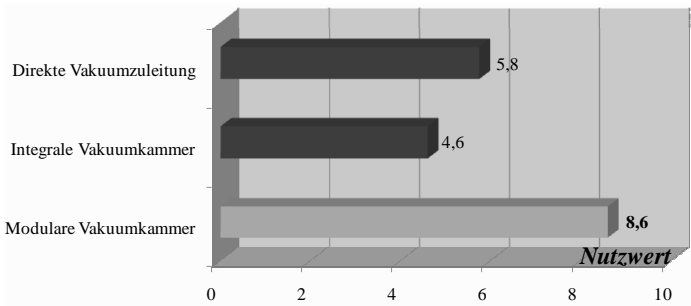


Abbildung 139: Ergebnis der Bewertung der Lösungsalternativen des Moduls Vakuumsystem

Tabelle 23: Auslegungsberechnung Vakuumherzeuger für Referenzszenario

Material	G [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$]	R _{200Pa} [m ³ /l] bei Δp _B =200 Pa	Volumen- strom V _{ERZ} [m ³ /h]	Differenz- druck Δp _{ERZ} [mbar]	Handhab.dr. (Verlustfrei) Δp _H [Pa]	Verlust Abschl.pl. Δp _{V,AP} [Pa]	Verl. Sys. (Schätzung) Δp _{V,SYs} [Pa]	Verlust Gesamtsys. Δp _{V,HS} [Pa]
UD-Gelege	0,296	0,144	203,2	3,7	361,1	0,1	10,0	10,1
Gewebe	0,226	0,540	581,8	2,9	275,7	0,9	10,0	10,9
0°/90°-Gelege	0,556	0,210	556,7	6,9	678,2	0,8	10,0	10,8
+/-45°-Gelege	0,256	0,318	388,1	3,2	312,3	0,4	10,0	10,4
Randbedingungen								
Sicherheitsfaktor S []				10	Bohrungsdurchmesser d [mm]		8	
Ortsfaktor g [$\frac{\text{N}}{\text{kg}}$]				9,81	Maximale Anzahl an Bohrungen n _{MAX} []		4320	
Fläche A _{HS} (Zuschnitt 1,2m x 2,2m) [m ²]				2,7	Dicke der Platte t _A [mm]		10	
Dichte Luft ρ _P (20°C, 101325 Pa) [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]				1,204	Verlustkoeffizient Einlauf ζ _E []		0,5	
Kin. Viskosität Luft ν (20°C, 101325 Pa) [m ² /s]				15,1 x 10 ⁻⁶	Verlustkoeffizient Auslauf ζ _A []		2	
Dyn. Viskosität Luft η (20°C, 101325 Pa) [$\frac{\text{N}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$]				18,2 x 10 ⁻⁹				

Algorithm 1 Simulated Annealing Algorithm

Wähle Anfangslösung $x \leftarrow x(0)$

repeat

 Erwärme auf Glüh­temperatur $T \leftarrow T(0)$

for $t \leftarrow 0$ to N **do**

 Wähle einen Nachbar x^*

 Berechne Energie $f(x^*)$

 Berechne Wahrscheinlichkeit P^*

if $U(0,1) \leq P^*$ **then**

$x(t) \leftarrow x^*$

end if

end for

until Konvergenz oder Abbruchbedingung;

repeat $x(t)$ als Lösung

Simulated Annealing simuliert das Verhalten der Kristalle im Metall beim Weichglühen. Durch Erhitzen wird ein Metall in einen hohen Energiezustand versetzt und anschließend langsam abgekühlt. Dabei ordnen sich die Kristalle im Gefüge ohne Verspannungen neu an zu einem Gefügestand mit minimaler Energie. Nachdem eine Ausgangslösung gewählt wird, wird der Parameter Temperatur auf eine definierte Glüh­temperatur erhöht. Die Temperatur wird in einer festgelegten Anzahl an Schritten auf 0°C gesenkt, und bei jedem Schritt wird eine neue Lösung in der Nachbarschaft der vorhandenen Lösung gewählt. Wenn die Nachbarylösung einen geringeren Energiewert (bessere Güte) aufweist, wird sie als neue Lösung übernommen. Wenn dieser Energiewert jedoch höher ist, wird er mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit dennoch übernommen. Je niedriger die Temperatur ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Lösung mit einem höheren Energiewert übernommen wird. Durch dieses Verhalten kann ein lokales Minimum verlassen werden, und die Wahrscheinlichkeit, das globale Minimum zu finden steigt (FOIDL 2009).

Abbildung 140: Simulated Annealing Algorithmus:
Pseudocode und Erklärung (Quelle:FOIDL 2009)

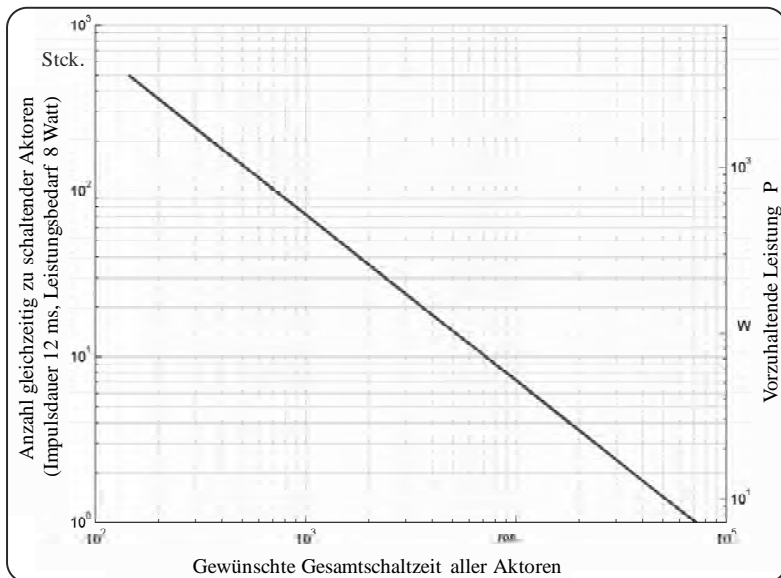


Abbildung 141: Zusammenhang zwischen gewünschter Schaltzeit, gleichzeitig zu schaltender Aktoren und vorzuhaltender Leistung

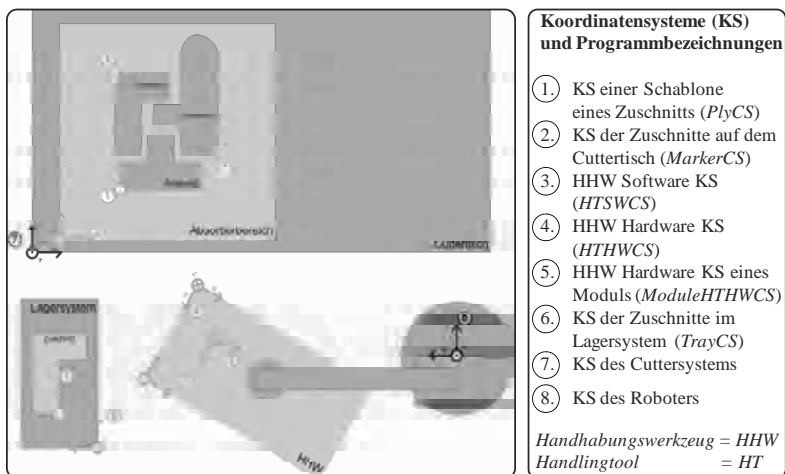


Abbildung 142: Koordinatensysteme (KS) in Hard- und Software zur Ansteuerung und Positionierung des Greifsystems (Handhabungswerkzeug)

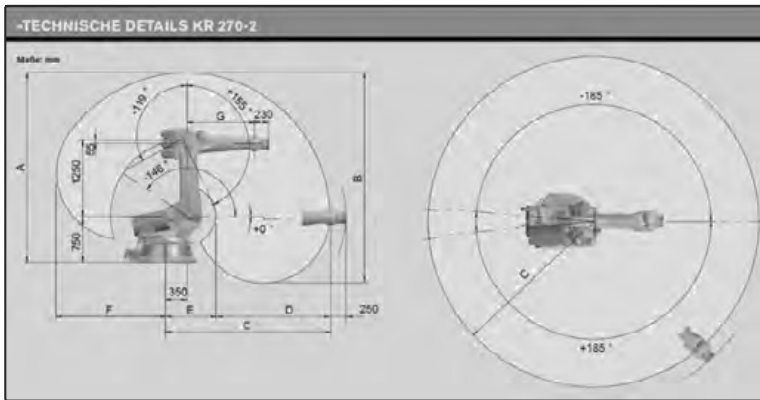


Abbildung 143: Auszug aus dem Datenblatt des angewendeten Industrieroboters KUKA KR 270-2 (Quelle: KUKA Roboter GmbH)

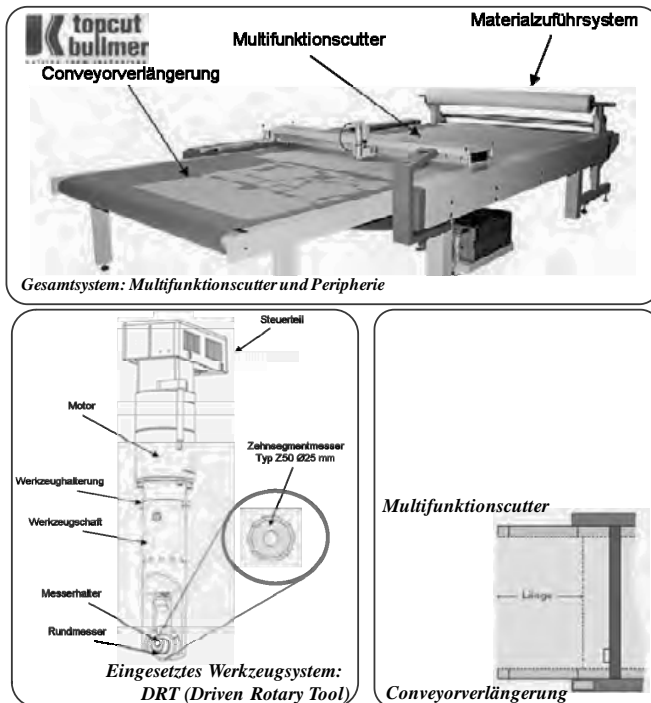


Abbildung 144: Auszug aus dem Datenblatt des angewendeten Multifunktionscutters (Quelle: topcut bullmer GmbH)

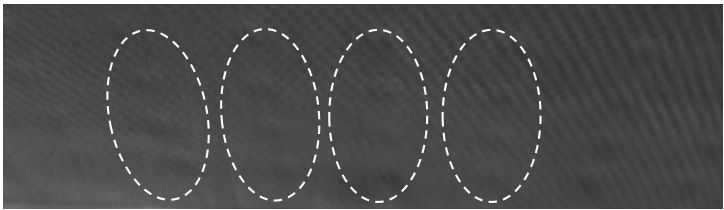


Abbildung 145: Beulenbildung am Greifsystem durch Einsaugen des FVK-Textils in die Öffnungsbohrungen (UD-Gelege; bei ca. $\Delta p_T = 40$ mbar)

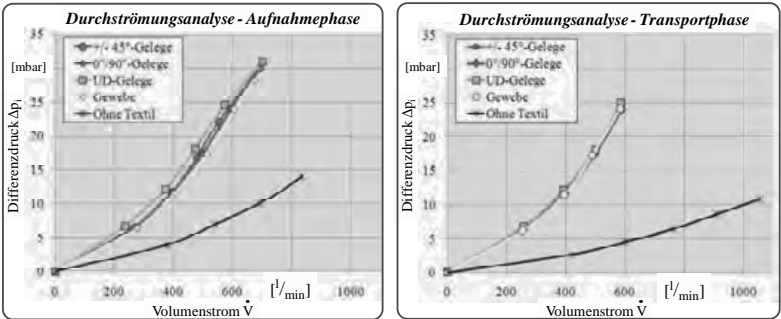


Abbildung 146: Durchströmungsverhalten des Greifers (eine Bohrung) und der Referenztextilien für unterschiedliche Prozessphasen

Seq.	Prozessschritt	Init.[s]	Opt.[s]				Kinematik	Greifsystem	Aggregat
1	Anfahren Cutter	22,97	7,85						Achsen
2	Anfahren Zuschneit	3,87	1,20						Achsen
3	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35						Software
4	Greifkonfig. einstellen	7,82	3,09						Aktorik
5	Unterdruck aktivieren	2,00	2,00						Vakuumerzeuger
6	Abheben	5,87	1,75						Achsen
7	Anfahren Lagersystem	24,94	8,18						Achsen
8	Anfahren Ablagepos.	5,36	2,00						Achsen
9	Unterdruck deaktivieren	12,00	12,00						Vakuumerzeuger
10	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35						Software
11	Greifkonfig. Reset	7,82	3,09						Aktorik
12	Home-Pos. anfahren	5,41	1,18						Achsen
Gesamt:		116,8	61,04				61,04s		116,76s

Abbildung 147: Prozesszeitanalyse bei serieller Bearbeitung der Prozessschritte (Initial und optimiert) – Ablegen durch Abschalten Vak.erzeuger

Seq.	Prozessschritt	Init. [s]	Opt. [s]	Kinematik	Greifsystem	Aggregat
1	Anfahren Cutter	22,97	7,83			Achsen
2	Anfahren Zuschnitt	3,87	1,20			Achsen
3	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35			Software
4	Greifkonfig. einstellen	7,82	3,09			Aktuatorik
5	Unterdruck aktivieren	2,00	2,00			Vakuumerzeuger
6	Abheben	5,87	1,73			Achsen
7	Anfahren Lagersystem	24,94	8,18			Achsen
8	Anfahren Ablagepos.	5,36	2,00			Achsen
9	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35			Software
10	Greifkonfig. einstellen	7,82	3,09			Aktuatorik
11	Nachrichten verarbeiten	9,35	9,35			Software
12	Greifkonfig. Reset	7,82	3,09			Aktuatorik
13	Home-Pos. anfahren	5,41	1,18			Achsen
Gesamt:		121,93	61,48	61,48 s		121,93 s

Abbildung 148: Prozesszeitanalyse bei serieller Bearbeitung der Prozessschritte (Initial und optimiert) – Ablegen durch Schließen der Bohrungen

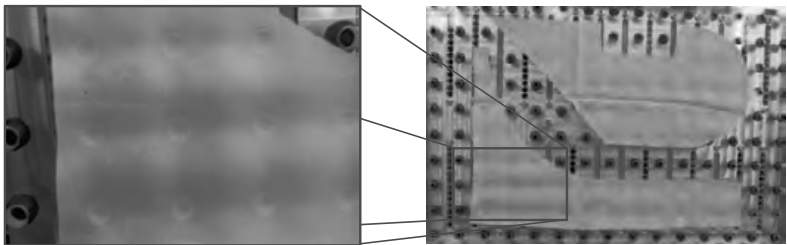


Abbildung 149: Beulenbildung bei der Handhabung von Batik-Seide

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streitinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spannenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrb, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelsäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Gatz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wiesbacher, J.*
Methoden zur rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H. J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitioncontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer
flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung
in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischeltzrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kohler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Flab, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgel leitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten - ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 15 Flexible Fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Moßmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprentzel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weissenberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breiting
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 87 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlek
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
 2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
 2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
 2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
 2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
 2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
 2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
 2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
 2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Hartl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
 2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
 2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
 2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
 2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
 2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
 2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
 2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
 2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
 2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
 2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansoerge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
 2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
 2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
 2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau
Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau
Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
 2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch
Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
 2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz
Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
 2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch
Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
 2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp
Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
 2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann
Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
 2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner
Modellierung transients Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
 2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3
- 247 Josef Ludwig Zimmermann
Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
 2011 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4091-1
- 248 Clemens Pörnbacher
Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
 2011 · 280 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4108-6
- 249 Alexander Lindworsky
Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
 2011 · 300 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4125-3
- 250 Michael Mauderer
Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
 2011 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4126-0
- 251 Roland Mork
Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
 2011 · 228 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4127-7
- 252 Florian Reichl
Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
 2011 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4128-4
- 253 Paul Gebhard
Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
 2011 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4129-1
- 254 Michael Heinz
Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
 2012 · 302 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4147-5
- 255 Pascal Krebs
Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
 2012 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4156-7
- 256 Gerhard Straßer
Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
 2012 · 290 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4161-1
- 257 Frédéric-Felix Lacour
Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
 2012 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4162-8
- 258 Thomas Hensel
Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4167-3

- 259 Sherif Zaidan
A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
 2012 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4175-8
- 260 Hendrik Schellmann
Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
 2012 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4189-5
- 261 Marwan Radi
Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
 2012 · 172 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4195-6
- 262 Markus Ruhstorfer
Rührreibschweißen von Rohren
 2012 · 206 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4197-0
- 263 Rüdiger Daub
Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
 2012 · 182 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4199-4
- 264 Michael Ott
Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4201-4
- 265 Martin Ostgathe
System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4206-9
- 266 Imke Nora Kellner
Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
 2013 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4223-6
- 267 Florian Oefele
Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
 2013 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4224-3

