

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

## **Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen**

**Johannes Karl Bernhard Schmalz**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

(Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)

Die Dissertation wurde am 18.01.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.09.2018 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Herausforderungen bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen .....	1
1.2 Zielsetzung und Betrachtungsbereich der Arbeit.....	3
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen von Greifersystemen .....	5
2.1.1 Funktionsweise von Greifersystemen .....	6
2.1.2 Arten und Aufbau von Greifersystemen .....	7
2.1.3 Grundlagen der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen .....	11
2.1.4 Flexibilisierung von Greifersystemen .....	20
2.2 Methoden zur Greiferauslegung und -auswahl .....	23
2.2.1 Manuelle Methoden der Greiferauslegung und -auswahl .....	23
2.2.2 Automatisierte Methoden der Greiferauswahl .....	25
2.2.3 Automatisierte Methoden der Greiferauslegung .....	27
2.2.4 Rechnergestützte Konfiguration und Auslegung .....	29
2.3 Methoden zur Greifpositionsbestimmung.....	30
2.3.1 Methoden zur Greifpositionsbestimmung für mechanische Greifer.....	32
2.3.2 Methoden zur Greifpositionsbestimmung für Vakuumgreifer.	34
2.4 Methoden zur Greifkraftberechnung.....	34
2.4.1 Grundlagen der Greifkraftberechnung .....	34

2.4.2	Methoden zur Greifkraftberechnung bei mechanischen Greifern .....	36
2.4.3	Methoden zur Greifkraftberechnung bei Vakuumgreifern .....	38
2.5	Methoden zur Greiferflexibilisierung .....	39
2.6	Additive Fertigungsverfahren in der Greiftechnik .....	40
2.7	Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Erkenntnisse .....	42
<b>3</b>	<b>Spezifikation des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs .....</b>	<b>45</b>
3.1	Bedarfsanalyse .....	45
3.2	Technische Anforderungen .....	45
3.3	Methodische Anforderungen .....	47
<b>4</b>	<b>Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen .....</b>	<b>49</b>
4.1	Einordnung der Methode .....	49
4.2	Beschreibung des Betrachtungsraumes .....	50
4.2.1	Ablauf der Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen .....	51
4.2.2	Analysephase .....	52
4.2.3	Synthesephase .....	52
4.2.4	Bewertungsphase .....	56
4.2.5	Realisierungsphase .....	56
<b>5</b>	<b>Analysephase .....</b>	<b>57</b>
5.1	Datenbereitstellung .....	58
5.1.1	Einlesen der CAD-Daten von Handhabungsobjekten .....	58
5.1.2	Einlesen von Nutzereingaben .....	59
5.2	Greifpositionsbestimmung .....	61
5.2.1	Bestimmung von Greifpositionen für mechanische Greifer ....	63
5.2.2	Bestimmung von Greifpositionen für Vakuumgreifer .....	66
5.2.3	Filtern von Greifpositionen .....	66
5.2.4	Aufbereitung von Daten für die Weiterverarbeitung .....	67

<b>6</b>	<b>Synthesephase</b> .....	<b>69</b>
6.1	Grundlagen des Auslegungsvorgehens .....	69
6.2	Vorgehen für die Dimensionierung von Greifersystemen .....	71
6.2.1	Vakuumgreifer.....	71
6.2.2	Mechanische Greifer .....	73
6.2.3	Festigkeitsnachweise .....	81
6.3	Vorgehen zur Greifkraftberechnung für Greifersysteme .....	84
6.3.1	Eingabe von Randbedingungen der Greifkraftberechnung .....	85
6.3.2	Vakuumgreifer.....	88
6.3.3	Mechanische Greifer .....	93
6.4	Automatisierte Konstruktion.....	101
6.4.1	Automatisierte Konstruktion der Backen mechanischer Greifer .....	102
6.4.2	Automatisierte Konstruktion der Greifergrundkörper von Vakuumgreifern.....	102
6.5	Algorithmus zur Steigerung der Greiferflexibilität.....	105
6.5.1	Ansatz und Einordnung des Verfahrens .....	105
6.5.2	Ablauf des Algorithmus .....	106
6.5.3	Anwendung der Tiefensuche.....	107
6.5.4	Interpolation der Greiferkennwerte .....	109
6.5.5	Auswahl geeigneter Greiferkombinationen.....	113
6.5.6	Definition von kombinierten Greifern.....	114
<b>7</b>	<b>Bewertungs- und Realisierungsphase</b> .....	<b>117</b>
7.1	Bewertungsphase .....	117
7.2	Realisierungsphase .....	125
<b>8</b>	<b>Erprobung der Vorgehensweisen</b> .....	<b>127</b>
8.1	Betrachtungsraum und Vorbemerkungen .....	127
8.1.1	Softwaretechnische Umsetzung des Vorgehens.....	127

8.1.2	Verwendetes Handhabungsobjekt-Spektrum.....	128
8.1.3	Sonstige Rahmenbedingungen der Erprobung.....	130
8.2	Erprobung der Greifkraftberechnung .....	131
8.2.1	Vakuumgreifer .....	132
8.2.2	Mechanische Greifer .....	134
8.3	Erprobung Greifpositionsbestimmung, Auslegung von Wirkelementen und Greiferauswahl.....	137
8.3.1	Erprobung anhand eines quaderförmigen Handhabungsobjekts .....	138
8.3.2	Erprobung anhand eines Handhabungsobjekt-Spektrums .....	140
8.4	Erprobung der Greiferflexibilisierung .....	141
8.5	Kritische Reflexion des Erprobungsergebnisses .....	145
8.6	Zusammenfassung der Erprobung .....	146
<b>9</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>149</b>
9.1	Technische Bewertung.....	149
9.2	Wirtschaftliche Bewertung .....	151
9.2.1	Randbedingungen und Szenario.....	152
9.2.2	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	153
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>155</b>
10.1	Zusammenfassung .....	155
10.2	Weitere Forschungs- und Entwicklungspotentiale .....	156
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
<b>12</b>	<b>Studienarbeiten .....</b>	<b>181</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>185</b>
A.1	Liste aller notwendigen Nutzereingaben .....	185
A.2	Ausgabedaten der Greifpositionsbestimmung.....	187
A.3	Liste Daten aus industrieller Datenbank.....	187
A.4	Dimensionsmatrizen .....	188

A.5	Berechnung Dichtkraft Vakuumgreifer .....	189
A.6	Berechnung der Konstanten der Kontaktdruckverteilung.....	190
A.7	Ausgabedaten der Auslegung.....	191
A.8	Für Erprobung verwendetes Handhabungsobjekt-Spektrum .....	193
A.9	Für Erprobung verwendete Komponenten.....	195
A.10	Für Erprobung verwendete Dateneingaben .....	196
A.11	Versuche Handhabungsobjekt-Spektrum.....	197



# Abkürzungs- und Formelverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
APC	Winkelgreifer mit planen Backen (Parallel Planar Clamp)
AVC	Winkelgreifer mit prismatischen Backen (Angular V Clamp)
CSC	Vakuumgreifer mit rundem Sauger (Circular Suction Cup)
CSV	Comma-separated values
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
FEM	Finite-Elemente-Methode
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GUI	Graphical user interface
HH	Handhabung
ID	Identifikation
IFR	International Federation of Robotics
KBE	Knowledge-based engineering
Max.	Maximal(e)(r)
Min.	Minimal(e)(r)
mind.	mindestens
NaN	Not a Number
OSC	Vakuumgreifer mit ovalem Sauger (Oval Suction Cup)

PDM	Produktdatenmanagement
PPC	Parallelgreifer mit planen Backen (Parallel Planar Clamp)
PVC	Parallelgreifer mit prismatischen Backen (Parallel V Clamp)
RSC	Vakuumgreifer mit rechteckigem Sauger (Rectangular Suction Cup)
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
Stk.	Stück
STL	Stereo Lithography
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vorh.	vorhanden

### Formelverzeichnis (große lateinische Buchstaben)

Variable	Einheit	Bedeutung
$A_{EK}$	$[m^2]$	Fläche zur Bewertung der Nähe von Greifpositionen mechanischer- und Vakuumgreifer zu Kanten des Handhabungsobjekts
$A_K$	$[m^2]$	Kontaktfläche
$A_L$	$[m^2]$	Fläche der Dichtlippe von Vakuumsaugern
$A_P$	$[m^2]$	Kontaktfläche plane Backe
$A_S$	$[m^2]$	Fläche Vakuumsauger
$B_B$	$[m]$	Backenbreite
$B_F$	$[m]$	Flankenbreite
$B_H$	$[m]$	Breite Hüllkörper

Variable	Einheit	Bedeutung
$B_{os}$	[m]	Saugerbreite ovaler Sauger
$B_S$	[m]	Saugerbreite
$B_Z$	[m]	Zentrumsbreite
$D_B$	[m]	Backendicke
$D_{Bmax}$	[m]	Maximale Backendicke mehrerer betrachteter Greiferbacken
$D_C$	[m]	Distanz zwischen Greifmittelpunktsebene eines Zylinders und der Kontaktlinie einer prismatischen Backe in z-Richtung
$D_G$	[m]	Distanz zwischen Kontaktfläche und Massenschwerpunkt des Handhabungsobjektes
$D_H$	[m]	Durchmesser von zylindrischen Handhabungsobjekten
$D_K$	[m]	Abstand der Kontaktflächen vom Greifmittelpunkt
$D_N$	[m]	Länge der Normalen von der Kontaktflächenebene bis zur Hüllkörperoberfläche
$D_S$	[m]	Saugerdurchmesser
$D_V$	[m]	Dicke der Greiferbackenverlängerung
$D_{Vstart}$	[m]	Startwert zur Berechnung der Dicke der Greiferbackenverlängerung
$D_Z$	[m]	Zentrumsdicke
$D_{Zmax}$	[m]	Maximale Zentrumsdicke bei mehreren betrachteten Greiferbacken
$E_{HO}$	[GPa]	Elastizitätsmodul Handhabungsobjekt
$E_{max}$	[m]	Absolute Ungenauigkeit des Handhabungssystems
$E_R$	[GPa]	Reduzierter Elastizitätsmodul

Variable	Einheit	Bedeutung
$E_W$	[GPa]	Elastizitätsmodul Wirkelemente
$E_Z$	[m]	Eintauchtiefe Backe bei zylindrischen Handhabungsobjekten
$\hat{\mathcal{F}}$	[–]	Kraft-Momenten-Matrix
$\hat{\mathcal{F}}_p$	[–]	Kraft-Momenten-Matrix Prozesskräfte
$\hat{\mathcal{F}}_t$	[–]	Kraft-Momenten-Matrix translatorische Bewegungen
$\hat{\mathcal{F}}_{tr}$	[–]	Kraft-Momenten-Matrix translatorische und rotatorische Bewegungen
$F_D$	[N]	Dichtkraft
$F_G$	[N]	Greifkraft
$F_{Gp}$	[N]	Greifkraft plane Backen
$F_{Gpr}$	[N]	Greifkraft prismatische Backen
$F_K$	[N]	Kontaktkraft
$F_P$	[N]	Prozesskraft
$F_R$	[N]	Reibkraft
$F_T$	[N]	Trägheitskraft
$F_V$	[N]	Vakuumkraft
$\widehat{F}_{x,y,z}^{(e)}$	[N]	Auf das Handhabungsobjekt wirkende Kräfte im Schwerpunktkoordinatensystem
$F_{x,y,z}^{(e)}$	[N]	Auf das Handhabungsobjekt wirkende Kräfte im Greifpositionskordinatensystem
$F_Z$	[N]	Zentrifugalkraft
$G$	[N]	Gewichtskraft

Variable	Einheit	Bedeutung
$H$	$[m]$	Höhe des Hohlzylinders bei der Berechnung des Abstands von Störkonturen
$H_P$	$[m]$	Greiferhub plane Backen
$H_{Pr}$	$[m]$	Greiferhub prismatische Backen
$I$	$[€]$	Personalkosten pro Stunde
$KA$	$[m]$	Kontaktflächenabstand
$L_A$	$[m]$	Länge Backenaufnahme
$L_B$	$[m]$	Backenlänge
$L_E$	$[m]$	Eingriffslänge
$L_{os}$	$[m]$	Saugerlänge ovaler Sauger
$L_S$	$[m]$	Saugerlänge
$L_V$	$[m]$	Länge Greiferbackenverlängerung
$\widehat{M}_{x,y,z}^{(e)}$	$[Nm]$	Auf das Handhabungsobjekt wirkende Momente im Schwerpunktskoordinatensystem
$M_{x,y,z}^{(e)}$	$[Nm]$	Auf das Handhabungsobjekt wirkende Momente im Greifpositionskoordinatensystem
$O$	$\left[\frac{€}{a}\right]$	Jährliche Kosten für Software
$\ddot{O}_w$	$[m]$	Öffnungsweite
$\ddot{O}_{wpp}$	$[m]$	Öffnungsweite Parallelgreifer plane Backen
$\ddot{O}_{wpv}$	$[m]$	Öffnungsweite Parallelgreifer prismatische Backen
$\ddot{O}_{wwi}$	$[m]$	Öffnungsweite Winkelgreifer
$\ddot{O}_{wwp}$	$[m]$	Öffnungsweite Winkelgreifer plane Backen

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\ddot{O}_{wwv}$	[m]	Öffnungsweite Winkelgreifer prismatische Backen
$Q_{EKP}$	[–]	Sicherheitswert für den Abstand von Handhabungsobjektkanten bei mechanischen Greifern mit prismatischen Backen
$Q_{EKV}$	[–]	Sicherheitswert für den Abstand von Handhabungsobjektkanten bei Vakuumgreifern und mechanischen Greifern mit planen Backen
$Q_{ESP}$	[–]	Sicherheitswert für den Abstand von Störkonturen bei mechanischen Greifern mit prismatischen Backen
$Q_{ESV}$	[–]	Sicherheitswert für den Abstand von Störkonturen bei Vakuumgreifern und mechanischen Greifern mit planen Backen
R	[m]	Radius der Kugel zur Bewertung der Gefahr von Kollisionen mit Störkonturen
$R_m$	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_p$	[MPa]	Dehngrenze
$S_F$	[–]	Sicherheitsfaktor Festigkeit
$S_{FG}$	[–]	Sicherheitsfaktor Greifkraft
$S_H$	[–]	Sicherheitsfaktor Hub
$S_K$	[–]	Sicherheitsfaktor Kontaktfläche
T	[–]	Boolesche greiferübergreifende Kombinationsmatrix
$T_B$	[m]	Tiefe der Kontaktfläche im Handhabungsobjekt-körper
$V_E$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen zur Bewertung des Abstands einer Greifposition von Störkonturen

Variable	Einheit	Bedeutung
$V_{EK}$	$[m^3]$	Volumen einer Kugel zur Bestimmung des Abstands von Störkonturen bei mechanischen Greifern und Vakuumsreifern
$V_{Ezk}$	$[m^3]$	Volumen eines Hohlzylinders zur Bestimmung des Abstands prismatischer Greiferbacken von Handhabungsobjekt-Kanten
$V_{EzS}$	$[m^3]$	Volumen eines Hohlzylinders zur Bewertung des Abstands prismatischer Greiferbacken von Störkonturen
$W$	$\left[\frac{Stk.}{a}\right]$	Anzahl ausgewählter und ausgelegter Greifer pro Jahr
$Z$	$[h]$	Personenstunden, welche für die Greiferauslegung und -auswahl aufgebracht werden müssen

**Formelverzeichnis (kleine lateinische Buchstaben)**

Variable	Einheit	Bedeutung
$a_{KS}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Konstante des Kontaktdrucks für Vakuumsauger
$a_{KP}$	$\left[\frac{N}{mm^3}\right]$	Konstante des Kontaktdrucks für plane Backen
$a_{Ti}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Translatorische Beschleunigung
$a_w$	$\left[\frac{rad}{s^2}\right]$	Winkelbeschleunigung
$b$	$[m]$	Breite der Kontaktfläche
$\tilde{b}$	$[-]$	Einsvektor der Greiferflexibilisierung
$b_{KP}$	$\left[\frac{N}{mm^3}\right]$	Konstante des Kontaktdrucks für plane Backen
$b_{KS}$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Konstante des Kontaktdrucks für Vakuumsauger

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$c_{x,y}$	$[m]$	Koordinaten des Momentanpols
$d_p$	$[m]$	Komponente des Kraftangriffspunktes von Prozesskräften
$g$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
$k$	$[-]$	Verformungsbeiwert
$l$	$[m]$	Länge
$l_c$	$[m]$	Distanz zwischen Kontaktlinien bei prismatischen Greifern in y-Richtung
$l_F$	$[m]$	Länge der Kontaktfläche
$l_L$	$[m]$	Länge der Kontaktlinie bei zylindrischen Handhabungsobjekten
$m$	$[kg]$	Masse des Handhabungsobjektes
$\tilde{m}$	$[-]$	Maximalwert einer Laufvariable
$n$	$[-]$	Normalenvektor eines Flächensegments auf der Oberfläche eines Handhabungsobjektes
$\tilde{n}$	$[-]$	Maximalwert einer Laufvariable
$p_{amb}$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Umgebungsdruck
$p_{BM}$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Druckbelastung mechanische Greifer
$p_{BV}$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Druckbelastung Vakuumbreifer
$p_i$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Innendruck eines Vakuumsaugers
$p_{PB}$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Flächenpressung plane Backen
$p_{RB}$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Flächenpressung prismatische Backen

Variable	Einheit	Bedeutung
$p_V$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Flächenpressung Vakuumsauger
$p_{zul}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	zulässige Flächenpressung
$q$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Kontaktdruck
$q_{Op}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Mittelwert der Kontaktdrucks plane Backen
$q_{Os}$	$\left[ \frac{N}{m} \right]$	Mittelwert Kontaktdruck Vakuumsauger
$q_P$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Kontaktdruck plane Backen
$q_s$	$\left[ \frac{N}{m} \right]$	Kontaktdruck Vakuumsauger
$r$	$[m]$	Radius bei zylindrischen Handhabungsobjekten
$r_a$	$[m]$	Abstand zwischen Drehpunkt und beschleunigtem System
$r_i$	$[m]$	Innenradius des Hohlzylinders zur Bewertung des Abstandes von Störkonturen
$v_T$	$\left[ \frac{m}{s} \right]$	Translatorische Geschwindigkeit
$x$	$[-]$	Lösungsvektor der linearen Optimierung zur Greiferflexibilisierung

**Formelverzeichnis (griechische Buchstaben)**

Variable	Einheit	Bedeutung
$\Delta p$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Druckdifferenz
$\Delta p^{fall}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Druckdifferenz gegen Abfallen

Variable	Einheit	Bedeutung
$\Delta p^{slip}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Druckdifferenz gegen Verdrehen
$\alpha$	$[^\circ]$	Winkel zur Auslegung prismatische Greifer
$\alpha_{MG}$	$[^\circ]$	Winkel zur Beschreibung der Stabilität von Griffen mechanischer Greifer
$\alpha_{VG}$	$[^\circ]$	Winkel zur Beschreibung der Stabilität der Griffe von Vakuumgreifern
$\beta$	$[^\circ]$	Prismawinkel
$\delta$	$[^\circ]$	Öffnungswinkel Winkelgreifer
$\varepsilon$	$[-]$	Quotient aus auftretender und zulässiger Biegespannung
$\eta$	$[-]$	Wirkungsgrad
$\mu$	$[-]$	Haftreibungskoeffizient
$\sigma_{max}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Maximal auftretende Biegespannung
$\sigma_{zul}$	$\left[ \frac{N}{m^2} \right]$	Zulässige Biegespannung
$\varphi$	$[^\circ]$	Maximale Oberflächenkrümmung von Kontaktflächen
$\Gamma$	$[m]$	Länge der Dichtlippe von Vakuumsaugern
$\psi$	$[Nm]$	Elemente der Kraft-Momenten-Matrix für Prozesskräfte
$\omega$	$\left[ \frac{rad}{s} \right]$	Winkelgeschwindigkeit

## Glossar

In der Handhabungs- und Greiftechnik existieren eine ganze Reihe von Fachbegriffen, die nicht immer trennscharf differenziert werden. Im Folgenden wird die Verwendung der wichtigsten Begriffe beschrieben, um ein Verständnis der Arbeit zu erleichtern.

### Auslegung und Auswahl

Der DUDEN (2017A) definiert Auslegen als „auf eine bestimmte Leistung o. Ä. hin anlegen, einrichten, konstruieren“ und Auswählen als „prüfend aussuchen“ (DUDEN 2017B). Ausgehend von diesen Definitionen stellt die Greiferauslegung die Schaffung von Lösungen für eine Handhabungsaufgabe in einem bestimmten Lösungsraum dar. Die Auswahl dient unterstützend beim Finden der für den Nutzer oder für die gesetzten Randbedingungen bestgeeigneten Lösung.

### Handhaben

Handhaben stellt neben Fördern und Lagern eine Teilfunktion des Materialflusses dar. Es „[...] ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem“. Teilfunktionen des Handhabens sind: Speichern, Menge verändern, Bewegen, Sichern, Kontrollieren. (VDI 2860)

### Handhabungssystem

Unter einem Handhabungssystem wird das System verstanden, welches zur Durchführung einer Handhabungsaufgabe definiert werden muss. Es enthält die Domänen Handhabungsgerät, Handhabungsobjekt, Prozess, Umwelt und Greifer. (vgl. SCHMALZ ET AL. 2015)

### Greifersystem

Ein Greifersystem ist das Teilsystem eines Handhabungssystems, welches die Kraftübertragung vom Werkstück zum Handhabungsgerät herstellt, um die Pose des Werkstücks relativ zum Handhabungsgerät zu sichern (in Anlehnung an LAPERRIÈRE & REINHART 2014). Das Greifersystem besteht aus dem physischen Greifer und den zugehörigen Funktionseigenschaften, wie beispielsweise dem Druck mit welchem der Greifer betrieben werden soll. Der Greifer setzt sich zusammen aus einem Greifergrundkörper, welcher den Kontakt zum Handhabungsgerät herstellt, sowie Wirkelementen, welche die Schnittstelle zum Handhabungsobjekt darstellen.

### Mechanische Greifer

Unter mechanischen Greifern versteht man Greifer, die mittels zwei bis vier Fingern (sogenannten Backen) Handhabungsobjekte durch Kraftschluss, Formschluss oder einer Kombination aus beiden handhaben. Wichtige Arten von mechanischen Greifern sind Parallel- und Winkelgreifer. (vgl. HESSE 2004)

### Kontaktstelle:

Die Kontaktstelle stellt die Schnittstelle zwischen Wirkelement und Handhabungsobjekt dar. Ausprägungen der Kontaktstelle sind Kontaktpunkte, Kontaktlinien und Kontaktflächen. Eine Kontaktstelle besteht aus Oberflächensegmenten, welche innerhalb gewisser vom Nutzer vorgegebener Toleranzen in einer Ebene liegen und über ähnlich orientierte Normalenvektoren verfügen.

### Greifpunkt:

Der Greifpunkt befindet sich im geometrischen Mittelpunkt der Kontaktstelle. Seine Position wird mittels eines dreidimensionalen Vektors, welcher den Massenschwerpunkt des Handhabungsobjektes als Ursprung hat beschrieben. Somit ist eine einfache Lokalisierung der Greifposition auf dem Handhabungsobjekt möglich.

### Greifpunktnormale:

Die Greifpunktnormale wird ebenfalls durch einen dreidimensionalen Vektor repräsentiert. Der Aufsatzpunkt des Vektors befindet sich dabei im Greifpunkt. Die Richtung der Greifpunktnormalen, ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel aller Normalenvektoren der Kontaktstelle. Sie stellt somit einen wichtigen Parameter für die Anfahr- bzw. Schließrichtung von Greifern sowie für das Finden von parallelen Kontaktstellen bei mechanischen Greifern dar.

### Punktkontakt:

Ein Punktkontakt zeichnet sich dadurch aus, dass sich in seiner Umgebung keine Segmente mit ähnlichen Oberflächennormalen befinden. Dies ist insbesondere bei Ecken von Handhabungsobjekten der Fall. Punktkontakte lassen sich über Greifpunkt und zugehörige Normale beschreiben. Kontaktstellen auf Kugeln werden in der Literatur (vgl. HESSE 2004) meist als Punktkontakte beschrieben. Hierbei muss jedoch hinsichtlich der verwendeten Wirkelemente unterschieden werden: Für flache Wirkelemente mechanischer Greifer handelt es sich tatsächlich um einen Punktkontakt. Für Vakuumgreifer, welche eine gewisse Krüm-

mung tolerieren, kann eine Kugel in einem spezifischen Toleranzbereich jedoch auch als Flächenkontakt modelliert werden.

#### Linienkontakt:

Bei einem Linienkontakt sind die Normalen mit gleicher Orientierung linienförmig auf dem Handhabungsobjekt angeordnet. Dies kann zum einen durch den Griff mit einem flachen Wirkelement auf einer Handhabungsobjekt-Kante und zum anderen beim Griff mit einem flachen Wirkelement auf einer zylindrischen Struktur entstehen. Linienkontakte werden durch Anfangs- und Endpunkt der Linie sowie den zugehörigen Normalenvektor repräsentiert.

#### Flächenkontakt:

Flächenkontakte stellen alle Kontaktstellen dar, welche nicht den beiden oben genannten zuzuordnen sind. Sie können jede denkbare geometrische Form annehmen. Zur Vereinfachung sollen in dieser Arbeit nur rechteckige Flächenkontakte betrachtet werden. Sie lassen sich mittels vier Eckpunkten beschreiben.

#### Freies Volumen:

Das freie Volumen stellt den Raum über einer Kontaktstelle dar, welcher durch Verschieben der Kontaktstellenebene entlang des Normalenvektors bis zur Kollision mit anderen geometrischen Körpern aufgespannt wird. Zur Beschreibung des freien Volumens wird die Distanz dieser Verschiebung verwendet.

#### Hüllkörper:

Der Hüllkörper (auch als Bounding Box bezeichnet), beschreibt einen virtuellen, die Außenkonturen des Handhabungsobjekts umschließenden, Körper. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Verwendung eines am Handhabungsobjekt-Koordinatensystem ausgerichteten Quaders als Hüllkörper gewählt (Axis-Aligned Bounding Box).



# 1 Einleitung

## 1.1 Herausforderungen bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Die Automatisierung industrieller Prozesse hat in den vergangenen Jahren rasant zugenommen. So konnte die deutsche Industrie im Jahr 2015 einen Umsatz von 12,2 Milliarden Euro im Bereich der Robotik und Automation verzeichnen (VDMA 2016). Grund hierfür sind neben den in Europa vergleichsweise hohen Personalkosten die Möglichkeiten der Entlastung des Menschen von repetitiven oder unergonomischen Arbeiten (ESMAELIAN ET AL. 2016). Einen wichtigen Baustein innerhalb der industriellen Automatisierung stellen Industrieroboter dar. Deren große Wachstumsraten, bezüglich der Anzahl der verwendeten Einheiten, können ebenfalls als Indikator dieser Entwicklung gewertet werden. Ende des Jahres 2015 waren weltweit geschätzt 1,6 Millionen Roboter im Einsatz (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016). Bis zum Jahr 2019 werden Steigerungsraten von bis zu 13 Prozent jährlich erwartet (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016).

Die wichtigsten Anwendungsgebiete von Industrierobotern stellen mit 44 Prozent der eingesetzten Roboter Handhabungsoperationen und die Maschinenbeschickung dar (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016). Das überrascht nicht, da die Handhabung seit je her großes Optimierungspotential in industriellen Prozessen bietet. Schätzungen in der Literatur gehen davon aus, dass zwischen 20 und 50 Prozent aller Betriebsaufwendungen in der Fertigung mit der Materialhandhabung verknüpft werden können (TOMPKINS ET AL. 2010). Es wird angenommen, dass durch effektive Planung 10 bis 30 Prozent dieser Kosten eingespart werden könnten. Bezogen auf ein fertiges Produkt wird von einem Kostenanteil für Materialhandhabung von 15 bis 70 Prozent ausgegangen. (TOMPKINS ET AL. 2010).

Innerhalb der Handhabungstechnik besitzen Greifer als Schnittstelle zwischen Handhabungsgerät und Handhabungsobjekt eine Schlüsselposition (REINHART 2009). Der Ausfall eines Greifers bedeutet oft den Stillstand eines Handhabungssystems (CAUSEY & QUINN 1998) und damit unter Umständen der gesamten Produktionslinie. Aus Kostensicht wird angenommen, dass Greifer zwischen 10 bis 15 Prozent (CECCARELLI 2004) bzw. bis zu 20 Prozent (PHAM & TACGIN 1992A) der Kosten eines Robotersystems ausmachen.

Während Industrieroboter als „[...] *frei programmierbare Mehrzweckmanipulatoren* [...]“ (DIN EN ISO 8373) verhältnismäßig einfach an neue oder sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst werden können, müssen Greifer meist aufwendig an eine spezifische Handhabungsaufgabe oder ein spezifisches Werkstück angepasst werden (SARAVANAN ET AL. 2009). Die Auslegung und Auswahl von Greifern stellt aufgrund der großen Anzahl an zu beachtenden Faktoren und deren Wechselwirkungen untereinander eine komplexe, multikriterielle Aufgabe dar (vgl. SCHMALZ ET AL. 2015). Im industriellen Alltag wird diese Arbeit meist händisch, basierend auf Erfahrungswissen und unter Verwendung von Greiferherstellern zur Verfügung gestellter Informationen, durchgeführt (DOLL & HUBER 1988). Dieses Vorgehen ist zeitaufwendig und stark von der durchführenden Person abhängig (CARDAUN 1981, SINTOV & SHAPIRO 2015). Aufgrund von fehlenden einheitlichen Richtlinien für die Auslegung und Auswahl von Greifersystemen (HESSE 2004) wird nicht immer der ganze, theoretisch mögliche Lösungsraum betrachtet. Es kann somit nicht sichergestellt werden, dass die später realisierte Lösung das Optimum darstellt (FANTONI ET AL. 2014A). Zur Vermeidung von Ausfällen wird meist mit großen Sicherheitsfaktoren gerechnet, was zu einer Überdimensionierung der Systeme und damit unnötigen Investitions- und Betriebskosten führt (BÖGER 1997). Aus der oben beschriebenen Schnittstellenfunktion lässt sich somit eine Einschränkung des Einsatzes von Industrierobotern durch die aufwendige und wenig flexible Auslegung von Greifersystemen erkennen.

Vor dem Hintergrund der digitalen Produktion (vgl. WESTKÄMPER ET AL. 2013), stellt die Simulation von Greifprozessen (vgl. MILLER & ALLEN 2004, SCHYJA & KUHLENKÖTTER 2015) ein immer wichtiger werdendes Themenfeld dar. Die dafür notwendigen Modelle müssen bisher meist von Hand erstellt und aufbereitet werden, was zu einem Bruch in der Medienkette führt.

Die abnehmende Dauer von Produktlebenszyklen und die immer stärkere Individualisierung von Produkten zwingt Unternehmen dazu, zunehmend dynamischer und flexibler auf Kundenwünsche zu reagieren (WIENDAHL ET AL. 2014, SCHUH 2014). Dies führt dazu, dass Betriebsmittel, zu denen auch die Greifer zählen, in Zukunft häufiger gewechselt bzw. angepasst werden müssen (FELDMANN ET AL. 2014). Aus diesen Entwicklungen ergeben sich für Greifer aus Sicht der Auslegung und Auswahl zwei notwendige Stoßrichtungen: Zum einen muss untersucht werden, wie die Flexibilität von Greifersystemen gesteigert werden kann um auf die Veränderungen besser reagieren zu können (PHAM & YEO 1991, FANTONI ET AL. 2014B, FELDMANN ET AL. 2014). Zum anderen

muss untersucht werden, wie der Nutzer bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen technisch unterstützt werden kann (PHAM & YEO 1991, FANTONI ET AL. 2014B, WOLNIAKOWSKI ET AL. 2014).

In der Literatur werden einige Herangehensweisen beschrieben, welche die diskutierten Herausforderungen betrachten. Festzustellen ist jedoch, dass es sich dabei meist um Insellösungen für eine spezifische Problematik handelt und es den Herangehensweisen damit meist an Durchgängigkeit, Vollständigkeit und Übertragbarkeit mangelt.

### **1.2 Zielsetzung und Betrachtungsbereich der Arbeit**

Ausgehend von den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Herausforderungen ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer rechnergestützten Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen. Es sollen somit beide der in *Abchnitt 1.1* formulierten Stoßrichtungen in einer Methode abgedeckt werden. Ergebnis der Methode sind fertig ausgelegte Greifer, welche anhand geeigneter Schnittstellen elektronisch ausgegeben werden.

Die in dieser Arbeit beschriebene Methode soll einen Ansatz darstellen, wie, ausgehend von CAD-Daten von Handhabungsobjekten sowie Nutzereingaben, rechnergestützt Greifersysteme ausgelegt und ausgewählt werden können. Weiter soll betrachtet werden, wie bereits während des Prozesses der Auslegung und Auswahl die Flexibilität dieser Greifersysteme systematisch gesteigert werden kann. Der Anwendungsfokus der Methode liegt in der Neugestaltung von Handhabungssystemen, bei der sie den Nutzer im Zuge der Auslegung und Auswahl unterstützen soll.

Anhand der drei häufigsten industriell eingesetzten Greiferarten soll aufgezeigt werden, welche Schritte unternommen werden müssen, um die oben beschriebene Zielsetzung zu erreichen. Wichtig ist hierfür eine durchgängige (Daten-) Struktur zu definieren. Zentrale Bausteine dafür stellen die Greifpunktbestimmung, die Dimensionierung der Wirkelemente, die Greifkraftberechnung sowie der Algorithmus zur methodischen Steigerung der Greiferflexibilität dar. Zur Bewertung der generierten Lösungen sollen des Weiteren Metriken definiert werden, die den Nutzer bei der finalen Auswahl unterstützen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen wichtige Kernaspekte der Methode prototypisch umgesetzt werden, um die Funktionsfähigkeit der Herangehensweise zu bewerten.

### **1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel (vgl. *Inhaltsverzeichnis*). Ausgehend von der in Kapitel 1 beschriebenen Motivation und Zielsetzung wird im darauf folgenden Kapitel 2 auf den aktuellen Stand der Erkenntnisse in der Wissenschaft eingegangen. In Kapitel 3 wird hieraus der Forschungsbedarf hergeleitet, welcher sich aus der Lücke zwischen dem Stand der Erkenntnisse und der Zielsetzung ergibt. Im vierten Kapitel „Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen“ wird dem Leser ein Überblick zu den verschiedenen Bausteinen der Methode gegeben. Die wichtigsten Bausteine werden in dem darauf folgenden Kapitel weiter spezifiziert. Im Einzelnen sind das die Analysephase mit Datenbereitstellung und Greifpositionsbestimmung (Kapitel 5), die Synthesephase (Kapitel 6) mit der Auslegung von Greifersystemen sowie dem Algorithmus zur Steigerung der Greiferflexibilität. Kapitel 7 beschreibt Ansätze zur Bewertung von Greifersystemen sowie die notwendigen Schritte, diese von der virtuellen in die physische Welt zu überführen. In Kapitel 8 wird die Methode anhand eines Beispielszenarios erprobt. Basierend auf diesen Ergebnissen wird im vorletzten Kapitel 9 eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Methode durchgeführt. Kapitel 10 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen.

## **2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse**

Das folgende Kapitel stellt die Basis der vorliegenden Arbeit dar. Ausgehend von den Grundlagen der Greiftechnik spannt es einen Bogen über Herangehensweisen, welche bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen eine Rolle spielen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit Grundlagen der additiven Fertigung in der Greiftechnik.

### **2.1 Grundlagen von Greifersystemen**

Die Greiftechnik kann im übertragenen Sinne auf eine lange Geschichte zurückblicken. Im 3 Jh. vor Christus verlor der römische Offizier Marcus Sergius Silus seine rechte Hand und ließ sich daraufhin eine eiserne Kunsthand „dextra ferrea“ anfertigen, von der spekuliert wird, dass sie bereits bewegliche Elemente besaß (LÖFFLER 1984).

Mit steigender Automatisierung in der Produktion begann auch die Greiftechnik einen wichtigen Aspekt bei der Fertigung, Montage und Logistik von Produkten einzunehmen. Bereits in den 1960er Jahren wurden erste Greifer im industriellen Umfeld eingesetzt (HESSE 2011). Ein wichtiger Einsatzbereich der Greiftechnik ist die Industrierobotik. Sie findet jedoch auch Einsatz in handgeführten Manipulatoren, Fertigungsmaschinen und Servicerobotern (SEEGRÄBER 1993).

Die übergeordnete Aufgabe der Greiftechnik ist es, die Vorteile (automatisierter) Prozesse sicherzustellen. Beispiele dafür sind die Reduktion von Kosten und Taktzeit, Steigerung der Ausbringungsmenge, Erleichterung menschlicher Arbeit sowie eine Steigerung der Qualität (HEINRICH ET AL. 2015). Das vom Greifprinzip unabhängige Ziel des Greifers ist es, das zu handhabende Objekt sicher zu manipulieren ohne es dabei zu beschädigen (ZAKI ET AL. 2010).

Der große Anwendungsbereich der Greiftechnik spiegelt sich in der Bandbreite an Greiferlösungen wider. Die Anwendung bestimmt neben der spezifischen Aufgabe, der Bauform des Handhabungsobjektes und des verwendeten Greifprinzips maßgeblich die Gestaltung des Greifersystems.

### 2.1.1 Funktionsweise von Greifersystemen

Unabhängig von der physischen Ausführung lassen sich folgende Funktionen festhalten, welche ein Greifersystem nach HESSE (2004) erfüllt:

- „Vorübergehendes Aufrechterhalten einer definierten Position und Orientierung des Werkstücks relativ zum Greifer bzw. zur Handhabungseinrichtung
- Aufnahme statischer (Gewichts-), dynamischer (Bewegungs-, Beschleunigungs-, bzw. Verzögerungs-) und prozessbedingter Kräfte und Momente
- Lagebestimmung der Greifobjekte
- Änderung von Position und Orientierung des Greifobjekts zur Handhabungseinrichtung mit Hilfe von Handgelenkachsen
- Technologische Operationen wie zum Beispiel das Montieren im Greifer“

Eine spezifischere Auflistung der Funktionen von Greifern findet sich in FANTONI ET AL. (2012).

Für die technische Umsetzung der Funktionen gibt es unzählige Lösungsansätze. Grundsätzlich lassen sich diese, nach HESSE (2011), in drei Schlussarten oder Kombinationen dieser gliedern: Formschluss, Kraftschluss und Stoffschluss.

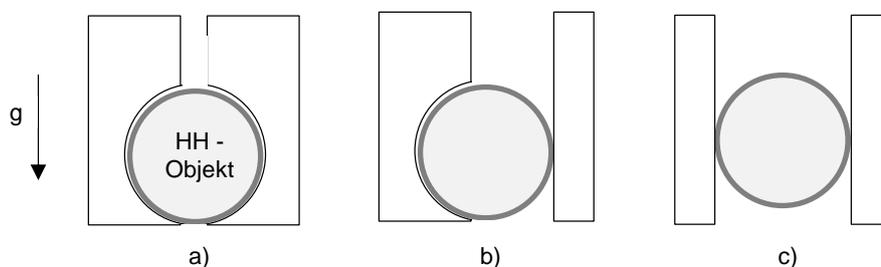
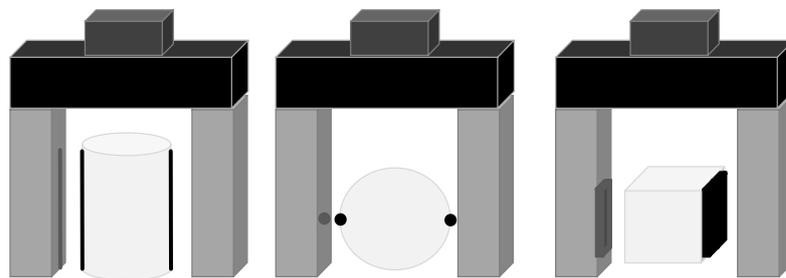


Abbildung 2.1: Visualisierung der wichtigsten Schlussarten: a) Formschluss, b) Form-Kraftschluss, c) Kraftschluss (HESSE 2011)

Wie aus *Abbildung 2.1* zu erkennen ist, definiert sich ein formschlüssiger Griff darüber, auch bei fehlender (statischer) Reibung an der Kontaktfläche eine sichere Handhabung für eine bestimmte Belastung sicherzustellen (BICCHI & KUMAR 2000). Bei kraftschlüssigen Griffen dagegen wird durch Unterdruck, Reibung, magnetische oder elektrostatische Kräfte ein sicherer Kontakt zwischen Handhabungsobjekt und Wirkelementen generiert. Stoffschlüssiges Greifen wird durch molekulare Wechselwirkungen erreicht (SEEGRÄBER 1993). Ein Beispiel hierfür stellen Gefriergreifer in der Textilindustrie dar.

Neben der Art des Schlusses ist für die Stabilität eines Griffes entscheidend, wie die Art und Anzahl der Kontakte zwischen Handhabungsobjekt und Greifer gestaltet sind. Grundsätzlich gibt es bei Greifern drei Arten von Kontaktstellen (HESSE 2004):

1. Linienkontakt (vgl. *Abbildung 2-2*, links)
2. Punktkontakt (vgl. *Abbildung 2-2*, Mitte)
3. Flächenkontakt (vgl. *Abbildung 2-2*, rechts)



*Abbildung 2-2: Arten und Auftreten von Kontaktstellen*

Theoretisch sind alle Kontaktarten miteinander kombinierbar. Es gibt jedoch Grenzen bezüglich der Stabilität der Griffe, der Beschädigung des Handhabungsobjekts oder des Greifers. Um ein Greifobjekt eindeutig in einer Lage sichern zu können, sind mindestens drei Kontaktpunkte nötig (VDI 2740). Vakuumgreifer können aufgrund ihrer Bauart und ihres Wirkprinzips ausschließlich flächige Kontakte herstellen.

### **2.1.2 Arten und Aufbau von Greifersystemen**

Es existiert keine feste Norm zur Einteilung von Greifern (FELDMANN ET AL. 2014), daher existieren eine ganze Reihe von Gliederungsansätzen. Angelehnt an die oben genannten Schlussarten kann die in *Abbildung 2-3* beschriebene Nomenklatur vorgenommen werden.

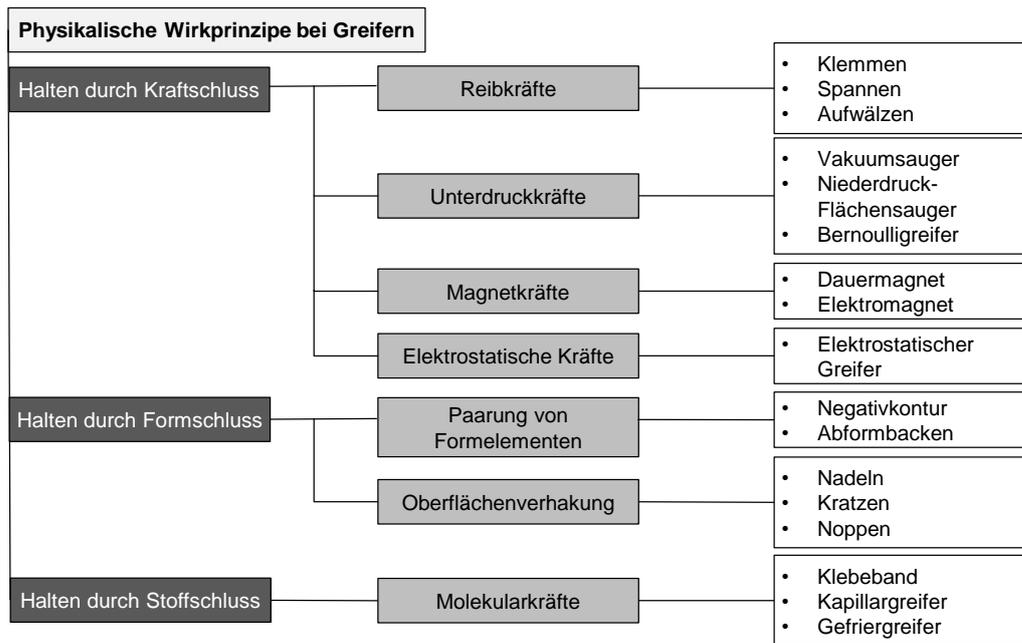


Abbildung 2-3: Ausprägungen und Einordnung von Greiferlösungen (in Anlehnung an STEPHAN (2001)).

Der Aufbau von Greifersystemen unterscheidet sich aufgrund der unterschiedlichen Wirkprinzipien teilweise stark. Generell besteht jeder Greifer unabhängig vom verwendeten Greifprinzip aus einem Greifergrundkörper, der die Verbindung zum Handhabungsgerät herstellt sowie einem oder mehreren Wirkelementen (vgl. *Abbildung 2-4*), welche die Verbindung und somit die Übertragung der Greifkraft zum Handhabungsobjekt sicherstellt. Neben einer sicheren Anbindung an das Handhabungsgerät muss der Grundkörper eines Greifers so gestaltet sein, dass er, je nach Greiferart, funktionelle Komponenten wie Antrieb, Kinematik sowie eventuelle Sensorik und Elektronik aufnehmen kann (FELDMANN ET AL. 2014). Die Kinematik umfasst Getriebe-, Übertragungs- und Führungselemente, welche die Antriebskraft an die Wirkelemente weitergibt (SEEGRÄBER 1993). Der Flansch zwischen Handhabungsgerät und Greifer muss so ausgelegt sein, dass auftretende Kräfte und Momente übertragen werden können sowie das gegebenenfalls ein unkomplizierter und schneller Tausch des Greifers möglich ist (FELDMANN ET AL. 2014). Des Weiteren hat jeder Greifer ein System, welches die Energie zur Bereitstellung der Greifkraft herstellt. Insbesondere bei Vakuumbreifern wird dieses oft getrennt vom Greifer betrieben und betrachtet. Die Erzeugung der Greifkraft geschieht bei den meisten Greiferarten pneumatisch, hydraulisch oder elektrisch (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998). Zur Steuerung des Greifers sowie zur Statusbestimmung wird häufig ein Informationsverarbeitungssystem eingesetzt. Die Ansteuerung eines Greifers erfolgt meist

über das Handhabungsgerät, nur in Ausnahmefällen besitzen Greifer eine autonome Steuerung (SEEGRÄBER 1993).

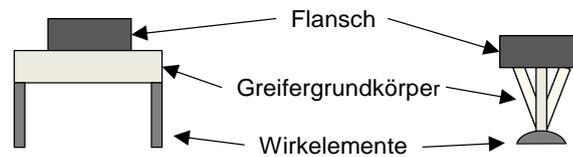


Abbildung 2-4: Aufbau von Greifersystemen am Beispiel von mechanischen Greifern (links) und Vakuumgreifern (rechts)

Bezogen auf den Marktanteil stellen Parallelbackengreifer mit 45 Prozent den größten Anteil, Winkelgreifer folgen mit 20 Prozent vor den Sauggreifern, welche 15 Prozent des Marktes einnehmen (HESSE 2011). Die drei in dieser Arbeit betrachteten Greiferarten decken somit 80 Prozent des Marktes ab. Im Folgenden soll genauer auf diese betrachteten Greiferbauformen eingegangen werden.

### Parallelgreifer

Die weite Verbreitung der Parallelgreifer in der Produktionstechnik lässt sich auf ihre Robustheit, ihre Flexibilität und die große Bandbreite an technischen Lösungen zurückführen. Wie bereits der Name andeutet und in *Abbildung 2-5* abgebildet ist, zeichnen sich Parallelgreifer durch eine lineare, translatorische Öffnungs- bzw. Schließbewegung von zwei parallel angeordneten Greifbacken aus (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998).

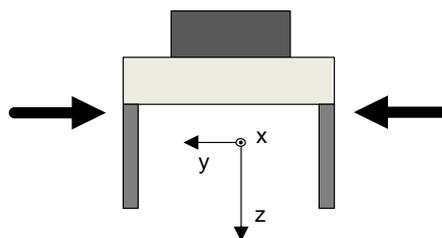


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Parallelgreifers

Parallelgreifer existieren in zahlreichen Bauformen und Baugrößen, mit einem Einsatzbereich von der Mikromontage bis hin zur Handhabung von schweren Gussteilen. Die Greifkräfte reichen dabei von wenigen Newton bis hin zu mehreren Kilo-Newton. Bedingt durch ihre Bauform lassen sich bei mechanischen Greifern drei Griffarten realisieren: a) Innen-, b) Außen- und c) Zwischengriff (vgl. *Abbildung 2-6*). Es werden somit immer zwei (parallele) Greifflächen benötigt (PHAM & YEO 1988A). Die Kraftübertragung erfolgt sowohl bei Parallel- als

auch bei Winkelgreifern durch Kraftschluss, Formschluss oder eine Kombination daraus (HESSE 2010). Eine Besonderheit von Parallelgreifern im Vergleich zu anderen Greiferarten stellt der meist konstante Kraftverlauf über die gesamte Strecke des Hubes dar (FELDMANN ET AL. 2014).

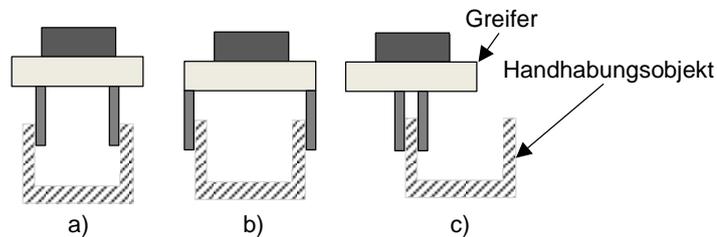


Abbildung 2-6: Griffarten bei mechanischen Greifern (HESSE 2004)

### Winkelgreifer

Wie die Parallelgreifer besitzen auch Winkelgreifer (vgl. *Abbildung 2-7*) zwei Backen. Der Unterschied besteht darin, dass sich diese nicht parallel sondern bogenförmig öffnen und schließen (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998). Gegenüber den Parallelgreifern ergeben sich dadurch meist einfachere Kinematiken, was eine kleinere Bauform bei vergleichbarer Greifkraft erlaubt (GORCE & FONTAINE 1996). Neben der kleineren Bauform bietet der Winkelgreifer den Vorteil, dass, bedingt durch den Winkel im geöffneten Zustand, weniger freier Raum als bei Parallelgreifern benötigt wird (FELDMANN ET AL. 2014). Dies spielt insbesondere bei großen Störkonturen eine Rolle. Nachteilig bei Winkelgreifern ist, dass aufgrund ihrer Bauart nur bei einer Öffnungsweite ein paralleler Griff erzeugt werden kann. Dies schränkt die Flexibilität hinsichtlich mehrerer Greifobjekte stark ein.

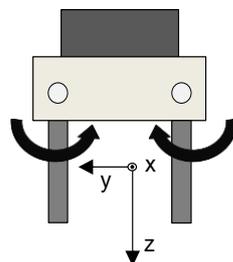
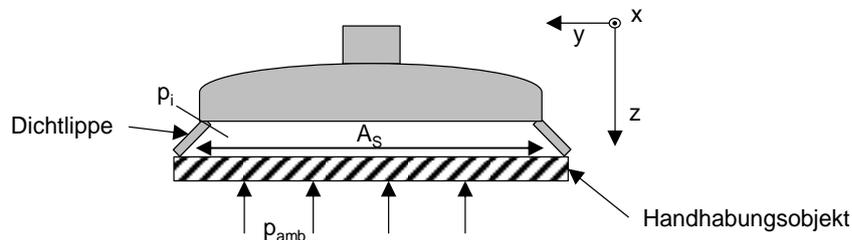


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung eines Winkelgreifers

### Vakuumgreifer

Neben den mechanischen Greifern stellen Vakuumgreifer eine weitverbreitete technische Lösung zum kraftschlüssigen Greifen dar. Im Gegensatz zu mechani-

schen Greifern benötigen sie nur eine Greiffläche (PHAM & YEO 1988A) und besitzen meist keine beweglichen Teile (HESSE 2011). Die Kraftübertragung basiert, wie in *Abbildung 2-8* dargestellt, auf einer Druckdifferenz ( $\Delta p$ ), welche zwischen dem Innendruck eines Vakuumsaugers ( $p_i$ ) und dem Druck der Umgebungsatmosphäre ( $p_{amb}$ ) erzeugt wird (BECKER 1993). Die übertragbare Kraft ist somit hauptsächlich von der Druckdifferenz sowie der mit dem Vakuum beaufschlagten Fläche ( $A_s$ ) abhängig. Technisch ist es möglich ein bis zu 90-prozentiges Vakuum herzustellen (bezogen auf den Umgebungsdruck). Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist jedoch eine Druckdifferenz von ca. 60 Prozent anzustreben (bei Normbedingungen entspricht dies -0,6 bar) (HESSE 2004). Es existieren unzählige Arten und Bauformen von Vakuumsaugern.



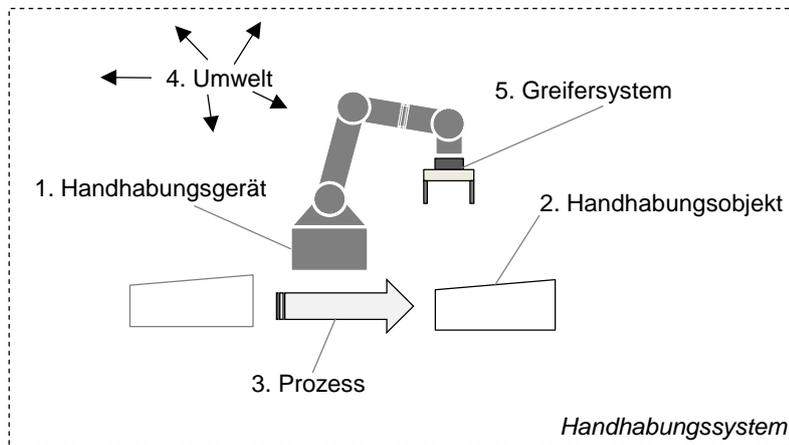
*Abbildung 2-8: Schematische Darstellung eines Vakuumsaugers in Anlehnung an HESSE (2011)*

Für die Erzeugung des Unterdrucks gibt es je nach Anwendungsfall verschiedene Möglichkeiten. Standardmäßig erfolgt dies mittels Vakuumpumpen, Venturidüsen, Gebläsen oder Blasluftherzeugern (FRITZ 2017). Begrenzt wird der Einsatz von Vakuumsaugern immer dann, wenn die benötigte Druckdifferenz nicht, oder nicht in ausreichendem Maße, erzeugt werden kann. Dies tritt insbesondere bei unebenen oder stark porösen Handhabungsobjekten auf (BRAUN 1989).

### 2.1.3 Grundlagen der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Um die Komplexität der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen zu reduzieren, gibt es mehrere Ansätze die den Prozess beeinflussenden Parameter zu kategorisieren. Diese sind beispielsweise den Werken von CARDAUN (1981), WEISS (1983), SEEGRÄBER (1993), MÜLLER (1997), WOLF & STEINMANN (2004), SAYLER (2011), HESSE (2011) und FELDMANN ET AL. (2014) zu entnehmen. Ausgangspunkt der genannten Methoden ist meist das Handhabungsobjekt, dessen Eigenschaften eine zentrale Rolle für die Gestaltung des Handhabungssystems spielen. Im Folgenden soll eine Betrachtung der bestimm-

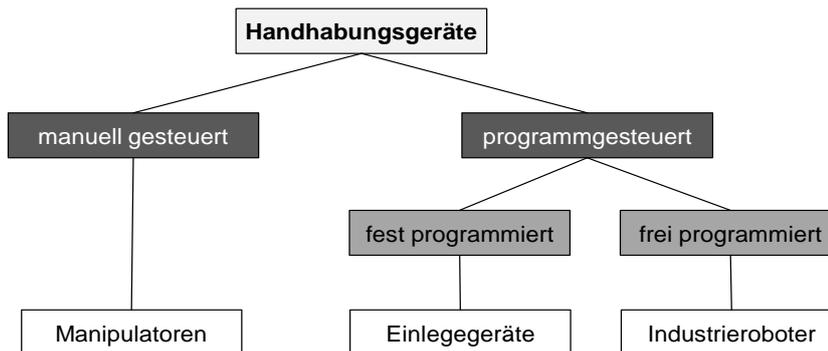
menden Eigenschaften bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen erfolgen. Die Nomenklatur orientiert sich dabei an PHAM & YEO (1991), welche identifizieren, dass die in *Abbildung 2-9* abgebildeten fünf Domänen eine wichtige Rolle bei der Auslegung und Auswahl eines Greifersystems spielen:



*Abbildung 2-9: Domänen eines Handhabungssystems*

### Handhabungsgerät

Das Handhabungsgerät stellt neben dem Handhabungsobjekt und dem Greifer ein zentrales Element im Handhabungssystem dar, da es für die Bewegung des Handhabungsobjektes sorgt. Neben Industrierobotern, welche in verschiedensten Bauformen auf dem Markt sind, existieren Einlegegeräte und Manipulatoren (vgl. *Abbildung 2-10*).



*Abbildung 2-10: Einteilung von Handhabungsgeräten hinsichtlich ihrer Steuerung (WEBER 2009, VDI 2860)*

Eine Standardisierung der Schnittstellen zu Endeffektoren wurde in DIN EN ISO 9409-2 festgelegt. Neben übereinstimmenden Schnittstellen zwischen Handhabungsgerät und Greifer, kann als zentraler Punkt der Greiferauswahl die verfügbare Nennlast des Handhabungsgerätes betrachtet werden (BARTENSCHLAGER

ET AL. 1998). VDI 2861 Blatt 2 definiert, dass sich die (statischen) Belastungen des Roboters (Gleiches gilt für Handhabungsgeräte jeder Art) „[...] vektoriell zum einen aus den Gewichtskräften von Werkzeugen und Handhabungsobjekten, zum anderen aus Prozesskräften zusammensetzen“. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass jedes Mehrgewicht eines Greifers eine Einschränkung für das Maximalgewicht eines möglichen Handhabungsobjektes sowie für mögliche Prozesskräfte bedeutet. Im schlimmsten Fall kann dies dazu führen, dass für eine entsprechende Greiferlösung ein größerer Roboter verwendet werden muss, was die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit (vgl. PARYANTO ET AL. 2015) des Gesamtsystems verschlechtert. Hinsichtlich der Berechnung der Greifkräfte ist eine Kenntnis der durch das Handhabungsgerät zu erwartenden Beschleunigungen nötig. Für Roboter sind dabei Werte in der Größenordnung von  $20 \text{ m/s}^2$  anzunehmen, bei hochdynamischen Handhabungsgeräten bis zu  $100 \text{ m/s}^2$  (WOLF & STEINMANN 2004). Es gilt zu beachten, dass durch Notabschaltungen deutlich höhere Beschleunigungen auftreten können.

Des Weiteren sollte bei der Greiferauswahl und -auslegung die Wiederhol- und Positioniergenauigkeit des verwendeten Handhabungsgerätes beachtet werden (PHAM & YEO 1988B). Diese beeinflusst maßgeblich die Genauigkeit des Gesamtsystems aus Greifer und Handhabungsgerät. Je genauer das Handhabungsgerät arbeitet, desto weniger Sicherheit muss bei der Auswahl und insbesondere bei der Auslegung vorgehalten werden, da eine höhere Prozesssicherheit, beispielsweise beim Anfahren von Greifpositionen, zu erwarten ist.

### Handhabungsobjekt

Das Handhabungsobjekt kann als das zentrale Element im Handhabungssystem betrachtet werden (SEEGRÄBER 1993). An der Zielstellung, dieses sicher und ohne Beschädigung zu greifen sowie handzuhaben, werden alle anderen Systemparameter ausgerichtet. Neben der Geometrie, der Größe, dem Gewicht, der Oberflächenbeschaffenheit sowie den sonstigen Materialeigenschaften, spielen eine ganze Reihe von möglichen Aspekten eine Rolle. In theoretischen Betrachtungen des Handhabungssystems konnte gezeigt werden, dass der Greifpunkt das kritischste Element im System darstellt (SCHMALZ ET AL. 2015). Das bedeutet, dass eine Veränderung bzw. die Wahl des Greifpunktes den größtmöglichen Einfluss auf ein Handhabungssystem hat. Dieser wiederum wird von einer ganzen Reihe externer Faktoren aus den anderen Domänen beeinflusst. Aufgrund der prominenten Stellung existieren in der Literatur einige Ansätze zur Strukturierung von Handhabungsobjekten (vgl. WOLF & STEINMANN (2004), LOTTER &

WIENDAHL (2012), WEISS (1983), VDI 2740, FRANK (1975)). Übergeordnetes Ziel all dieser Ansätze ist es, basierend auf einer Zuordnung von Handhabungsobjekten zu einer Handhabungsobjekt-Klasse, anhand von Regelwerken Empfehlungen für die Greiferauswahl zu geben. Mittels der Klassifizierung von Handhabungsobjekten hinsichtlich ihrer Eigenschaften ist es somit möglich die Komplexität der Greiferauswahl deutlich zu reduzieren. Zusätzlich zu den Eigenschaften des Handhabungsobjektes selbst wird oft das Verhalten in Ruhe sowie in Bewegung betrachtet (vgl. *Tabelle 2-1*).

*Tabelle 2-1: Auflistung von Werkstückeigenschaften und Werkstückverhalten (WOLF & STEINMANN 2004)*

Werkstückeigenschaften			Werkstückverhalten	
Geometrische Werkstückdaten	Kennzeichnende Formelemente	Physikalische Eigenschaften	Ruheverhalten	Förderverhalten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Form /Verhaltenstyp</li> <li>• Ausdehnung/ Abmessung</li> <li>• Seitenverhältnisse</li> <li>• Symmetrien</li> <li>• Größenklassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrung</li> <li>• Absatz, Bund</li> <li>• Sicke, Wulst</li> <li>• Ausschnitt</li> <li>• Schlitz</li> <li>• Nut, Einstich</li> <li>• Fase</li> <li>• Haken</li> <li>• Ausklinkung</li> <li>• Krümmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkstoff</li> <li>• Schwerpunkt</li> <li>• Steifigkeit</li> <li>• Bruchfestigkeit</li> <li>• Masse</li> <li>• Oberflächenbeschaffenheit</li> <li>• Temperatur</li> <li>• Bearbeitungszeit</li> <li>• Gleitgrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standsicherheit</li> <li>• Stabile Orientierung</li> <li>• Vorzugsorientierung</li> <li>• Stapelfähigkeit</li> <li>• Hängefähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleitfähigkeit</li> <li>• Rollfähigkeit</li> <li>• Richtungsstabilität</li> </ul>

Neben Werkstückeigenschaften und Werkstückverhalten gibt es noch eine dritte Möglichkeit der Einteilung, welche das Verhalten eines Werkstücks beim Handhaben beschreibt. Dies wird über sogenannte Verhaltenstypen realisiert. Die Literatur unterscheidet zwischen elf (WOLF & STEINMANN 2004) und zwölf (FRANK 1975) Typen wie beispielsweise Wirrteile, Flachteile, Zylinderteile, etc. Eine grobe Einschätzung wie sich die Handhabungsobjektgestalt auf die Handhabung auswirkt, ist mittels der Tabellenwerke von BOOTHROYD (2005) möglich.

Die Datenlage bezüglich der prozentualen Verteilung entsprechender Objekte in der Industrie ist sehr dünn. Eine exemplarische Analyse der Teile in der Montage der Robert Bosch GmbH findet sich in der Arbeit von SAYLER (2011). Diese zeigt, dass der prozentual größte Anteil der untersuchten Objekte zylindrisch oder quaderförmig sowie aus Metall ist.

Die genannten Einteilungen eignen sich sehr gut, um einen ersten Eindruck über ein Handhabungsobjekt sowie mögliche Herausforderungen zu erhalten. Nichtsdestotrotz ist es aufgrund der großen Vielfalt an Handhabungsobjekten und Grei-

fern sehr schwierig daraus konkrete Greiflösungen abzuleiten, auch wenn immer wieder versucht wird allgemeingültige Definitionen zu finden. FELDMANN ET AL. (2014) geben beispielsweise an, dass Blockteile eine gute Eignung für mechanische Greifer bieten, während für Flachteile Vakuumgreifer prädestiniert sind. Die Materialeigenschaften eines Handhabungsobjektes sind eine weitere Möglichkeit eine grobe Vorauswahl geeigneter Greifersysteme zu treffen. Magnetgreifer sind beispielsweise nur für ferromagnetische Objekte (SEEGRÄBER 1993), stark unregelmäßige Oberflächen dagegen nur begrenzt für Vakuumgreifer geeignet. Übersichtstabellen für die Grobauswahl werden unter anderem von FANTONI ET AL. (2014B) bereitgestellt.

In Hinblick auf die Auslegung kann die Masse des Handhabungsobjektes als wichtigstes Kriterium gesehen werden. Unabhängig von der Greiferart bestimmt sie, welche Greifkraft aufgebracht werden muss, um das Objekt, bezogen auf einen spezifischen Handhabungsprozess (mit entsprechenden dynamik- oder extern induzierten Kräften), sicher handhaben zu können (SEEGRÄBER 1993). Entsprechende Materialeigenschaften schränken auch hier unter Umständen die Auswahl ein. Ein Beispiel ist, dass die benötigten Greifkräfte nicht, oder nicht beschädigungsfrei, durch eine bestimmte Greiferart bereitgestellt bzw. auf das Handhabungsobjekt übertragen werden können.

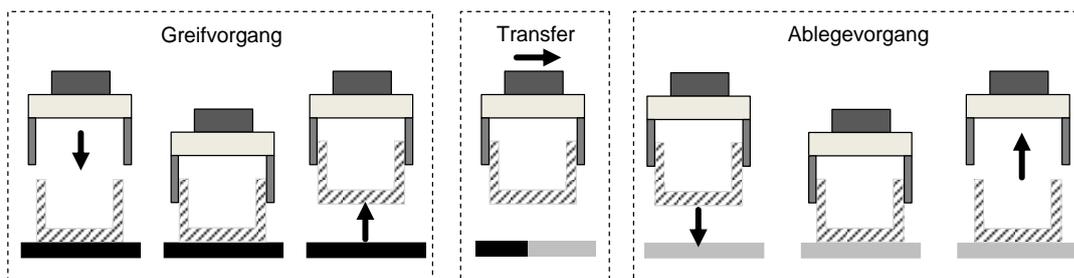
Neben der globalen Einordnung eines Handhabungsobjektes anhand obiger Kriterien muss für eine zielgerichtete Auslegung und Auswahl eines Greifersystems noch eine spezifischere Betrachtung des Handhabungsobjektes hinsichtlich möglicher Greifpunkte erfolgen. Zulässige Greifpunkte sind nach RÖHRDANZ (1997) alle Flächen oder Punkte, bei welchen während des Greifprozesses weder Greifer noch Handhabungsgerät mit dem Handhabungsobjekt kollidieren. Dementsprechend schränken Störkonturen an einem Handhabungsobjekt die Auswahl an möglichen Greifern oft bereits stark ein. Ist ein Greifpunkt zulässig, so bestimmen eine ganze Reihe von weiteren Faktoren seine Eignung für spezifische Greifer. Bei mechanischen Greifern spielen insbesondere die äußeren Abmessungen eines Handhabungsobjektes eine Rolle, da bei einem Außengriff darüber bereits die Öffnungsweite des Greifers bzw. der nötige Hub und somit die Baugröße des Greifers bestimmt wird. Die Öffnungsweite bzw. der Hub wird zudem durch die Toleranzen des Handhabungsobjektes beeinflusst. Je geringer diese sind, desto „enger“ am Handhabungsobjekt können Öffnungsweite und Hub ausgelegt werden (FELDMANN ET AL. 2014). Beim formschlüssigen Greifen beeinflussen die Toleranzen des Handhabungsobjektes die Gestaltung der Greifbacken, um ein bestmögliches Umschließen des Handhabungsobjektes zu errei-

chen (SEEGRÄBER 1993). Ein weiterer wichtiger Faktor für die Wahl der Greifposition ist der Abstand vom Massenschwerpunkt des Handhabungsobjektes (BROCK & FRICKE 1983). Um eine Vergrößerung der benötigten Greifkraft durch eine Hebelwirkung und die damit induzierten Momente zu vermeiden, sollten Greifposition möglichst nah am Schwerpunkt des Handhabungsobjektes gewählt werden.

Zu beachten ist, dass eine rein globale Beschreibung eines Handhabungsobjektes nicht immer ausreichend ist, da lokale Eigenschaften (Textur, Elastizität, Material, etc.) unter Umständen eine Neubetrachtung der Greifsituation nötig machen (BIERBAUM 2012).

### Prozess

Der grundsätzliche Prozess des Handhabens eines Objektes lässt sich nach HÖRMANN & HÖRMANN (1990), wie in *Abbildung 2-11* aufgezeigt, in drei Phasen unterteilen.



*Abbildung 2-11: Basisabfolge einer Handhabungsoperation nach HÖRMANN & HÖRMANN (1990)*

Ausgehend von dieser Grundabfolge werden Greifer für verschiedenste Aufgaben eingesetzt. Die Spannweite reicht dabei von einfachen Pick-and-Place-Aufgaben, bei welchen das Handhabungsgerät ein Objekt aufnimmt und an einem anderen Platz wieder ablegt, bis hin zu komplexen Montageoperationen, bei welchen der Greifer die entstehenden Montagekräfte aufnehmen muss sowie spanende Prozesse, bei denen das Handhabungsobjekt während des Handhabens bearbeitet wird. Wie zu erkennen ist, ergeben sich durch den Prozess eine ganze Reihe von Randbedingungen, welche bei der Auslegung und Auswahl eines Greifers zu beachten sind. Die Randbedingungen werden jedoch auch von anderen Domänen des Handhabungssystems beeinflusst. Die Domäne *Prozess* kann entsprechend als Bindeglied zwischen den anderen Domänen verstanden werden. Beispiele hierfür sind die Beschleunigungen während des Prozesses durch das Handhabungsgerät, die Prozesssicherheit, benötigte Prozesskräfte, Umorientie-

rung des Objektes während des Prozesses, Zugänglichkeit des Handhabungsobjektes oder auch die Taktzeit (FELDMANN ET AL. 2014, WOLF & STEINMANN 2004, SCHMALZ ET AL. 2015).

Die Zykluszeit ist die zentrale Bewertungsgröße eines Handhabungsprozesses, da sie zum einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses hat, zum anderen aber von einigen Systemeigenschaften beeinflusst wird. Diese sind neben der Masse des Greifobjektes und des Greifers die verfügbaren Beschleunigungen des Handhabungsgerätes.

Um eine hohe Stabilität und Genauigkeit eines Greifprozesses zu erreichen, sollte ein besonderes Augenmerk auf die Zuführung und Bereitstellung der Handhabungsobjekte gelegt werden. Zwar ist es möglich, durch Sensorik sowie eine entsprechende Auslegung (ELLEKILDE & PETERSEN 2006) des Greifers Ungenauigkeiten (bei der Aufnahme) des Handhabungsobjektes auszugleichen, eine geordnete und einheitliche Zuführung ist jedoch zu bevorzugen (FELDMANN ET AL. 2014). Grundsätzlich kann sowohl die Zuführung als auch die Ablage von Handhabungsobjekten geordnet, ungeordnet oder als Einzelstück erfolgen (WOLF & STEINMANN 2004). Es gilt zu beachten, dass durch die gewählte Zuführ- und Ablagestrategie unter Umständen Einschränkungen bezüglich der möglichen Greifpositionen entstehen.

### Umwelt

Eine bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen oft vernachlässigte Domäne ist die Umwelt, in die das Handhabungssystem eingebettet ist. Es handelt sich somit um externe Einflussgrößen, welche die Funktionsfähigkeit des Greifersystems beeinflussen. Neben der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit (vgl. SCHMITT 2015) und der Atmosphäre, in der das Greifersystem eingesetzt werden soll, gilt es den Verschmutzungsgrad der Umgebung zu beachten. Dieser kann sich auf alle Elemente des Handhabungssystems auswirken und somit zu starken Veränderungen hinsichtlich der Randbedingungen führen (Veränderung von Reibkoeffizienten, Lebensdauer des Greifers, etc.) (FELDMANN ET AL. 2014, SCHMALZ ET AL. 2015).

Wichtige Anwendungsbereiche von Greifersystemen mit besonderen Anforderungen, sind die Handhabung von Lebensmitteln, Reinraumumgebungen, explosionsgefährdete Umgebungen sowie Umgebungen mit extremen Temperaturen oder hohem Verschmutzungsgrad. Bezogen auf die technische Umsetzung von Greifern gilt es neben geeigneten Materialien auch auf weitere Spezifika zu ach-

ten. So sollte in sauberen Umgebungen auf hydraulische und in explosionsgefährdeten Bereichen auf elektrische Antriebe verzichtet werden (PEDRAZZOLI ET AL. 2001). In korrosiven oder sehr heißen Umgebungen sollten pneumatische Antriebe verwendet werden (PEDRAZZOLI ET AL. 2001).

Neben der Möglichkeit der Beschädigung eines Greifers durch Verschmutzung sollte beachtet werden, dass entsprechende Stoffe auf der Oberfläche des Handhabungsobjektes oder der Wirkelemente des Greifers das Greifen deutlich erschweren können. Insbesondere bei Stoffen, welche den Reibkoeffizienten zwischen Handhabungsobjekt und Wirkelementen beeinflussen, muss dies bereits bei der Greifkraftberechnung beachtet werden, um einen sicheren Griff zu garantieren. Wie *Tabelle 2-2* zeigt, kann beispielsweise bei einer Verunreinigung mit Schmiermitteln der Reibungskoeffizient bis zur Hälfte reduziert werden.

Tabelle 2-2: Beispielhafte Haftreibungskoeffizienten (WOLF ET AL. 2016)

Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl	
	trocken	geschmiert
Stahl auf Gusseisen	0,2	0,15
Stahl auf Stahl	0,2	0,1
Stahl auf Polyamid	0,3	0,15
Stahl auf Reibbelag	0,6	0,3

Insbesondere für Vakuumgreifer ist die genaue Spezifikation der Umgebung unerlässlich, da die für die Wirkelemente (Sauger) verwendeten Materialien (vgl. *Tabelle 2-3*) sehr sensibel auf entsprechende Einwirkungen reagieren und somit schon bei der Auslegung und Auswahl beachtet werden müssen. Bei einer falschen Wahl können sich die Eigenschaften der Sauger verändern, sodass Reibungskoeffizienten und Elastizitäts-Module nicht mehr mit den für die (Greifkraft-) Berechnungen angenommenen Werten übereinstimmen und somit ein sicherer Griff nicht mehr gewährleistet ist (BECKER 1993). Um eine gute Abdichtung und somit eine sichere Kraftübertragung zwischen Dichtlippe und Kontaktfläche zu erreichen, sollten die verwendeten Elastomere eine geringe Härte sowie eine hohe Elastizität gewährleisten. Dies kann insbesondere bei niedrigen Temperaturen problematisch sein (BRAUN 1989).

Tabelle 2-3: Materialübersicht für Vakuumsauger (HESSE 2004)

Materialart	Temperatur in °C	Verschleißfestigkeit	Beständigkeit gegen Öl und Fett	Beständigkeit gegen Wetter, Ozon	Bemerkungen
Nitrilkautschuk	-40 bis 70	gut	sehr gut	genügend	kälteflexibel, wasserbeständig bis 70 °C
Silikonkautschuk	-70 bis 200	genügend	gut	sehr gut	abdruckarm wenn farblos, weiß, beige
Naturkautschuk	-40 bis 80	sehr gut	nicht empfohlen	genügend	hohe Standzeit, abdruckarm wenn farblos
Polyurethan	-25 bis 80	sehr gut	sehr gut	sehr gut	hohe Standzeit, sehr abdruckarm
Fluorkautschuk	-20 bis 200	gut	sehr gut	sehr gut	hoch chemikalienbeständig, sehr abdruckarm
Chloropren	-40 bis 90	sehr gut	gut	gut	besonders witterungsbeständig
Polyvinylchlorid	-20 bis 85	sehr gut	genügend	genügend	sehr hohe Standzeit
Äthylen-/Propylen-/Dien-Kautschuk	-40 bis 130	genügend	genügend	sehr gut	heißdampf- und chemikalienbeständig

Da die Kraftübertragung bei Vakuumgreifern auf der Druckdifferenz zwischen Sauger und Umgebungsatmosphäre beruht, muss der Einfluss von unterschiedlichen Umgebungsdrücken bei der Auslegung und Auswahl beachtet werden. Somit muss der Verlust an Tragkraft für einen Einsatz oberhalb von Meereshöhe mit eingerechnet werden.

Neben den beschriebenen, sehr spezifischen Faktoren gilt es zudem noch auf generelle Aspekte der Umwelt zu achten. Der Greifer muss so gestaltet sein, dass er an eventuell vorgegebene geometrische Bedingungen der Umgebung, wie Hindernisse, angepasst ist (RÖHRDANZ 1997). Außerdem ist zu beachten, welche und in welcher Form Medien sowie deren Schnittstellen in der Umgebung zur Versorgung des Handhabungssystems vorliegen. Ein Beispiel dafür ist der maximal verfügbare Druck und der Anschluss des externen Druckluftsystems.

### Greifersystem

Bei der Gestaltung und Auslegung der Wirkelemente ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Anpassung von Greifern an ein spezifisches Handhabungsobjekt. Wichtige Parameter von Greifersystemen sind deren Art, ihr Gewicht, die

zu erzielende Greifkraft, die Art der Energiebereitstellung und nicht zuletzt die Kosten für die Realisierung des Handhabungssystems.

Bezüglich der Wirkelemente gilt es zu beachten, dass die Materialauswahl starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Auslegung des Greifersystems hat. So ist der erzielbare Reibungskoeffizient neben der Oberfläche des Handhabungsobjektes von der Materialart und -güte der Wirkelemente abhängig (WOLF & STEINMANN 2004). Beispiele für Reibkoeffizienten von Materialpaarungen für mechanische Greifer finden sich in Tabelle 2-2. Des Weiteren sollte geprüft werden, inwieweit die für die Wirkelemente gewählten Materialien in der geplanten Dimension den zu erwartenden Kräften standhalten, um sicherzustellen, dass auch die gewünschte Kontaktart zwischen Handhabungsobjekt und Wirkelement zustande kommt bzw. ein sicherer Griff gewährleistet werden kann (HESSE 2004).

Eine wichtiger Faktor der die Zykluszeit und somit die Wirtschaftlichkeit eines Prozesses beeinflusst, ist die Zeit, welche benötigt wird, um die Kraftübertragung zwischen Handhabungsobjekt und Greifer herzustellen sowie wieder zu lösen (vgl. Domäne *Prozess*). Bei mechanischen Greifern wird diese Zeit durch die Schließ- und Öffnungszeit der Backen bestimmt, bei Vakuumgreifern über die Evakuierungszeit (MONKMAN ET AL. 2007).

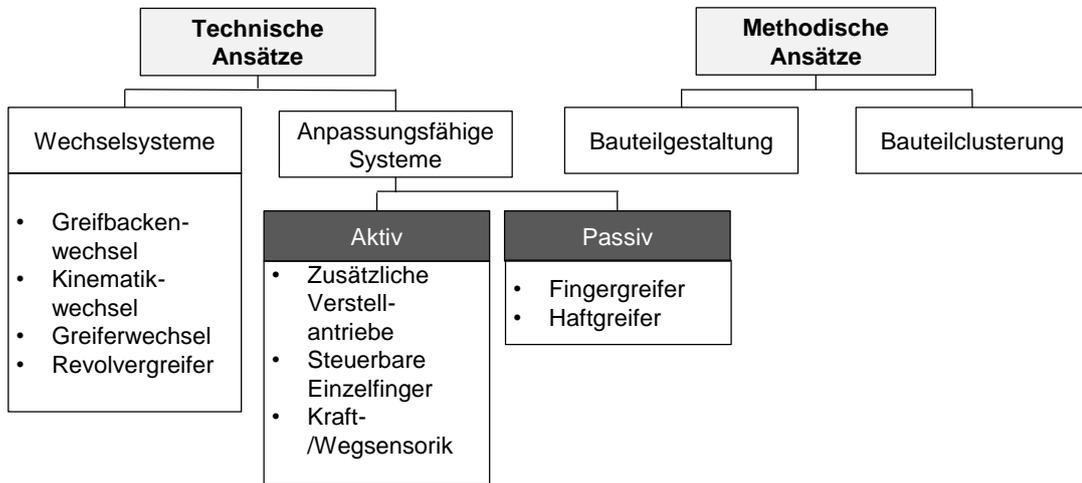
### **2.1.4 Flexibilisierung von Greifersystemen**

Die Flexibilität eines Greifersystems kann nach MONKMAN ET AL. (2007) als die Bandbreite von Aufgaben definiert werden, die ein Greifer übernehmen kann ohne hardwareseitig verändert werden zu müssen.

Nach CARDAUN (1981) haben folgende Faktoren einen Einfluss auf die Flexibilität eines Greifersystems:

- Veränderung der Werkstückgeometrie (Form und Größe)
- Veränderung der Zugriffsart und Zugriffsräume
- Veränderung der Handhabungsgewichte
- Änderung der Taktzeit
- Losgröße
- Umrüsthäufigkeit
- Umrüstdauer

In der Praxis existieren eine Reihe von technischen Strategien zur Steigerung der Flexibilität von Greifersystemen. Diese lassen sich in zwei Stoßrichtungen zusammenfassen (ZUMBRÄGEL 1990). Zum einen durch die Verwendung von Wechselsystemen, zum anderen durch die Schaffung von anpassungsfähigen Greifern. Des Weiteren bestehen methodische Strategien, welche nicht auf die Flexibilisierung des Greifers an sich, sondern auf eine Anpassung der Rahmenbedingungen, ausgehend vom Handhabungsobjekt, abzielen. Dazu zählt die gezielte Anbringung von spezifischen gleichartigen Handhabungsmerkmalen an verschiedenen Objekten im Rahmen der Produktgestaltung (HEGINBOTHAM 1984) sowie die Gruppierung von Handhabungsobjekten mit ähnlichen Handhabungseigenschaften (PHAM & YEO 1991) (vgl. *Abbildung 2-12*).



*Abbildung 2-12: Strategien der Flexibilisierung von Greifersystemen in Anlehnung an ZUMBRÄGEL (1990)*

Greiferwechselsysteme bestehen aus einer definierten Flanschschnittstelle zwischen Handhabungsgerät und Greifer, um neben den Kraftübertragungselementen alle vom Effektor benötigten Medien wie Elektrizität, Druckluft etc. sehr schnell an- bzw. abkoppeln zu können (VDI 2740). Der Verriegelungs- bzw. Lösevorgang geschieht meist automatisch (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998). Weitere Wechselmöglichkeiten sind ein Greiferbackenwechsel oder ein Greiferkinematikwechsel bei mechanischen Greifern sowie Revolvergreifer (SEEGRÄBER 1993) bzw. Mischformen (vgl. MADWED 1985). Ein reiner Wechsel von Greiferteilen, wie beispielsweise der Backen, ist nur bei verhältnismäßig kleinen Änderungen am Handhabungsobjekt möglich. Größere Änderungen, beispielsweise am Gewicht oder den Abmessungen, machen in den meisten Fällen einen Wechsel des ganzen Greifers nötig (BAUER 2002).

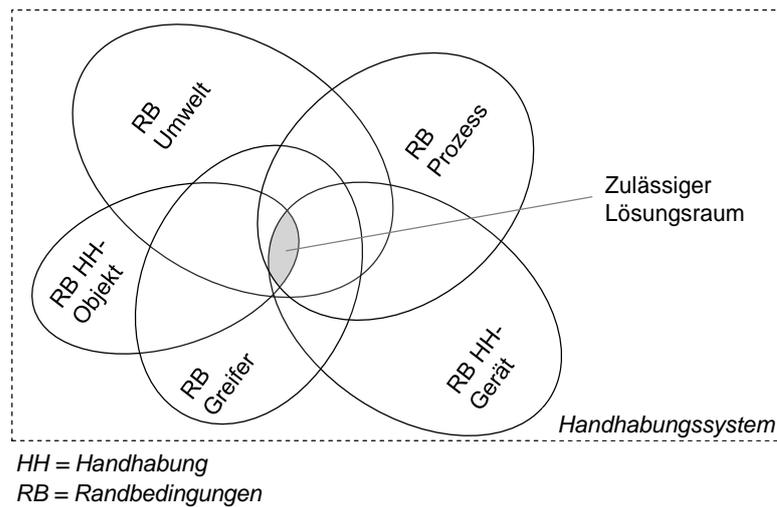
Neben dem Vorteil ein breites Spektrum an Handhabungsobjekten greifen zu können, ergibt sich durch die Verwendung von Wechselsystemen die Möglichkeit auch andere Werkzeuge/Effektoren anzukoppeln. Dies ist insbesondere im Bereich der Montagetechnik von Bedeutung, da so die Flexibilität eines Handhabungsgerätes, wie beispielsweise eines Roboters, voll ausgenutzt werden kann. Nachteilig ist zum einen der große technische Aufwand, der für die Schnittstelle betrieben werden muss, zum anderen der Zeitbedarf für den nicht-wertschöpfenden Wechsellvorgang sowie der Platz welcher für die nicht benutzten Greifer vorgehalten werden muss (BARTENSCHLAGER ET AL. 1998).

Die genannten Nachteile sind der Grund, die zweite Stoßrichtung (anpassungsfähige Greifer) der Greiferflexibilisierung einzusetzen. Nach CAUSEY & QUINN (1998) sollte ein Greifertausch wann immer möglich vermieden werden. Dementsprechend ist das Spektrum anpassungsfähiger Greifer sehr groß. Ihre Gemeinsamkeit besteht darin, einzelne Komponenten des Greifers gezielt ansteuern bzw. teilweise sogar situationsangepasst regeln zu können und so, beispielsweise durch Veränderung der Greifkraft oder Wirkelementgeometrie (WEISSER 1979), eine Anpassung an das jeweilige Handhabungsobjekt herzustellen (BAUER 2002). Technisch reicht die Umsetzung dabei von einfachen kraftgeregelten Greifern TRACHT ET AL. (2013) über sich anpassende (Granulat-) Greifer (vgl. TELLA ET AL. (1982), DRÖDER ET AL. (2016), AMEND ET AL. (2012), CHOI & KOÇ (2006), WARNECKE & SCHMIDT (1980), RIEDEL ET AL. (2008), SCOTT (1985), FELSCH & HERKER (2010)), Vakuumflächengreifer (vgl. STRASSER (2012), SCHOLZ-REITER ET AL. (2008)), „Softrobotic“ Greifer (vgl. BOGUE (2016), RUS & TOLLEY (2015)) bis hin zu anthropomorphen Händen (vgl. GREBENSTEIN (2012), CONTROZZI ET AL. (2014)). Während die ersten genannten Lösungen bereits in der Industrie Verwendung finden, sind die Softrobotic Greifer aufgrund ihres frühen Entwicklungsstadiums (vgl. AMEND ET AL. (2016)) bzw. die Roboterhände aufgrund ihrer hohen Kosten (WOLF & STEINMANN 2004), Komplexität (BICCHI 2000) und hohen Störanfälligkeit (RÖHRDANZ 1997) noch kaum im industriellen Einsatz. Bereits 1995 wurde mit dem sogenannten RISC (engl.: Reduced Intricacy in Sensing and Control) Robotic Paradigma vorgeschlagen, anstatt komplexer Greiferhände mehrere einfache Greifer mit entsprechender Sensorik sowie Software zu einem in Summe flexiblen System zu kombinieren (CANNY & GOLDBERG 1995). Ähnlich dazu ist die Arbeit von BERGELIN ET AL. (2011), welche dafür plädieren die Freiheitsgrade einer Greiferlösung so niedrig wie möglich zu wählen.

Technisch möglich ist außerdem der simultane Einsatz mehrerer Greifer an einem Handhabungsgerät, was jedoch große Einschränkungen bezüglich der Resttragkraft des Gesamtsystems bedeutet (PHAM & YEO 1991).

## 2.2 Methoden zur Greiferauslegung und -auswahl

Entsprechend der Definition der Auswahl im *Glossar* ist die Zielstellung der Greiferauswahl für eine spezifische Handhabungsaufgabe aus einer Menge von möglichen Greiferlösungen die bestgeeignete auszuwählen. Die Greiferauslegung dient, wie in *Abbildung 2-13* visualisiert, dazu, unter Betrachtung der geforderten Rahmenbedingungen, die Menge an möglichen Greiferlösungen zu definieren. Wichtige Hilfsmittel für die Auslegung stellen die Greifpositionsbestimmung, die Dimensionierung der Wirkelemente sowie die Greifkraftberechnung dar.



*Abbildung 2-13: Abstrahierte Einordnung der Greiferauslegung in Anlehnung an CUTKOSKY (1989)*

Aufgrund der Komplexität des Prozesses der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen, wurde dafür in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Ansätzen zur Unterstützung entwickelt. Die vorhandenen Lösungen haben dabei eine große Bandbreite bezüglich des Detaillierungs- sowie des Automatisierungsgrades.

### 2.2.1 Manuelle Methoden der Greiferauslegung und -auswahl

Obwohl es in der Forschung bereits diverse Ansätze zur automatisierten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen gibt, wird in der industriellen Anwendung hauptsächlich noch mit manuellen Vorgehensweisen gearbeitet. Meist han-

delt es sich dabei um Graphen, welche dem Anwender aufeinanderfolgende, definierte Schritte vorschlagen, um somit einen geeigneten Greifer auswählen und auslegen zu können. Die Entscheidungsfindung in den einzelnen Vorgehensschritten wird dabei teilweise durch zusätzliche Tabellen (vgl. HESSE 2004), Fragenkataloge oder Checklisten unterstützt. Beispiele dafür sind die Vorgehensweisen nach FELDMANN ET AL. (2014), WOLF & STEINMANN (2004), HESSE (2011), SEEGRÄBER (1993) sowie WARNECKE & SCHRAFT (1984), SEVERIN (1987) und SIEMENS (1983). Gemeinsamkeit dieser Vorgehensweisen ist die Vermischung von Auslegung und Auswahl, Unterschiede zeigen sich insbesondere darin, wie tief auf die eigentliche Auslegung eingegangen wird.

Für eine komplette Neuentwicklung von Greifern schlagen FANTONI ET AL. (2012) vor, ausgehend von einer Funktionsanalyse Analogien zur Lösungsfindung zu nutzen. Eine Vorgehensweise für die Definition des Pflichtenheftes eines Greifers gibt die VDI 2740. BOUBEKRI & NAGARAJ (1993) teilen Handhabungsobjekte bezüglich der Schwierigkeit sie zu greifen in drei Klassen ein und geben davon ausgehend Empfehlungen für den zu wählenden Greifer. Grundsätzliche Faktoren, welche bei der Auswahl von mechanischen Greifern sowie Vakuum- und Magnetgreifern in Betracht gezogen werden sollten, finden sich in PHAM & YEO (1988B).

Des Weiteren existieren einige manuelle Vorgehensweisen, welche sich (neben den oben genannten Standardwerken) mit der Auslegung von spezifischen Greifern beschäftigen. CHEN (1982) beschreibt wichtige Faktoren bei der Auslegung von mechanischen Greifern und geht auf verschiedene Kinematiken ein. WALSH (1984) weist auf grundsätzliche Rahmenbedingungen der Greiferauslegung bzw. -konstruktion hin. CAUSEY & QUINN (1998) bzw. CAUSEY (1999) stellt einen umfangreichen Leitfaden auf, wie mechanische Greifer hinsichtlich bestimmter Zielgrößen gestaltet werden sollten. Bezüglich der Oberflächengestaltung von Backen mechanischer Greifer führten GUO ET AL. (2017) umfangreiche Versuchsreihen durch. Die Optimierung der Steuerung und Regelung servopneumatischer mechanischer Greifer wird von ZUMBRÄGEL (1990) betrachtet. Verschiedene Arten von Greifbackenformen und deren Eigenschaften beschreibt SCHWEIGERT (1992). GRUBBA (2002) beschreibt einen Ablauf zur Dimensionierung von Vakuumgreifern für Hohlkörper. BRAUN (1989) bzw. BECKER (1993) untersuchen das Verhalten von Vakuumgreifern bei biegesteifen Handhabungsobjekten. GÖTZ (1991), BÖGER (1997), STEPHAN & SELIGER (1999) und STRASSER (2012) untersuchen die Handhabung biegeschlaffer Handhabungsobjekte. REINHART & KURFER (2011) sowie FLEISCHER ET AL. (2013) beschreiben

Vorgehen zur Bewertung und Auswahl von Greifertechnologien für die Batterie-fertigung.

### 2.2.2 Automatisierte Methoden der Greiferauswahl

Aufgrund der Komplexität und der großen Menge an zu beachtenden Faktoren bei der Greiferauswahl ist es ein logischer Schritt, diesen Vorgang mittels Datenverarbeitung zu unterstützen. Bereits seit geraumer Zeit beschäftigen sich Forscher mit dieser Aufgabenstellung. Etliche der Ansätze sind dabei als Expertensystem aufgebaut. Unter diese Kategorie fallen die Arbeiten von DOLL & HUBER (1988), MÜLLER (1997), PHAM & YEO (1988A), PHAM & TACGIN (1991B), PHAM & TACGIN (1992B), FANTONI ET AL. (2014A), PEDRAZZOLI ET AL. (2001), MOULIANITIS ET AL. (1999) sowie MOULIANITIS ET AL. (2000).

Das von DOLL & HUBER (1988) entwickelte System „ROKON.1“ dient der Auswahl und Konfiguration von Sensorgreifern. Basierend auf Ansätzen zur Sensorauswahl und Greiferauswahl wurde ein Expertensystem entwickelt, das neben mechanischen Greifern auch Magnetgreifer, Vakuumgreifer sowie Balkengreifer umfasst. Die Datenerfassung erfolgt durch einen Fragebogen, welcher anschließend ins System eingelesen wird. Die daraus entstehende Leistungscharakteristik wird mit Produktkomponenten abgeglichen und geeignete Komponenten konfiguriert. Die gefundenen Lösungen werden anschließend technisch, wirtschaftlich und organisatorisch bewertet.

Das Expertensystem GRIPS von MÜLLER (1997) besitzt als Grundlage eine Klassifizierung von Greifern sowie eine systematische Strukturierung von Greifaufgaben. Darauf aufbauend werden dem Anwender nach Durchlaufen des Programms geeignete Greifer aus einer Greiferdatenbank genannt, welche dann händisch ausgelegt werden müssen. Das System unterstützt mechanische Greifer, Vakuum- und Magnetgreifer sowie Verhakungs- und Adhäsionsgreifer. Neben der Auswahl eines Greifers aus einem Greiferkatalog bietet das Programm außerdem die Möglichkeit, Greifer anhand eines bekannten Anforderungsprofils auszuwählen sowie sich geeignete Greiferarten und Greifer für eine spezifische Handhabungsaufgabe ausgeben zu lassen.

Seit Anfang der 1990er Jahre beschäftigt sich die Forschergruppe um Professor Duc Truong Pham mit Ansätzen zu Expertensystemen für die Greiferauswahl. Ausgehend von einem ersten Expertensystem (PHAM & YEO 1988A) wurden weitere verbesserte Systeme beschrieben: PHAM & TACGIN (1991B), PHAM &

TACGIN (1992A) sowie PHAM & TACGIN (1992B). Ausgehend von der Bewertung der Greifflächen von Handhabungsobjekten (PHAM & YEO 1988A) bieten DBGRIP (PHAM & TACGIN 1991B) sowie Grippex (PHAM & TACGIN 1992B) bereits die Möglichkeit, kommerziell verfügbare Greifer (Klemmgreifer, flexible Greifer, Einzelflächengreifer) auszuwählen. Die Auswahl erfolgt dabei zweistufig: In einem ersten Schritt werden lösungsneutral Greiferlösungen gewählt, welche dann in einem zweiten Schritt mit kommerziellen Greifern abgeglichen werden. Des Weiteren sind DBGRIP und Grippex in der Lage, mittels Bewertung der vom System getroffenen Entscheidungen durch den Nutzer zu lernen und sich somit immer weiter zu verbessern.

FANTONI ET AL. (2014A) verwenden Nutzereingaben, um mittels Parametern das Handhabungsobjekt sowie den Handhabungsprozess zu beschreiben. Basierend auf dieser Eingabe spricht das System Ausschlüsse, Warnungen und Hinweise aus. Mögliche Lösungen sind nur gültig, wenn sie sowohl ein Greifen als auch ein Lösen des Handhabungsobjektes erlauben. Die zulässigen Lösungen werden mit den oben generierten Warnungen, Hinweisen sowie Anforderungen an die Umwelt und den Greifer ausgegeben, sodass ein Abgleich mit der Greiferdatenbank möglich ist.

Ein regelbasierter Ansatz, welcher insbesondere die Gestaltung der Wirkelemente mit einbezieht, ist das Expertensystem von PEDRAZZOLI ET AL. (2001). Auf einem Handhabungsobjekt werden Greifpositionen bestimmt und diese anschließend einer oder mehreren von vier Greiferbackengeometrien zugeordnet. Die Greiferbackengeometrien werden daraufhin dimensioniert und die Backen passenden Greifern zugewiesen. Das System unterstützt Parallelgreifer, Winkelgreifer sowie Dreifingergreifer. Ausgehend vom gewählten Greifer erfolgt eine Berechnung der benötigten Greifkraft. Ist die nötige Greifkraft erreicht, ohne die zulässige Greifkraft zu überschreiten, der nötige Hub vorhanden sowie die zulässige Nutzlast des Roboters durch das Gewicht von Greifer und Handhabungsobjekt nicht überschritten, so ist die gewählte Lösung gültig. Abschließend wird definiert, welche Antriebsart für den Greifer die bestgeeignete ist.

Für spezifische Materialien wurden die Expertensysteme zur Greiferauswahl von MOULIANITIS ET AL. (1999) (Textilien) sowie MOULIANITITS ET AL. (2000) (Polyurethanschaum) entwickelt.

Neben den beschriebenen Expertensystemen gibt es noch eine Reihe weiterer Ansätze für die automatisierte Greiferauswahl.

AGRAWAL ET AL. (1991) nutzen für die Greiferauswahl einen multiattributiven Entscheidungsansatz namens „TOPSIS“, der bereits in früheren Veröffentlichungen für die Roboterwahl eingesetzt wurde. Die Beschreibung der Greifer erfolgt mittels eines Codierungssystems, welches mit spezifischen Attributen verbunden ist. Das Verfahren bewertet die Greifer entsprechend ihrer Eignung für die gewünschte Anwendung und erstellt darauf basierend ein Ranking (AGRAWAL ET AL. 1992). Ebenfalls unter Verwendung eines Kodierungssystems prüft das System von BOUBEKRI & RAMANUJAM (1995) die Handhabbarkeit von Objekten mittels mechanischen sowie Sauggreifern.

Die Systematisierung bei gleichzeitiger Flexibilisierung von Greifersystemen schlägt CARDAUN (1981) in einer fünf-schrittigen rechnergestützten Methode vor. Ausgehend von einer Abgrenzung des Handhabungsobjekt-Spektrums werden die greiftechnisch relevanten Daten ermittelt. Daraus erfolgt eine Zuordnung von Werkstücken zu Greiferprinzipien. Anschließend werden Werkstückgruppen innerhalb der Greiferprinzipien gebildet. Mit der Zusammenstellung von Auslegungsdaten für die benötigten Greifertypen wird das Vorgehen abgeschlossen.

Basierend auf einer Ähnlichkeitsanalyse von Handhabungsobjekt und Greifer automatisiert die Methode von KUMICÁKOVÁ (2009) den Auswahlprozess. Die Kennwerte der Ähnlichkeiten werden mittels Clusteranalysen ausgewertet, um so bestmögliche Lösungen zu finden.

Greiferhersteller bieten eine Reihe von Lösungen an, welche bei der Auswahl eines geeigneten Greifers unterstützen sollen. Die Greifaufgabe wird dabei mittels Parametern zu Prozess, Handhabungsobjekt, Handhabungsprozess und Umgebung erfasst (vgl. FESTO 2017; SCHUNK 2017, SCHMALZ 2017), welche dann mit dem Produktportfolio des jeweiligen Herstellers abgeglichen werden.

### **2.2.3 Automatisierte Methoden der Greiferauslegung**

Für die Auslegung von mechanischen Greifern liegt im Gegensatz zu Vakuumgreifern eine Vielzahl von Ansätzen vor. Einen guten Überblick zu Vorgehensweisen, insbesondere für die automatisierte Gestaltung von Backen für mechanische Greifer, bietet die Arbeit von HONARPARDAZ ET AL. (2017).

Ansätze zur Optimierung der Greifermechanik bzw. Kinematik von mechanischen Greifern mittels genetischer Algorithmen werden von KRENICH (2004) beschrieben. Eine ähnliche Zielstellung verfolgen LANNI & CECCARELLI (2009)

sowie DATTA & DEB (2011) unter Verwendung von Mehrziel-Entscheidungs-Algorithmen. ERDMAN ET AL. (1988) schlagen die Verwendung eines Expertensystems zur Auslegung von Greiferkinematiken vor. Weitere Untersuchungen zur Auslegung von Greifermechaniken finden sich in GORCE & FONTAINE (1996) sowie CUADRADO ET AL. (2002).

Ein Modell zur rechnergestützten Greifbackenauslegung für zylindrische Handhabungsobjekte und Winkelgreifer beschreiben PHAM & YEO (1985). Mittels einer dynamischen Greifsimulation haben WOLNIAKOWSKI ET AL. (2015) ein System zur Auslegung von Greifbacken für Parallelgreifer entwickelt. Auf Basis der Eingabe von Parametern zu Greifertyp, Objekt und Greifkontext optimiert der Algorithmus sowohl Greiferbacken als auch Greifparameter hinsichtlich sechs Zielgrößen (WOLNIAKOWSKI ET AL. 2015). Ebenfalls simulationsbasiert ist der Ansatz von ELLEKILDE & PETERSEN (2006). Im Zentrum der Betrachtungen steht dabei, wie Handhabungsobjekte durch entsprechende Auslegung der Greiferbacken von Parallelgeifern ausgerichtet werden können, um eventuelle Ungenauigkeiten bei der Objektaufnahme ausgleichen zu können (ELLEKILDE & PETERSEN 2006).

Ein Expertensystem für die Generierung von Kontaktkonfigurationen von Greiferbacken beschreiben PHAM & TACGIN (1991A). Unter Verwendung von 200 Regeln schlägt das System Backendesigns mit verschiedenen Kontaktarten vor. Ebenfalls mittels eines Expertensystems unterstützt der Ansatz von GOURASHI (2003) bei der Auslegung von Backen für mechanische Greifer.

Eine Lösung für die automatisierte Bestimmung der Abmaße von Greifbacken eines Parallelgreifers mit drei zylindrischen Backen schlagen BALAN & BONE (2003) vor. Ähnlich dazu, jedoch mit vier Greifbacken, ist der Ansatz von BROWN & BROST (1999). Eine Lösung zur Auslegung von Greifbacken ist, eine Negativform des Handhabungsobjektes herzustellen und darüber einen Formschluss zu erzeugen. Dieser Ansatz wird von VELASCO (1997) automatisiert. Die Besonderheit der Lösung liegt darin, dass auch mehrere Handhabungsobjekte abgeformt und für eine Backe zusammengefasst werden können. Für die automatisierte Auslegung von Backen für mehrere Handhabungsobjekte wurde die Vorgehensweise von HONARPARDAZ ET AL. (2016B) entwickelt, welche jedoch keine Greifkräfte berücksichtigt.

Insbesondere für mechanische Greifer lassen sich Ähnlichkeiten zwischen der Auslegung von Greifersystemen sowie Spannsystemen herleiten. Einen guten

Überblick über den Stand der Technik der rechnergestützten Spannsystemauslegung bieten die Werke von BOYLE ET AL. (2011) und HASHEMI ET AL. (2014).

### 2.2.4 Rechnergestützte Konfiguration und Auslegung

Das Ziel der zu entwickelnden Methode ist die Konstruktion fertiger Greifer bzw. Wirkelemente. Daher stellt die automatisierte Generierung von CAD-Daten, basierend auf zuvor bestimmten Eingangsparametern, einen wichtigen Baustein dar. Die Gemeinsamkeit dieser Systeme zur rechnergestützten Konfiguration und Auslegung besteht darin, dass händisch durchgeführte Änderungen am Produkt durch softwaretechnische Lösungen vereinfacht oder sogar ganz automatisiert werden (KOLLER 1998). Die zunehmende Individualisierung von Produkten macht entsprechende Lösungen immer wichtiger. Im Folgenden soll auf bestehende (wissenschaftliche) Ansätze eingegangen werden.

Die Gliederung entsprechender Softwarelösungen kann anhand der Einordnung bezüglich des Anteils an Konstruktions- bzw. Konfigurationsprozessen vorgenommen werden (vgl. *Abbildung 2-14*). Konstruktive Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass der Fokus auf der Gestaltfindung des Produktes liegt, während bei Konfigurationsprozessen eine Lösung aus vorbestimmten Elementen synthetisiert wird.

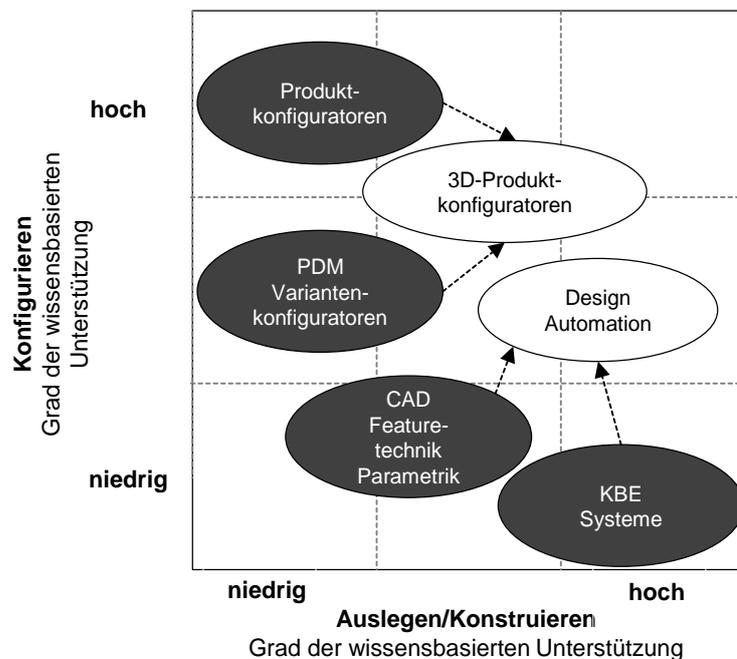


Abbildung 2-14: Einordnung von Lösungen zur rechnergestützten Konfiguration und Auslegung (LUTZ 2012)

Aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenproduktion kommend, sind Produktkonfiguratoren heute inzwischen allgegenwärtig. Bestehende Mankos hinsichtlich mangelnder Flexibilität dieser Systeme werden durch die aktuell aufkommenden 3-D Produktkonfiguratoren adressiert. Dabei kommen auch Elemente zum Einsatz, welche bereits in Produktdatenmanagement (PDM)-Systemen verwendet werden. Dagegen werden Systeme, die einen hohen Grad an Gestaltungsfreiheit bieten, unter dem Term „Knowledge-based engineering (KBE)“ zusammengefasst. Die Integration dieser Systeme in bestehende CAD-Systeme wird als Design Automation bezeichnet. (LUTZ 2012).

Zur Steigerung von Leistungsfähigkeit und Funktionalität der beschriebenen Systeme beschäftigen sich diverse Forschergruppen mit Ansätzen, den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess durch den Einsatz von Rechnern zu unterstützen. Einen guten Überblick zu diesen Ansätzen bietet die Arbeit von CHAKRABARTI ET AL. (2011).

Ein Beispiel für die Anwendung von parametrischer Modellierung in der Greiftechnik stellt der von BREUNINGER ET AL. (2013) beschriebene additiv gefertigte Kunststoffgreifer dar, welcher mittels Konstruktionstabellen an das jeweilige Anwendungsszenario angepasst werden kann. Für mechanische Greifer existiert das Tool „egrip“ der Firma Schunk, bei welchem CAD-Daten eines Handhabungsobjektes hochgeladen werden können, um darauf basierend (formschlüssige) Greiferbacken auszulegen (NAGEL ET AL. 2016).

### **2.3 Methoden zur Greifpositionsbestimmung**

Unter Greifpositionsbestimmung versteht man die Suche nach Geometrien, sogenannten Greifmerkmalen, an einem Handhabungsobjekt, welche passend sind das Objekt sicher mit einem spezifischen Greifer bzw. spezifischen Wirkelementen handhaben zu können. Die Bestimmung kann sowohl online als auch offline erfolgen. Des Weiteren kann unterschieden werden, bis zu welchem Grad die Geometrie des untersuchten Handhabungsobjektes bereits definiert ist oder diese erst noch generiert werden muss. Der Begriff der Greifplanung wird teilweise synonym verwendet und beinhaltet darüber hinaus oft Aspekte der Roboterbahnplanung, wie beispielsweise das kollisionsfreie Anfahren der Greifposition, oder die Berücksichtigung von auftretenden Kräften und Versagensfällen. Innerhalb der Greifplanung wird zwischen geometrischen und mechanischen Ansätzen unterschieden (WEEKS 1997). Geometrische Ansätze zielen rein darauf ab, geeigne-

te geometrische Charakteristika am Objekt zu finden, mechanische Ansätze untersuchen zusätzlich noch die dabei möglichen Versagensfälle des Griffes.

Im Folgenden sollen insbesondere Verfahren der geometrischen Greifplanung betrachtet werden, da sich *Abschnitt 2.4* Themen widmet, welche der mechanischen Greifplanung zugeordnet werden. Des Weiteren verschwimmen die Grenzen zwischen mechanischer und geometrischer Greifplanung, sodass hier oft keine genaue Abgrenzung mehr möglich ist.

Die Forschung zu Methoden der Greifpositionsbestimmung bzw. Greifplanung wird seit geraumer Zeit von den anthropomorphen Händen bestimmt, welche aufgrund ihrer großen Anzahl an Freiheitsgraden ungleich komplexer als Standard-Industriegreifer sind. Einzelne Ergebnisse aus der Handforschung sind auf den hier betrachteten Anwendungsfall übertragbar, gehen jedoch meist über das hinaus, was für die Auslegung und Auswahl von den hier behandelten Systemen benötigt wird. So wird beispielsweise in vielen aktuellen Arbeiten angenommen, dass die Handhabungsobjekte unbekannt sind. Im industriellen Umfeld ist dies als eher unwahrscheinlich anzusehen. Ein guter Überblick der aktuellen Forschung findet sich in SAHBANI ET AL. (2012) und BOHG ET AL. (2014). Als Gemeinsamkeit der meisten Methoden lässt sich feststellen, dass basierend auf einem spezifischen Greifer oder einer Greiferhand eine Vielzahl von Greifmöglichkeiten generiert und diese anschließend (simulativ) bewertet bzw. gefiltert werden. Kriterien für die Bewertung sind meist die Sicherheit des Griffes sowie weitere modellspezifische Metriken. Der dabei entstehende Rechenaufwand ist je nach Ansatz nicht zu unterschätzen (PRZYBYLSKI 2013). Die Generierung der für die Analyse nötigen Daten kann entweder aus CAD-Modellen, Daten aus (optischer) Sensorik wie beispielsweise Kameras und mittels haptischer Exploration (BIERBAUM 2012) erfolgen.

Einen wichtigen industriellen Anwendungsfall stellt der sogenannte „Griff in die Kiste“ dar. Ziel hierbei ist es, in einem Behälter ungeordnete Handhabungsobjekte zu erkennen und sicher zu entnehmen. Meist sind die zu detektierenden Objekte sowie ihre jeweiligen Greifpositionen bekannt (vgl. SCHRAFT & LEDERMANN (2003), SCHYJA & KUHLKÖTTER (2015), SPENRATH ET AL. (2012)).

Bis auf wenige Ausnahmen (DINI & FAILLI (2000) (Zweibackenparallel-, Dreibackenparallel, Magnet-, Vakuum-, Lochgreifer), MÜLLER (2001) (Parallel-, Vakuumgreifer), KRISTENSEN ET AL. (2001) (Parallel-, Vakuumgreifer), KRAFT ET

AL. (2014) (Parallel-, Vakuumgreifer)) sind Greifpositionsbestimmungs- bzw. Greifplanungsalgorithmen meist nur auf eine Greiferart oder sogar lediglich auf einen spezifischen Greifer abgestimmt. DINI & FAILLI (2000) verwenden bei ihrer Herangehensweise neuronale Netze, um für ein Handhabungsobjekt anhand seiner Greifmerkmale den geeignetsten Greifertyp zu finden. Der von MÜLLER (2001) entwickelte Ansatz zielt darauf ab, aus einer Menge von ungeordneten Objekten mittels des zielgerichteten Einsatzes verschiedener Greifer flexible und zuverlässige Griffe zu generieren. Dafür wurden sowohl neue Strategien zur Objektentnahme als auch Algorithmen für die Greifplanung und die Auswahl definierter Greiferwerkzeuge entwickelt. KRISTENSEN ET AL. (2001) beschreiben zwei Herangehensweisen (modellbasiert und modellfrei) wie, ausgehend von Kameradaten, Greifpunkte für bekannte, unsortierte und polyedrische Handhabungsobjekte generiert werden können. Ebenfalls auf den Griff-in-die-Kiste bezieht sich die Arbeit von KRAFT ET AL. (2014). Ziel ist hier, die manuelle Rüstzeit für Griff-in-die-Kiste-Anwendungen bei gleichzeitiger Steigerung der Greiferfolgsraten zu reduzieren. Umgesetzt wird dies mittels einer dynamischen Greifsimulation.

### **2.3.1 Methoden zur Greifpositionsbestimmung für mechanische Greifer**

Für die automatisierte Bestimmung von Greifpositionen mechanischer Greifer liegt eine ganze Reihe von Untersuchungen vor. Der Fokus unterscheidet sich je nach Zielsetzung sehr stark.

Erste Ansätze, wie aus Geometriedaten Greifpositionen für mechanische Greifer generiert werden können, wurden bereits Ende der 1970er Jahre entwickelt (WINGHAM 1977). Diese Ansätze wurden im Laufe der Zeit immer weiter ausgebaut und verfeinert (vgl. LAUGIER (1981), WOLTER ET AL. (1985), BROST (1988)). Die grundsätzliche Herangehensweise zur Greifplanung für mechanische Greifer, basierend auf Geometriedaten, wird in LAUGIER & PERTIN (1983) sowie PERTIN-TROCCAZ (1988) umfassend beschrieben. Eine Zusammenfassung von Arbeiten auf dem Gebiet vor 1988 können PERTIN-TROCCAZ (1988) entnommen werden. SMITH ET AL. (1999) beschreiben einen zweidimensionalen Ansatz für die Bewertung von Greifflächen hinsichtlich Reibung, Momenten sowie Zugänglichkeit.

HÖRMANN & HÖRMANN (1990) beschreiben einen Ansatz für die kollisionsfreie und stabile Planung von Greifoperationen an Polyedern mittels Parallelgreifern und planen Backen. Neben der Analyse der Handhabungsobjekte hinsichtlich passender Charakteristika für spezifische Greifbacken werden die gefundenen Lösungen mittels eigens entwickelter Kriterien bewertet. Das Verfahren lehnt sich an LAUGIER & PERTIN (1983) an und berücksichtigt zusätzlich Hindernisse am Aufnahme- und Ablageort. Des Weiteren wird die Anfahrriichtung in Abhängigkeit möglicher Hindernisse festgelegt. RÖHRDANZ (1997) beschreibt ein modellbasiertes Verfahren (<sup>Auto</sup>GRASP) zur Greifplanung für Parallelgreifer unter der Berücksichtigung von neun Nebenbedingungen. Ein Fokus liegt dabei ebenfalls auf der Zugänglichkeit der Greifpositionen.

Eine vollautomatisierte Suche nach Greifflächen für Parallelgreifer, basierend auf CAD-Daten des Handhabungsobjekts, wird von DINI (1993) untersucht. Als Teilmodul eines Systems zur automatisierten Montageplanung (FLAPS) werden dabei auch mögliche Restriktionen durch Montageoperationen berücksichtigt. Die Suche wird durch den Einsatz einer Fuzzylogik unterstützt.

STETTER (1994) entwickelte einen Ansatz die Greifplanung in Simulationsumgebungen zu integrieren. Neben der Bestimmung von Greifpositionen umfasst das Konzept ebenfalls ein Modul zur Bewertung hinsichtlich Kollisionsfreiheit, Rutsch- und Kippsicherheit. Ausgehend von einer kollisionsfreien Bahn gibt der Algorithmus eine Programmsequenz für einen Roboter inklusive der Befehle zur Ansteuerung des Greifers aus. Ein ähnlicher Ansatz wird von KUGELMANN (1999) verwendet.

Die benötigte Rechenzeit für die Bearbeitung der Daten stellt eine Herausforderung bei der Greifplanung dar. HUISSOON & CACAMBOURAS (1993) schlagen zur Lösung dieser Problemstellung einen merkmalsbasierten Ansatz vor. Dabei wird das Handhabungsobjekt (bzw. dessen Flächen) sequenziell auf die Greifbarkeit durch einen mechanischen Greifer abgeprüft.

Ein aufgabenorientiertes System zur Greif- und Bahnplanung wird in der Arbeit von WEEKS (1997) beschrieben. Im Rahmen der (geometrischen) Greifplanung für Parallelgreifer wird dabei ein flächenorientierter Filter verwendet, welcher in sechs Schritten geeignete Greifflächen definiert. Für die Greifplanung von 3-Finger Parallelgreifern beschreiben BALAN & BONE (2003) eine Vorgehensweise sowie Metriken zur Bewertung der generierten Greifpositionen, die auf eine beliebige Zahl an Fingern erweitert werden können.

Der Ansatz von FERNANDEZ ET AL. (2006) wurde für die automatisierte Demontage entwickelt. Er erweitert die klassische Greifpositionsbestimmung mit Ansätzen des maschinellen Lernens. Ebenfalls als lernendes System ausgelegt ist der Algorithmus von HERZOG ET AL. (2014), welcher auf der Annahme basiert, dass ähnlich geformte Objekte ähnlich gegriffen werden können.

### **2.3.2 Methoden zur Greifpositionsbestimmung für Vakuumgreifer**

Die Greifplanung sowie Greifpositionsbestimmung für Vakuumgreifer wird in der Literatur kaum betrachtet. Um unsortierte Teile automatisiert mittels eines Roboters aus einem Behälter entnehmen zu können, entwickelten BIRK ET AL. (1981) einen Algorithmus. Basierend auf Kameradaten werden Greifmöglichkeiten für einen Vakuumgreifer identifiziert. Ein Verfahren zur Generierung sowie Bewertung von Greifpositionen für Vakuumgreifer aus CAD-Daten wird von SDAHL (2006) beschrieben. Der Algorithmus von KAISER (2009) wird bei der Generierung von Greifpunkten zur Entladung von nicht exakt bekannten, willkürlich liegenden Objekten eingesetzt und basiert auf Punktwolken.

## **2.4 Methoden zur Greifkraftberechnung**

Um einen sicheren Kontakt zwischen Handhabungsobjekt und Greifer sicherzustellen, ist eine genaue Kenntnis über die Greifkraft nötig. Es kann dabei zwischen der benötigten Greifkraft und der zulässigen Greifkraft unterschieden werden. Die zulässige Greifkraft wird hauptsächlich durch die mechanischen und stofflichen Eigenschaften der Wirkelemente des Greifers sowie des Handhabungsobjektes bestimmt. Sie stellt die Kraft dar, welche gerade noch zulässig ist ohne das Handhabungsobjekt zu beschädigen.

### **2.4.1 Grundlagen der Greifkraftberechnung**

Um ein Verständnis für die auf das Handhabungsobjekt wirkenden Kräfte zu erlangen, soll im Folgenden kurz auf die verschiedenen Arten von Kräften und deren Ursprung eingegangen werden.

Während im statischen Fall rein die Gewichtskraft ( $G$ ) auf ein Handhabungsobjekt wirkt, treten bei dynamischen Bewegungen diverse weitere Kräfte auf, beispielsweise die Trägheitskraft ( $F_T$ ) der gegriffenen Masse. Diese wirkt entgegen der Richtung der Beschleunigung ( $a$ ). Bei rotatorischen Bewegungen entsteht

eine Zentrifugalbeschleunigung in Richtung des Kreismittelpunktes, die entgegengesetzt entstehende Kraft wird als Zentrifugalkraft ( $F_z$ ) bezeichnet. Bei beschleunigten Rotationsbewegungen entstehen Eulerkräfte. Unterliegt das Handhabungsobjekt zusätzlich einer translatorischen Bewegung so wirkt ferner die sogenannte Corioliskraft ( $F_c$ ). Zusammenfassen lassen sich die Kräfte mittels einer durch Überlagerung entstehenden resultierenden Kraft.

Zu Beginn der Bestimmung der Greifkraft steht zunächst immer die Ermittlung der durch den Prozess auftretenden Kräfte. Dabei sollte beachtet werden, dass das Handhabungsobjekt auch bei einem Not-Stop sicher gegriffen bleibt. Bei Handhabungsobjekten mit großen Oberflächen muss außerdem der Luftwiderstand beim Handhaben beachtet werden (BÖGER 1997). Weitere mögliche Kräfte können durch externe Belastungen, beispielsweise die Bearbeitung des Handhabungsobjektes oder bei Füge- bzw. Montageoperationen, entstehen. Da ein Großteil der verwendeten Modelle zur Berechnung von Greifkräften stark vereinfachte Annahmen trifft, werden in der Literatur Sicherheitsfaktoren von 2 bis 4 empfohlen (HESSE 2004).

Ziel der Greifkraftberechnung ist es, einem Versagen des Griffes durch die induzierten Kräfte entgegenzuwirken. Bei mechanischen Greifern kann, bezogen auf das Koordinatensystem in *Abbildung 2-5* bzw. *Abbildung 2-7*, ein Versagen durch Herausrutschen (Entlang der z- oder x-Achse), Herausdrehen (um die y-Achse) oder Verdrehen (um die z-Achse) entstehen (WOLTER ET AL. 1985). Bei Vakuumgreifern ist ein Versagen durch Abfallen (entlang der z-Achse), Abgleiten (in der x-y Ebene) oder Verdrehen (um die z-Achse) möglich (MANTRIOTA 2007B).

Eine zentrale Größe bei der Greifkraftberechnung kraftschlüssiger Verbindungen stellt der Haftreibungskoeffizient dar (WOLF ET AL. 2016). Reibung ist ein komplexes Oberflächenphänomen zwischen Körpern und lässt sich mit dem Coulomb'schen Reibungsgesetz annähern. Der Reibungskoeffizient stellt eine sehr kritische Eingangsgröße für die rechnergestützte Auslegung und Auswahl dar, da er nur mit hoher Unsicherheit bestimmt werden kann, jedoch einen überdurchschnittlich großen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Auslegung und somit die Sicherheit des Greifprozesses hat. Eine Analyse der Literatur zeigt, dass sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie signifikante Unterschiede bei den angesetzten Reibkoeffizienten herrschen (vgl. beispielsweise Angaben von HESSE (2004) und WOLF ET AL. (2016)). Eine weitere Herausforderung liegt darin, dass sich Reibungskoeffizienten bei unterschiedlichen Rahmenbedingun-

gen ändern können (POPOV 2010). BRAUN (1989) sowie BECKER (1993) führten umfangreiche Versuchsreihen zur Bestimmung der Einflussgrößen auf die Haftreibung von Vakuumgreifern durch. Aufgrund der Komplexität von Reibungsphänomenen ist anzuzweifeln, ob diese verallgemeinert auf alle Arten von Saugern und Materialien übertragbar sind. Grundsätzliche Effekte auf den Reibungskoeffizienten bei bestimmten Rahmenbedingungen sind in *Tabelle 2-4* beschrieben. Standardreibungskoeffizienten, wie sie in der Greiftechnik oft verwendet werden, finden sich in *Abschnitt 2.1.3*.

*Tabelle 2-4: Einfluss verschiedener Parameter auf den Haftreibungskoeffizienten metallischer Werkstoffe (KÖHLER 2004)*

Parameter	Qualitativer Einfluss auf $\mu$	Quantitativer Einfluss auf $\mu$
Temperatur	deutlich steigend	Erhöhung um 100° kann $\mu$ um bis zu 0,5 bzw. um bis zu 300% vergrößern
Normalkraft	fallend	Erhöhung der Normalkraft um 100% kann $\mu$ bis zu 10-25% verkleinern
Normalkraft	steigend	Erhöhung der Normalkraft um 100% kann $\mu$ bis zu 10-30% vergrößern
Kontaktzeit	minimal steigend	Erhöhung der Kontaktzeit um 100 % kann $\mu$ um bis zu 5 % vergrößern

Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, welche bei der Berechnung von Kräften unter Beachtung der beschriebenen Gesetzmäßigkeiten unterstützen. Dabei kann zwischen einfachen Berechnungsvorschriften und komplexeren Kräftemodellen unterschieden werden.

## 2.4.2 Methoden zur Greifkraftberechnung bei mechanischen Greifern

Obwohl zwischen den zwei in dieser Arbeit betrachteten Arten von mechanischen Greifern große Unterschiede bei der Gestaltung der Kinematiken auftreten, kann die Greifkraftberechnung analog erfolgen. Hintergrund dafür ist, dass nur die Kräfte zwischen Wirkelement und Handhabungsobjekt betrachtet werden. Bei korrekter Verwendung (Wirkelement sind bei Auftreffen auf das Handhabungsobjekt parallel), sind die Gesetzmäßigkeiten an den Greifflächen für beide Greiferarten als identisch zu betrachten. Die wirkenden Kräfte für den einfachsten Fall, ohne extern angreifende- und dynamische Kräfte bei Verwendung planer Backen kann *Abbildung 2-15* entnommen werden.

Es gilt dabei für die Greifkraft  $F_G$ :

$$F_G = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \mu} \quad (2.1)$$

$m$  entspricht der Masse des Handhabungsobjektes,  $g$  der Erdbeschleunigung und  $\mu$  dem Haftreibungskoeffizienten.

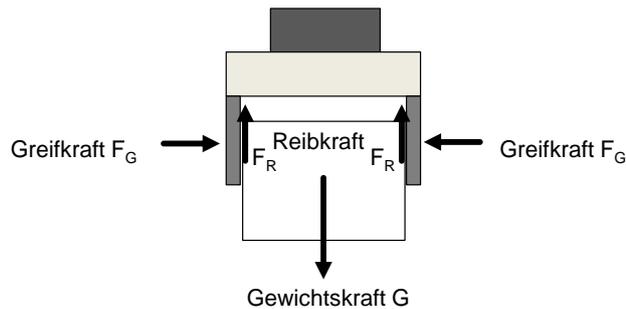


Abbildung 2-15: Wirkende Kräfte zwischen Backen und Handhabungsobjekt bei mechanischen Greifern mit planen Backen (HESSE 2004)

Grundsätzliche Vorgehensweisen und Berechnungsansätze für einfache Greifaufgaben unter Verwendung von planen Backen finden sich in den Werken von SEEGRÄBER (1993), HESSE (2004), HESSE (2011), CARDAUN (1981), PEDRAZZOLI ET AL. (2001) und WOLF & STEINMANN (2004). Mit Hilfe dieser Ansätze ist es möglich, die auftretenden Kräfte abzuschätzen. CARDAUN (1981) und HESSE (2011) beschreiben die Verwendung von Nomogrammen (Netztafeln) als unterstützendes Werkzeug zur überschlägigen Berechnung von Greifkräften.

Die folgenden Konzepte beschäftigen sich auf einer komplexeren Basis mit der Berechnung von Greifkräften. Der Ansatz von CHEN (1982) zur Beschreibung der Kraftübertragung innerhalb mechanischer Greifer beruht auf dem Prinzip der virtuellen Arbeit. Kräfte an den Greifbacken werden als lineare Streckenlasten modelliert. CUADRADO ET AL. (2002) dagegen stellen auftretende Kräfte zwischen Handhabungsobjekt und Greifer als Punktlast dar und beschreiben anhand eines mechanischen Modells vier mögliche Versagensfälle eines sicheren Griffes. Eine Modellierung der auftretenden Kräfte als konstante Flächenlast erfolgt im Modell von WOLTER ET AL. (1985), das von BARBER ET AL. (1986) unter Verwendung von linearen Flächenlasten weiterentwickelt wurde. SHIN ET AL. (2012) beschreiben einen Algorithmus und ein Vorgehen zur Bestimmung der Größenordnung der benötigten Greifkräfte, des Reibungskoeffizienten zwischen Hand-

habungsobjekt und Greiferbacke sowie des Elastizitätsmoduls des Handhabungsobjektes

Bedingt durch deren Form müssen bei prismatischen Backen für die Kraftberechnung angepasste Formeln verwendet werden. Einfache Formeln dafür können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden (vgl. WOLF & STEINMANN (2004), SEEGRÄBER (1993), PEDRAZZOLI ET AL. (2001), HESSE (2004)).

### 2.4.3 Methoden zur Greifkraftberechnung bei Vakuumgreifern

Wie in *Abschnitt 2.1.2* beschrieben, verhält sich die Greifkraft bei Vakuumgreifern proportional zur Fläche des Saugers ( $A_S$ ) sowie zur Druckdifferenz aus Umgebungsdruck ( $p_{amb}$ ) und dem Innendruck des Saugers ( $p_i$ ). Für die Vakuumkraft ( $F_V$ ) gilt somit im einfachsten Lastfall (vgl. *Abbildung 2-8*):

$$F_V = (p_{amb} - p_i) \cdot A_S \cdot \eta \cdot k. \quad (2.2)$$

Eventuelle Verluste durch Leckströme werden durch den Wirkungsgrad ( $\eta$ ) sowie mögliche Verformungen des Saugers durch den Verformungsbeiwert ( $k$ ) abgebildet. BECKER (1993) konnte zeigen, dass der Verformungsbeiwert vom Material des Saugers, der Druckdifferenz und der Beschaffenheit des Greifgutes abhängt. Der Verformungsbeiwert berücksichtigt des Weiteren, wie groß die tatsächlich wirkende Fläche des Vakuumsaugers ist. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Fläche eines Vakuumsaugers von der tatsächlich wirkenden Fläche ( $A_{eff}$ ) unterscheidet (BRAUN 1989). Die Gesetzmäßigkeiten dafür sind sehr komplex und stark vom jeweilig verwendeten Sauger abhängig. Die oben genannten Zusammenhänge werden von HESSE (2011) sowie von GÖTZ (1991) mittels Formeln für verschiedene Szenarien bezüglich Sauger und Orientierung des Handhabungsobjekts beschrieben.

Im Folgenden werden Modelle vorgestellt, die sich detaillierter mit der allgemeingültigen Berechnung zu erwartender Greifkräfte bei Vakuumgreifern beschäftigen. Erste Untersuchungen, welche die Dichtkraft als lineare Streckenlast annehmen, finden sich in KAULINJA (1979). Die bei diesem Modell bestehenden Begrenzungen hinsichtlich Schwerpunktslage und Wirkrichtung der Kräfte wurden von BECKER (1993) weiterentwickelt. Des Weiteren betrachtet das Modell von Becker im Sauger auftretende Kräfte unter Verwendung der Ergebnisse von

RADTKE (1991). Für Kräfte, die in einer Ebene (translatorische Bewegungen) liegen, sowie für Hohlkörper gilt das Modell von GRUBBA (2002), das auf der Arbeit von BECKER (1993) aufbaut. Ein Modell zur Bestimmung des benötigten Reibkoeffizienten bei der Verwendung rechteckige Einzelsauger wird von MANTRIOTA (2007B) beschrieben. Eine Ausweitung des Modells auf runde Sauger erfolgt in MANTRIOTA & MESSINA (2011). Während alle beschriebenen Modelle die Dichtstreckenlast als linear annehmen, wird sie von BÖGER (1997) konstant modelliert und für Berechnungen bei flächigen Handhabungsobjekten eingesetzt.

Für die Berechnung von Kräften bei mehreren Saugern sind zwei Modelle bekannt (BRAUN 1989, MANTRIOTA 2007A). Beide Modelle nehmen die Dichtkraft als Punktlast an. Eine Eingrenzung der Modelle besteht darin, dass jeweils genau vier Sauger betrachtet werden.

## 2.5 Methoden zur Greiferflexibilisierung

Neben den in *Abschnitt 2.1.4* beschriebenen Ansätzen mittels technischer Lösungen die Flexibilität zu erhöhen, existieren weitere Ansätze der methodischen Flexibilitätssteigerung von Greifersystemen. CARDAUN (1981) definiert dafür den Begriff der „angepassten Flexibilität“. Dies bedeutet, dass für ein bestimmtes Spektrum an Handhabungsobjekten nur so viel Flexibilität wie benötigt bereitgestellt wird. Somit ist es möglich Masse, Kosten und verminderte Zuverlässigkeit durch komplexe Systeme bzw. nicht benötigte Flexibilität zu vermeiden. Für die Umsetzung dieser Aufgabe wählt CARDAUN (1981) ein multivariates Verfahren zur Bildung von Handhabungsobjektclustern. Daraus werden Auslegungsdaten mit einer möglichst geringen Anzahl an, für die Handhabungsaufgabe nötigen, Greifern abgeleitet. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen PHAM & YEO (1991) sowie AUER (1976). Sie schlagen vor, mittels eines Klassifizierungssystems, basierend auf den Eigenschaften der Handhabungsobjekte, Teilefamilien zu bilden. Der Ansatz der Bildung von Teilefamilien ist nicht neu, sondern wird in der Fertigungsplanung (Fertigungsfamilien) bereits seit geraumer Zeit verwendet (AUCH 1989). GOURASHI (2003) bzw. PHAM ET AL. (2007) erweitern das Modell von PHAM & YEO (1991) dahingehend, dass die für die Klassifizierung mittels eines Kodierungssystems benötigten Parameter automatisiert aus CAD-Daten ausgelesen werden. Ebenfalls automatisiert, basierend auf CAD-Daten, ist das System CAGD von SDAHL (2006). In einem sequenziellen Ablauf prüft die

Software ab, inwieweit sich Greifpunkte von Sauggreifern auf andere Handhabungsobjekte übertragen lassen. Für Parallelgreifer mit drei Backen wurde der Algorithmus von BALAN & BONE (2003) entwickelt, welcher die Gestaltung der zylindrischen Greiferbacken hinsichtlich der Eignung für mehrere spezifische Handhabungsobjekte anpasst. Mit der Vorgehensweise nach MICHAELIS (1982) ist es möglich, Aussagen über das mittels mechanischen Greifern handhabbare Spektrum an Handhabungsobjekten in Abhängigkeit von Backendimensionen und Greifkraft zu treffen. Der von SINTOV ET AL. (2016) beschriebene Algorithmus „3D-OCOG (3-Dimensional Objects Common Grasp search)“ generiert auf Basis von CAD-Daten Merkmalsvektoren von Handhabungsobjekten und analysiert diese anschließend mittels eines Nächste-Nachbarn-Algorithmus. Basierend darauf werden mechanische Greifer ausgelegt, welche eine möglichst große Anzahl der analysierten Objekte greifen können. SCHAAF & CHISU (2010) beschreiben ein manuelles Vorgehen, bei welchem den Elementen eines Objektspektrums Greifprinzipien zugeordnet werden. Ausgehend davon ist es möglich diese zu kombinieren, um so die Greiferflexibilität zu steigern. Für die Auswahl von einzelnen Spannmitteln für mehrere Objekte schlägt FRANZKOWIAK (2014) eine Analyse der CAD-Daten, gefolgt von einer Clusteranalyse zur Gruppierung von Spannaufgaben vor. Der Ansatz von VELASCO (1997) erlaubt es, Backen an die Geometrien mehrerer Handhabungsobjekte anzupassen. Dies ist auch die Zielstellung der Arbeit von HONARPARDAZ ET AL. (2016B), wobei im Unterschied zu VELASCO (1997) auch kraftschlüssige Griffe möglich sind. GORCE & FONTAINE (1996) untersuchen, wie die Kinematiken von mechanischen Greifern bei mehreren Objekten ausgelegt werden müssen.

## 2.6 Additive Fertigungsverfahren in der Greiftechnik

Für die Produktion automatisiert generierter Greifer(-teil)systeme basierend auf CAD-Daten bietet sich die additive Fertigung an. Grund dafür ist der konsistente Datenfluss und der große Gestaltungsspielraum, welche bei entsprechenden Verfahren zur Verfügung steht. Wie in VDI 3405 definiert, wird bei additiven Fertigungsverfahren „[...] das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut [...]“. Aus dem Bereich des Prototypenbaues kommend („Rapid Prototyping“), haben sich diese Fertigungsverfahren inzwischen in der industriellen Anwendung etabliert (BREUNINGER ET AL. 2013). Neben neuen Materialien und Technologien, die eine hohe Qualität der additiv gefertigten Bauteile ermöglichen, spielen insbesondere die immer weiter sinkenden Kosten eine große Rolle.

Auf funktionaler Ebene lassen sich mit additiven Verfahren Geometrien fertigen, die sich konventionell nicht oder nur unter hohem Aufwand herstellen ließen. Dies bietet konstruktiv ganz neue Möglichkeiten, da sich beispielsweise Leichtbaustrukturen der Bionik industriell tauglich herstellen lassen. Des Weiteren ist es möglich, Funktionalitäten eines Bauteiles bereits bei der Fertigung zu berücksichtigen („Funktionsintegration“), um somit spätere Montageschritte entfallen zu lassen. Da als Basis additiv gefertigter Bauteile elektronisch vorliegende Daten dienen, ist es möglich diese weltweit und aufwandsarm zu versenden. Neben Gefahren (Produktpiraterie etc.) bieten sich ganz neue Chancen und Geschäftsmodelle, da beispielsweise Ersatzteile theoretisch nicht mehr in physischer, sondern nur noch in elektronischer Form vorgehalten werden müssen und lokal gefertigt werden können.

In der Greiftechnik existieren bereits einige Anwendungsbeispiele für den erfolgreichen Einsatz rund um die additive Fertigung. Die Arbeit von VELASCO (1997) befasst sich mit der Backengestaltung mechanischer Greifer unter Verwendung additiver Technologien. Die mit dem eGrip Tool der Firma Schunk ausgelegten Backen für mechanische Greifer werden additiv gefertigt, wobei unter verschiedenen Materialien für die Backen gewählt werden kann (NAGEL ET AL. 2016). Zudem existieren einige Beispiele von mechanischen Greifern, bei welchen nicht nur die Wirkelemente, sondern der komplette Greifer inklusive Grundkörper additiv gefertigt werden (vgl. VOLLMUTH 2016). Im Bereich der Vakuumgreifer werden von der Firma robomotion Greifer additiv gefertigt, welche unter anderem im Bereich der Lebensmittelhandhabung zum Einsatz kommen (BAUERNHANS� ET AL. 2016). Hervorzuheben ist dabei die Funktionsintegration der Vakuumleitungen in den Greifergrundkörper (vgl. *Abbildung 2-16*).



*Abbildung 2-16: Additiv gefertigter Vakuumgreifer mit integrierten Vakuumleitungen (ROBOMOTION GMBH 2017)*

## 2.7 Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Erkenntnisse

Für den Abgleich der in Kapitel 1 definierten Zielen mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Erkenntnisse wurden eine Reihe, auf die rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen bezogene, Kriterien definiert. Unter Verwendung dieser Kriterien wurden besonders relevante Arbeiten aus dem Stand der Erkenntnisse bewertet.

- Automatisierte Generierung von Greifpositionen basierend auf CAD-Daten
- Methodische Einbeziehung der Greiferflexibilität
- Kombination von der Greiferauslegung mit der Greiferauswahl

Bezüglich der automatisierten Generierung von Greifpositionen ausgehend von CAD-Daten existiert eine ganze Reihe von Vorarbeiten. Für die in dieser Arbeit verfolgte Zielstellung der Auslegung und Auswahl lassen sich fünf Arbeiten identifizieren, welche von besonderer Bedeutung sind. PEDRAZZOLI ET AL. (2001) beschreiben, welche Auswirkungen bestimmte Geometrien von Handhabungsobjekten auf die Auslegung und Auswahl von mechanischen Greifern haben. Es erfolgt jedoch keine Beschreibung, wie genau diese Geometrien aus den CAD-Daten extrahiert werden können. Die Arbeiten von GOURASHI (2003) bzw. PHAM ET AL. (2007) beschreiben einen Ansatz, wie aus CAD-Daten Informationen für die Flexibilisierung von Greifersystemen gewonnen werden können. Eine Einschränkung der Vorgehensweise ist, dass nur die Grundgeometrien und Außenmaße der Handhabungsobjekte erfasst werden und somit die nachfolgende Auslegung mechanischer Greifer nur sehr ungenau erfolgen kann. Weitere Ansätze für die Auslegung von Backen mechanischer Greifer beschreiben die Arbeiten von HONARPARDAZ ET AL. (2016A) und WOLNIAKOWSKI ET AL. (2017). Neben der Beschränkung auf mechanische Greifer wird des Weiteren davon ausgegangen, dass der Grundkörper des Greifers bereits definiert ist. Einen Algorithmus für das Auffinden von Greifpositionen von Vakuumgreifern basierend auf CAD-Daten ist Teil der Arbeit von SDAHL (2006). Notwendige Voraussetzung des Algorithmus ist jedoch die Kenntnis der Größe des eingesetzten (runden) Vakuumsaugers.

Der Ansatz von SDAHL (2006) berücksichtigt außerdem methodisch die Greiferflexibilisierung. Aufgrund der Annahme (siehe oben), dass bereits ein Greifer existiert, werden jedoch nur geometrisch passende Greifpositionen gesucht ohne

ausgehend von den Geometrien der Greifpositionen neue Greifer zu generieren. HONARPARDAZ ET AL. (2016B) dagegen berücksichtigen bei ihrem Flexibilisierungsansatz die Anpassung bzw. Auslegung von Greiferbacken, vernachlässigen jedoch die Berechnung zugehöriger Greifkräfte. Gleiches gilt für die Arbeiten von GOURASHI (2003) bzw. PHAM ET AL. (2007), welche ausschließlich die groben Abmaße sowie die Grundgeometrien der Körper erfassen und diese anschließend mittels eines Kodierungssystems auf Gemeinsamkeiten hin untersuchen. CARDAUN (1981) wendet zur methodischen Flexibilisierung von Greifersystemen ein Clusterverfahren für Handhabungsobjekte an. Dieser Ansatz erhöht zwar die Wahrscheinlichkeit, mit wenigen Greifern ein Objektspektrum greifen zu können, grenzt den Lösungsraum jedoch frühzeitig ein, sodass unter Umständen mögliche Lösungen nicht beachtet werden.

Die Erweiterung der Greiferauswahl um einen Baustein der Greiferauslegung erhöht durch die Möglichkeit zur Anpassung der Wirkelemente den Lösungsraum deutlich. Relevante Vorarbeiten, welche eine Kombination von Greiferauslegung und Greiferauswahl beschreiben sind PEDRAZZOLI ET AL. (2001) und CARDAUN (1981). PEDRAZZOLI ET AL. (2001) betrachten ausschließlich mechanische Greifer. Die Auswahl erfolgt anhand der notwendigen und der zulässigen Kräfte einer Greifposition, dem notwendigen Hub sowie dem Gesamtgewicht des Greifers. Wichtige Aspekte, wie die Abstimmung der Schnittstellen zwischen Greiferbacken und Greifergrundkörper sowie die Sicherstellung eines kollisionsfreien Betriebs des Greifers fehlen. Des Weiteren ist das verwendete Kraftmodell nur für sehr einfache Belastungsfälle geeignet. CARDAUN (1981) betrachtet mehrere Greiferarten und legt diese auch aus. Hauptkritikpunkt an diesem Ansatz ist die aufwendige Dateneingabe. So muss der Nutzer 204 Variablen in einem Datenerhebungsbogen angeben, welche anschließend für den Prozess genutzt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zu allen Teilbereichen der Zielstellung dieser Arbeit bereits Vorarbeiten unterschiedlicher Tiefe und Allgemeingültigkeit vorliegen. Ein Großteil der existierenden Herangehensweisen berücksichtigt jeweils nur Teilaspekte, ohne diese im hier gewünschten Zusammenhang zu verknüpfen. Bis auf wenige Ausnahmen wird beispielsweise lediglich eine Greiferart betrachtet. Es ist keine durchgängige, rechnergestützte Vorgehensweise bekannt, welche alle oben genannten Kriterien erfüllt. Ein starker Fokus der wissenschaftlichen Tätigkeiten in diesem Bereich lag in den letzten Jahren auf den anthropomorphen Greiferhänden. Die wenigen Beispiele in der Literatur, deren Zielstellung vergleichbar ist, sind in ihrem Aufbau meist wenig

flexibel. So ist bei der Verwendung von Kodierungs- und Expertensystemen der Lösungsraum von vorneherein begrenzt und das Ergebnis des Systems damit unter Umständen sehr ungenau. Neben der additiven Fertigung und der damit häufig verknüpften automatisierten Konstruktion, lässt sich generell ein Trend zur Digitalisierung von bisher händisch bewältigten Aufgaben bei der Planung und Auslegung von Handhabungssystemen erkennen.

## **3 Spezifikation des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs**

### **3.1 Bedarfsanalyse**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die automatisierte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es der Erweiterung bzw. Erforschung der in Kapitel 2 aufgezeigten Defizite und Grenzen bestehender Modelle. Von grundlegender Bedeutung ist dabei eine durchgängige, konsistente Vorgehensweise zu entwickeln, um alle Potentiale des digitalisierten Arbeitens nutzen zu können. Dies ist nur mittels einer sorgfältigen Erforschung und Aufbereitung der erforderlichen Daten und der Schaffung entsprechender Schnittstellen zwischen neuen sowie bestehenden Ansätzen möglich. Ein durchgängiger Prozess, welcher mehrere Greifprinzipien unterstützt, erlaubt es verschiedene Greifkonfigurationen lösungsneutral miteinander auf ihre Leistungsfähigkeit bezüglich einer beliebigen Aufgabenstellung zu vergleichen. Bei den bestehenden Methoden muss dabei insbesondere der Einbindung der Greifkraftberechnung, der damit eng verknüpften Auslegung sowie der automatisierten Konstruktion Aufmerksamkeit geschenkt werden. Auf Basis der daraus entstehenden Greiferlösungen und Konfigurationen ist es anschließend möglich, strukturiert und automatisiert Potentiale zur Verbesserung der Flexibilität der Greifer zu nutzen. Des Weiteren können die (virtuell) generierten Greifersysteme im Rahmen von Prozessen der digitalen Fabrik, wie beispielsweise der Simulation, verwendet werden. Abschließend muss eine Plattform geschaffen werden, um dem Nutzer eine möglichst fundierte Entscheidung über die am besten geeignete Lösung zu ermöglichen. Zusammengefasst besteht das abstrahierte Ziel somit darin, aus teilweise nur qualitativ vorliegenden Ausgangsdaten eine quantitative Bewertung zu ermöglichen. Im Folgenden werden die genannten Bedarfe vertieft.

### **3.2 Technische Anforderungen**

#### Erfüllung industrieller Anforderungen

Ein Ziel der Methode stellt die Verwendung im industriellen Umfeld dar, weswegen die Randbedingungen hierfür definiert werden müssen. Bestehende Herangehensweisen sind aufgrund ihres Grundlagenforschungs-Charakters diesbe-

züglich nicht oder nur eingeschränkt geeignet. Technische Anforderungen sind somit die Möglichkeit zur Abbildung der wichtigsten industriell relevanten Greifer- und Wirkelementarten bzw. die Möglichkeit, diese innerhalb der Methode zu implementieren. Weitere Anforderungen beziehen sich auf die Ergonomie und Effizienz der zu entwickelnden Vorgehensweise. So soll für die Bedienung der Software so wenig Vorwissen wie möglich nötig sein. Um im Vergleich zum aktuell manuellen Vorgehen eine Effizienzsteigerung zu erzielen, muss die Zeitdauer für den Ablauf des Auslegungs- und Auswahlprozesses gesenkt werden. Dies betrifft sowohl die vom Nutzer benötigte Zeit, als auch die Dauer für den Ablauf des Rechenprozesses. Um die Praxistauglichkeit des Vorgehens zu testen, sollen zudem umfangreiche Absicherungsversuche anhand von physischen Handhabungsobjekten durchgeführt werden, da dies bei den wenigsten der in der Literatur beschriebenen Ansätze gezeigt wurde.

#### Verbesserung der Greifkraftberechnung

In bestehenden Ansätzen zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen wird die Berechnung der Greifkraft oft nur randständig und rudimentär betrachtet. Eine Erklärung hierfür ist, dass bisher die nötige Datenbasis für entsprechende Berechnungen oft nicht vorhanden war oder nur unter hohem zeitlichem Aufwand geschaffen werden konnte. Ein Beispiel dafür ist die Berechnung des Abstandes eines Greifpunktes vom Schwerpunkt des Handhabungsobjektes und das dadurch induzierte Moment. Aufgrund der Ungenauigkeit derzeit verwendeter Rechenansätze, wird in der industriellen Anwendung mit hohen Sicherheitsfaktoren gearbeitet. Eine Steigerung der Genauigkeit der Greifkraftberechnung bei gleichzeitiger Nutzung der Möglichkeiten automatisierten Arbeitens bietet somit das Potential, neue Greiferlösungen ressourceneffizient und ökonomisch realisieren zu können.

#### Strukturierte Betrachtung der Greiferflexibilisierung

Aufgrund der sich ändernden Rahmenbedingungen in der Produktion und Logistik, besteht ein Bedarf an flexiblen Greifern. Greifer mit einer großen technisch realisierten Flexibilität (bspw. Roboterhände) sind meist ökonomisch uninteressant, hoch komplex und somit fehleranfällig. Angestrebt wird somit eine zielgerichtete, spezifisch auf den Anwendungsfall zugeschnittene Flexibilität zur Verfügung zu stellen, da im industriellen Umfeld die zu handhabenden Objekte im Normalfall bekannt und mit entsprechenden Daten hinterlegt sind. Unter Verwendung einer Softwarelösung soll somit die Anzahl der benötigten Greifer für

mehrere Objekte beliebiger Form, Größe und Masse reduziert werden. Dabei müssen Randbedingungen wie Sicherheit, Zuverlässigkeit und Funktionalität beachtet werden. Die Optimierung soll anhand verschiedener Zielfunktionen erfolgen.

### **3.3 Methodische Anforderungen**

#### Vollständigkeit der Lösungsmenge

Um die bisher verwendeten, meist auf Erfahrungswissen beruhenden Herangehensweisen verbessern zu können, stellt die Generierung eines möglichst vollständigen Lösungsraums unter Beachtung der Rechenzeiteffizienz ein wichtiges Ziel dar. Dies ist obligatorisch für ein sicheres Finden der besten Lösung. Um eine Vergleichbarkeit der Lösungen erreichen zu können, müssen diese komplett definiert werden. Konkret bedeutet das, dass beispielsweise die Bewertung einer Greiferlösung für ein Handhabungsobjekt anhand der Greifposition nicht ausreicht. Stattdessen muss hierfür der endgültig ausgelegte Greifer herangezogen werden. Diese Vorgehensweise kann nur automatisiert durchgeführt werden, da aufgrund der großen Anzahl an zu beachtenden Faktoren eine händische Durchführung zu zeitaufwendig und somit wirtschaftlich nicht sinnvoll wäre. Im Besonderen gilt dies bei der Auswahl eines Greifersystems für mehrere Handhabungsobjekte.

#### Eindeutigkeit und Konsistenz des Methodenablaufes sowie der verwendeten Daten

Die oben genannten Ziele eines integrierten Modells können nur erreicht werden, wenn die dafür benötigten Daten identifiziert und definiert werden. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Gestaltung von Schnittstellen zu bereits bestehenden Herangehensweisen sowie zwischen einzelnen Schritten der Methode dar. In Fällen, bei denen noch keine Daten vorliegen, muss definiert werden, wie diese gewonnen werden können. Nur mit Daten, die den nötigen Detaillierungsgrad aufweisen, kann der gewünschte Lösungsraum aufgespannt werden. Somit kann die bestgeeignete Lösung gefunden werden. Die Vorgehensweise muss dabei so flexibel sein, auch neue Domänenprägungen des Handhabungssystems, wie beispielsweise weitere Greifprinzipien, abbilden zu können.

### Eignung als Basis zur Entscheidungsfindung

Aufgrund der computergestützten Bearbeitung und dem multikriteriellen Charakter der Aufgabenstellung, ist die Generierung mehrerer Lösungen zu erwarten. Die gefundenen Lösungen für den Nutzer aufzubereiten stellt deshalb einen wichtigen Baustein innerhalb der Methode dar. Dadurch wird ihm eine bestmögliche finale Auswahl einer Lösung unter Verwendung verschiedener Greifprinzipien und Greifkonfigurationen ermöglicht. Die eigentliche Lösung sollte in abstrahierter, herstellerneutraler Form bereitgestellt werden, sodass die Bereitstellung anderer/neuer Greiferarten ebenfalls möglich ist.

Neben diesen allgemeinen methodischen Anforderungen lassen sich aus der Analyse des Stands der Erkenntnisse und den technischen Anforderungen folgende Bausteine identifizieren welche die Methode umfassen muss:

- Automatisierte Greifpositionsbestimmung mit einem Grundablauf der unabhängig von der verwendeten Greiferart ist
- Vorgehensweise zur Dimensionierung von Greifersystemen
- Strukturierte Greifkraftberechnung, welche auch komplexere Greifprozesse erfassen kann
- Automatisierte Konstruktion der Grundkörper von Vakuumgreifern sowie der Backen von mechanischen Greifern
- Algorithmus für die Flexibilisierung von Greifersystemen
- Vorgehensweise und Kriterien für die objektive Bewertung von Greifersystemen

## 4 Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Basierend auf der Zielsetzung, dem Stand der Erkenntnisse und den in Kapitel 3 formulierten Anforderungen wurde eine Methode zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen entwickelt. Diese soll im Folgenden eingeführt und in den darauffolgenden Kapiteln spezifiziert werden. In Grundzügen wurde der Ablauf der Methode bereits in SCHMALZ & REINHART (2014) sowie SCHMALZ ET AL. (2016) beschrieben.

### 4.1 Einordnung der Methode

Aufgrund der Vereinfachung und Beschleunigung des Auslegungs- und Auswahlprozesses soll die Methode bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden können. Ziel ist es, erste Abschätzungen bezüglich der Handhabbarkeit eines spezifischen Objektes oder eines Spektrums von Objekten treffen zu können. Mit geringem Aufwand können so verschiedene Handhabungsszenarien überprüft werden. Der klassische Anwendungsfall ist jedoch die Planung bzw. die Konstruktion und Entwicklung automatisierter Handhabungssysteme. Der Einsatz ist dabei offline, also losgelöst von der eigentlichen Handhabungsoperation. Dementsprechend kann die Methode für die Verwendung in den Klassen C3 und C4 der Klassifizierung nach WOLTER ET AL. (1985) eingeordnet werden (vgl. *Tabelle 4-1*).

*Tabelle 4-1: Klassifizierung von Handhabungsoperationen in Abhängigkeit der im Voraus bekannten Informationen (WOLTER ET AL. 1985)*

Klasse	Offline verfügbares Wissen				Typische Anwendung
	Bauteil Geometrie	Bauteil Konfiguration	Lokales Hindernis	Bauteil Pose	
C0	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Unstrukturiert
C1	Bekannt	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Griff in die Kiste
C2	Bekannt	Bekannt	Teilweise bekannt	Bekannt	Teil von einem ungeordneten Tisch nehmen
C3	Bekannt	Bekannt	Bekannt	Unbekannt	Teil von ordentlichem Tisch nehmen
C4	Bekannt	Bekannt	Bekannt	Bekannt	Maschinenentladung

Des Weiteren soll die Methode dabei unterstützen, Daten für Greifsimulationen bereitzustellen, da diese auf Modelle von Greifern und deren Wirkelementen angewiesen sind. Bisher geschieht das meist manuell und stellt dadurch einen erheblichen Aufwand dar. Bei entsprechender Implementierung ist zudem denkbar, die Vorgehensweise bereits in Simulationsprogramme zu integrieren.

## 4.2 Beschreibung des Betrachtungsraumes

Folgende Einschränkungen und Annahmen werden für die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit getroffen:

- Keine Betrachtung von biegeschlaffen, elastischen oder porösen Handhabungsobjekten
- Keine Betrachtung von Handhabungsobjekten im Mikrobereich (500  $\mu\text{m}$ ) oder kleiner (vgl. GRUTZECK 2000)
- Betrachtung von Polyedern und Zylindern sowie Objekten, welche aus Kombinationen der beiden bestehen.
- Handhabungsobjekte bestehen jeweils nur aus einem Material
- Pro Handhabungsobjekt wird nur mit einem Greifersystem gegriffen
- Pro Greifersystem werden bei Vakuumgreifern ein Sauger und bei mechanischen Greifern zwei Backen berücksichtigt.
- Bei mechanischen Greifern reine Anpassung der Greifbacken; der Grundkörper des Greifers wird als gegeben angenommen
- Betrachtung von mechanischen Greifern mit zwei Backen (Winkel- und Parallelgreifer) und Sauggreifern
- Keine Beachtung von Sensorik
- Betrachtung von rein kraftschlüssigen Griffen (mit Ausnahme von prismatischen Backen bei zylindrischen Handhabungsobjekten)
- Anfahrriichtung des Greifers nur senkrecht von oben in negativer z-Richtung des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems
- Keine Beachtung der Bahnplanung bzw. des Anfahrweges, welcher außerhalb des Hüllkörpers liegt
- Betrachtung von Außengriffen

### 4.2.1 Ablauf der Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Der Ablauf der Methode gliedert sich in vier aufeinanderfolgende Phasen. Die erste Phase stellt die Analysephase dar, welche der Generierung und Aufbereitung der benötigten Daten gilt. Anschließend erfolgt die Synthesephase, welche den Lösungsraum für die spätere Auswahl definiert. Die darauf folgende Bewertungsphase ermöglicht einen objektiven Vergleich der Lösungen. Die gewählte Lösung wird in der abschließenden Realisierungsphase in die physische Welt überführt. *Abbildung 4-1* gibt einen Überblick über die Phasen, die jeweiligen Methodenelemente und die Eingangsdaten.

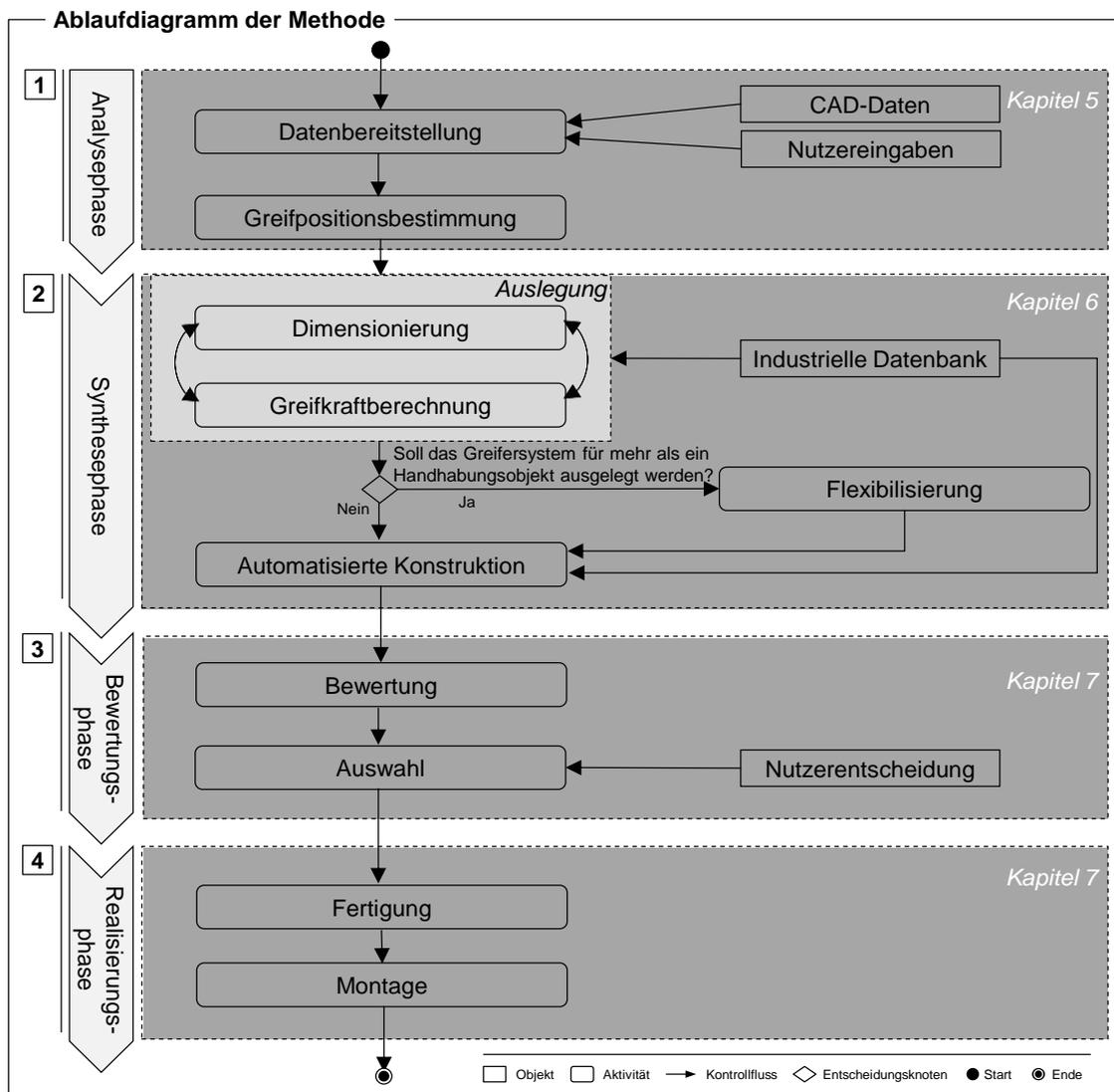


Abbildung 4-1: Gesamtablauf der Methode zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

### 4.2.2 Analysephase

Die Analysephase dient der Sammlung und Aufnahme aller für den weiteren Prozess notwendigen Daten. Dies geschieht zum einen durch das Abfragen spezifischer Rahmenbedingungen des Handhabungssystems und seiner Elemente sowie externer Faktoren beim Nutzer. Zum anderen erfolgt eine automatisierte Analyse der zur Verfügung gestellten CAD-Daten der Handhabungsobjekte. Ziel der Analysephase ist es, ein aussagekräftiges Anforderungsprofil an den oder die Greifer zu generieren sowie Greifpositionen zur Verfügung zu stellen. Eine klare Differenzierung zu den meisten in der Literatur beschriebenen Ansätzen ist dabei, dass nicht nach spezifischen Greifpositionen für einen Greifer gesucht wird, sondern alle theoretisch möglichen Greifpositionen für alle betrachteten Greiferarten ausgegeben werden.

### 4.2.3 Synthesephase

Ausgehend von den durch die Analysephase vorgegebenen Rahmenbedingungen und dem somit zulässigen Lösungsraum, generiert die Synthesephase mögliche Lösungen zur Umsetzung der Greifaufgabe. Sie umfasst die Bausteine Dimensionierung, Greifkraftberechnung, Konstruktion sowie bei mehreren Handhabungsobjekten den Flexibilisierungsalgorithmus. Ziel und Ergebnis der Synthesephase stellen fertig konstruierte, zulässige Greifergrundkörper-Wirkelementkombinationen dar. Zusätzlich werden die notwendigen Parameter für den sicheren Betrieb, wie beispielsweise der notwendige Unterdruck, ausgegeben. Für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Greifer umfasst die Ausgabe folgende Daten:

1. Mechanische Greifer: CAD-Daten der Wirkelemente, Art und Daten des Greifergrundkörpers und Betriebsparameter für das Greifersystem
2. Sauggreifer: Dimensionen und Daten des Saugers, CAD-Daten für den Greifergrundkörper und Betriebsparameter für das Greifersystem

Folgende sieben Greifergrundkörper-Wirkelement-Kombinationen werden im Rahmen der Arbeit betrachtet (vgl. auch *Abbildung 4-2*):

- Parallelbackengreifer mit planen Backen (PPC)
- Parallelbackengreifer mit prismatischen Backen (PVC)
- Winkelgreifer mit planen Backen (APC)
- Winkelgreifer mit prismatischen Backen (AVC)

- Vakuumgrundkörper mit runden Saugern (CSC)
- Vakuumgrundkörper mit rechteckigen Sauger (RSC)
- Vakuumgrundkörper mit ovalen Saugern (OSC)

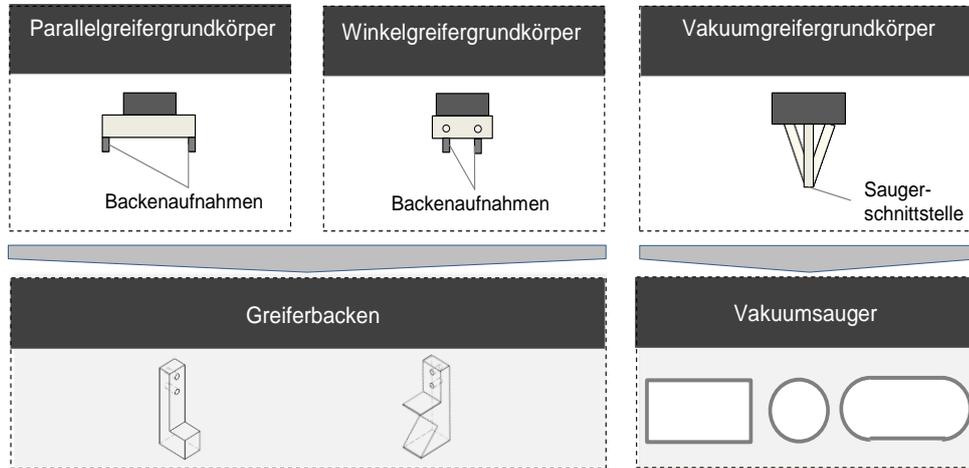


Abbildung 4-2: Im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Grundkörper-Wirkelement-Kombinationen

Die Greiferauslegung umfasst die Bausteine Dimensionierung und Greifkraftberechnung. Wie in *Abschnitt 2.2* beschrieben, stellt die Auslegung die Zusammenführung aller Rahmenbedingungen und die Basis für die spätere Auswahl eines Greifers dar. Kernelement der Auslegung ist sowohl die Beachtung von mechanischen Anforderungen (Greifkraft, Festigkeit der Backen, Festigkeit der Handhabungsobjekte) als auch von geometrischen Anforderungen (Geometrie und Dimensionen der vorhandenen Greifpositionen sowie Geometrie und Dimension der Wirkelemente). Im Folgenden soll auf die einzelnen Bausteine detaillierter eingegangen werden.

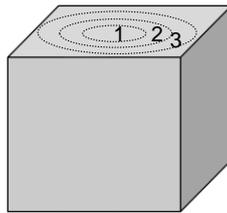
### Dimensionierung

Der grundsätzliche Ablauf der Dimensionierung gliedert sich für jede Greifposition in drei Schritte:

1. Prüfung, welche Art von Wirkelement zulässig ist
2. Dimensionierung der Wirkelemente unter Beachtung geometrischer bzw. Kollisionsrandbedingungen, der Belastung des Handhabungsobjektes, sowie der Wirkelemente durch Verknüpfung mit der Greifkraftberechnung
3. Ausgabe der Daten für die Konstruktion bzw. den Flexibilisierungsalgorithmus

Ein wichtiger Unterschied zu bestehenden Ansätzen besteht darin, dass nicht nur eine mögliche Lösung generiert wird, sondern alle theoretisch möglichen Lösungen. Es wird also für jede Greifposition jede Art von Wirkelement generiert, sofern dies unter Beachtung der jeweiligen Voraussetzungen möglich ist. Diese Herangehensweise stellt die Basis für den späteren Flexibilisierungsalgorithmus dar und erlaubt dem Nutzer gleichzeitig aus einem größeren Lösungsraum den finalen Greifer zu wählen.

Beispielhaft soll für den in *Abbildung 4-3* dargestellten Würfel ein Vakuumgreifer mit rundem Sauger definiert werden. Wie zu erkennen ist, können mehrere Saugergrößen auf der Oberfläche platziert werden. Die drei identifizierten Saugergrößen stellen somit mögliche Lösungen dar und werden in der sogenannten Dimensionsmatrix hinterlegt. Mit Hilfe der Greifkraftberechnung muss nun geprüft werden, ob die Lösungen unter den zuvor definierten Randbedingungen umsetzbar sind.



*Abbildung 4-3: Handhabungsobjekt zur beispielhaften Beschreibung der Methode*

### Greifkraftberechnung

Wie oben beschrieben, soll der vollständige Lösungsraum betrachtet werden. Dies bedeutet, dass für sämtliche im Rahmen der Dimensionierung generierten Lösungen die Greifkräfte berechnet werden müssen. Dabei wird unterschieden zwischen der notwendigen und der zulässigen Greifkraft. Die Berechnung erfolgt unter den in der Analysephase festgelegten Randbedingungen wie beispielsweise der auftretenden Beschleunigungen. Ist eine Greifkraft zulässig, so wird diese in der Dimensionsmatrix den dazugehörigen Wirkelementdimensionen zugeordnet. Bezogen auf das Beispiel von oben, soll angenommen werden, dass alle notwendigen Greifkräfte kleiner sind als die zulässigen Greifkräfte. Somit kann, wie in *Abbildung 4-4* schematisch dargestellt, die Dimensionsmatrix für die drei gefundenen Durchmesser mit der jeweils benötigten Druckdifferenz gefüllt werden.

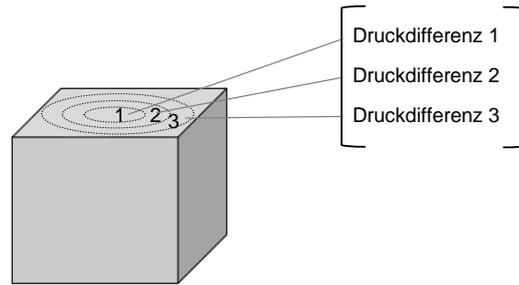


Abbildung 4-4: Beispielhafte Darstellung des Zustandekommens einer eindimensionalen Dimensionsmatrix

### Flexibilisierung

Die Zielsetzung des Flexibilisierungs-Bausteins der Synthesephase ist es, die Auslegungsdaten einer spezifischen Menge von Handhabungsobjekten auf Schnittmengen zu untersuchen und diese gegebenenfalls zu beschreiben. Ausgehend von einem Handhabungsobjekt-Spektrum wird somit versucht die Anzahl der für die Handhabung notwendigen Greifer zu reduzieren. Wichtige Parameter, die dabei verglichen werden müssen, sind geometrische Eigenschaften der Wirkelemente sowie die benötigten Greifkräfte. Das Ergebnis der Flexibilisierung stellen Greifer-Wirkelementkombinationen dar, welche analog zu denen der Auslegung modelliert werden. Greifer, die aus den Auslegungsdaten mehrerer Handhabungsobjekte entstanden sind, werden im Folgenden als *kombinierte Greifer* bezeichnet. Wie in *Abbildung 4-5* dargestellt, soll im Rahmen des Beispiels untersucht werden, ob und unter welchen Rahmenbedingungen Würfel A und Würfel B mit einem einzigen Vakuumgreifer gegriffen werden können. Dafür werden Dimensionsmatrizen der beiden Handhabungsobjekte untersucht und zulässige geometrische Abmaße interpoliert.

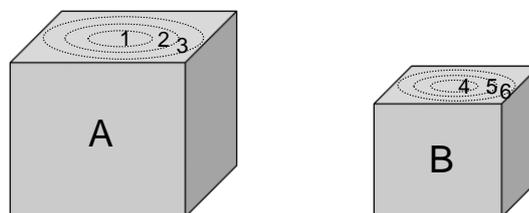


Abbildung 4-5: Handhabungsobjekte für die beispielhafte Beschreibung des Flexibilisierungsansatzes

Im vorliegenden Fall ist erkennbar, dass ein Sauger mit Durchmesser 3 aufgrund seiner Größe nicht auf dem Handhabungsobjekt B platziert werden kann. Es gibt somit keine Schnittmengen der Lösungen und Durchmesser 3 wird verworfen.

Durchmesser 1 und 2 liegen im Lösungsbereich der Durchmesser 4-6 (Lösungsbereich 1 und 2 können auf Lösungsbereich 4-6 abgebildet werden), sodass mittels Interpolation ermittelt werden kann, welche Druckdifferenzen für die neuen interpolierten Durchmesser nötig sind um beide Objekte handhaben zu können. Das hier beispielhaft dargestellte Vorgehen wird für alle Greiferarten und alle Oberflächen durchgeführt. Die dabei generierten kombinierten Greifer werden in einer sogenannten greiferartübergreifenden Kombinationsmatrix zusammengefasst, welche beschreibt, mit wie vielen Greifern die Greifaufgabe durchgeführt werden kann. Mittels linearer Optimierung wird anschließend die minimale Anzahl an benötigten Greifern ermittelt.

### Konstruktion

Die automatisierte Konstruktion stellt den Schritt dar, bei dem die bislang rein mathematisch-theoretisch betrachteten Greifersysteme in CAD-Daten überführt werden. Neben den durch die vorhergehenden Schritte vorgegebenen Rahmenbedingungen sowie Gestaltungsempfehlungen für Greifer, gilt es auch klassische Konstruktionsrichtlinien zu beachten. Ein Beispiel dafür ist die Fertigbarkeit der zu konstruierenden Elemente sicherzustellen.

#### **4.2.4 Bewertungsphase**

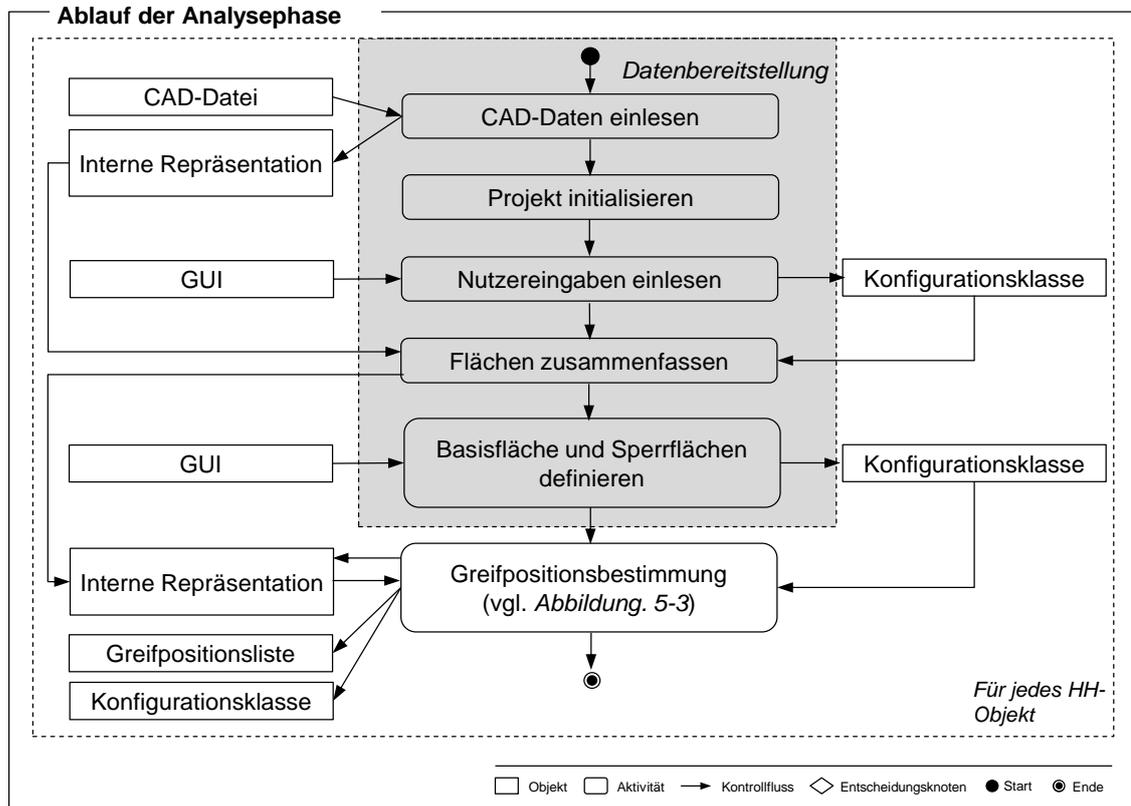
Um im generierten Lösungsraum die beste Lösung zu identifizieren, wurden im Rahmen der Arbeit Metriken zur Bewertung der Ausgabedaten der Methode bestimmt. Anhand von Gütemaßen, welche beschreiben, wie gut eine spezifische Metrik erfüllt wird, ist es möglich Greifersysteme miteinander zu vergleichen. Basierend auf diesen Informationen ist es dem Nutzer möglich eine Entscheidung bezüglich der favorisierten Lösung zu treffen.

#### **4.2.5 Realisierungsphase**

Die Überführung des Greifers in die physische Welt erfolgt zweistufig. In einem ersten Schritt werden die Fertigungsteile (Greifergrundkörper Vakuumbreifer und Backen mechanische Greifer) additiv hergestellt und die Zukaufteile (Vakuumsauger, Greifergrundkörper mechanische Greifer und zusätzlich benötigte Montageelemente) beschafft. Im zweiten Schritt kann das Greifersystem anschließend montiert werden.

## 5 Analysephase

Die Analysephase gliedert sich in zwei große Bausteine. Zum einen die Datenbereitstellung durch den Nutzer, zum anderen die daran anschließende Greifpositionsbestimmung. Den Ablauf der Analysephase zeigt *Abbildung 5-1*.



*Abbildung 5-1: Ablauf der Analysephase*

Im ersten Schritt wird die CAD-Datei vom betrachteten Handhabungsobjekt eingelesen und in eine interne Repräsentation umgewandelt, damit die folgenden Schritte des Ablaufes unabhängig vom eingelesenen Datenformat durchgeführt werden können. Ausgehend davon wird das Projekt initialisiert, dies bedeutet, dass eine Datenstruktur erstellt wird, in welche die Nutzereingaben eingelesen werden und dem Handhabungsobjekt zugeordnet werden können. Mittels der GUI kann der Nutzer anschließend die für die weiteren Schritte notwendigen Eingaben tätigen. Abgespeichert werden die Nutzereingaben in der sogenannten Konfigurationsklasse. Im nächsten Schritt werden ähnliche Oberflächen des Handhabungsobjektes unter Verwendung der Randbedingungen aus der Konfigurationsklasse zusammengefasst. Danach ist es dem Nutzer möglich Flächen mit besonderen Eigenschaften zu definieren.

Diese Schritte stellen die Basis für die Greifpositionsbestimmung dar, welche in *Abschnitt 5.2* ausdetailliert wird. Die Ergebnisse der Greifpositionsbestimmung sowie die Inhalte der Konfigurationsklasse werden für die anschließende Synthesephase bereitgestellt.

Sollen mehrere Objekte gehandhabt werden, so muss der Prozess für jedes Objekt einzeln durchlaufen werden.

## 5.1 Datenbereitstellung

### 5.1.1 Einlesen der CAD-Daten von Handhabungsobjekten

Ziel des Einlesevorgangs ist es, die CAD-Daten in eine interne, für die weiteren Schritte verwendbare Repräsentation, zu überführen. Dieser Prozess ist stark abhängig vom gewählten Format welches eingelesen wird. Folgende Informationen müssen nach diesem Schritt vorhanden sein:

1. Form und Größe aller Oberflächen
2. Normalen aller Oberflächen
3. Position aller Oberflächen

Aufgrund des Einflusses auf die Implementierung soll im Folgenden auf zwei der gängigsten Formate zum Austausch von CAD-Daten eingegangen werden: STEP (Standard for the Exchange of Product model data) und STL (Stereo Lithography).

Die DIN EN ISO 10303, in welcher STEP definiert ist, stellt bereits seit den 1990er Jahren eine wichtige Standardisierung für den Austausch von Produktdaten dar. STL dagegen stellt ein Format dar, welches für den Austausch von Daten im Bereich der additiven Fertigung geschaffen wurde. Einer der Hauptunterschiede zwischen den zwei Formaten besteht in der Art wie Körper modelliert werden. Während STEP Körper mittels eines Begrenzungsflächenmodells (Boundary-representation model) beschreibt, nutzt STL ein einfaches Netzmodell wobei die Oberflächen mit Dreiecksfacetten beschrieben werden.

Ausgehend davon ergeben sich folgende Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl des Ausgangsformats beachtet werden müssen:

*Tabelle 5-1: Vergleich der Datenformate STEP und STL*

STEP	STL
+ Exakte Darstellung geometrischer Körper	- Approximation geometrischer Körper mittels Dreiecksfacetten
- Komplexe Modellierung von Geometrien	+ Einfache Modellierung von Geometrien
- Interpretation der Daten nicht immer eindeutig	+ Interpretation der Daten eindeutig
+ Unterstützung erweiterter Metadaten	- Keine Unterstützung erweiterter Metadaten
+ Modellierung von Teil-Bauteilen möglich	- Keine Modellierung von Teil-Bauteilen möglich
- Weiterverarbeitung der Daten aufwendig	+ Weiterverarbeitung der Daten einfach

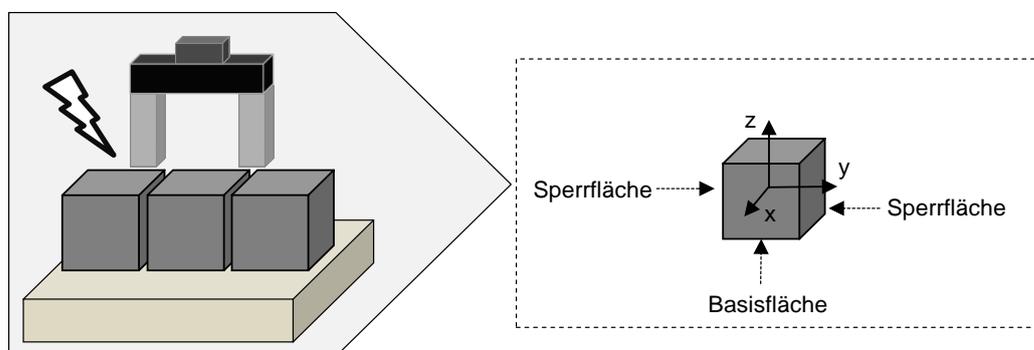
Grundsätzlich ist die Verwendung beider Datenformate für die Greifpositionsbestimmung möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Vorgehen für beide Formate implementiert. Die Erfahrungen daraus zeigen, dass STL aufgrund seiner einfacheren Struktur STEP vorzuziehen ist und die Repräsentation der Oberfläche für eine Greifpositionsbetrachtung ausreichend ist. Die Ungenauigkeit des Formates kann entweder vernachlässigt werden oder durch entsprechende Anpassungen bei der Auslegung (Toleranzen) abgefangen werden. Bei einer Implementierung für das STL-Format gilt es zu beachten, dass Zusatzinformationen (wie beispielsweise die Lage des Schwerpunktes oder Materialinformationen) in einem weiteren Schritt (manuell) ergänzt werden müssen. Des Weiteren muss aufgrund der Struktur von STL vor der eigentlichen Greifpunktsuche eine Vereinigung der Dreiecksfacetten durchgeführt werden, um greifbare Flächen zu generieren.

### 5.1.2 Einlesen von Nutzereingaben

Basierend auf Fragebögen, wie sie auch in der Industrie verwendet werden, erfasst das Programm vom Nutzer eine Reihe von Rahmenbedingungen. Neben umweltspezifischen Parametern, wie beispielsweise dem Verschmutzungsgrad der Umgebung, werden insbesondere Prozessspezifika, wie die zu erwartenden Beschleunigungen abgefragt. Des Weiteren werden Kriterien abgefragt, welche bestimmte Arten von Greifern oder Wirkelementen ausschließen. Beispiele hierfür ist die Verwendung des Greifers in explosionsgefährdeten Umgebungen, was zu einem Ausschluss von elektrisch angetriebenen Greifern führt (vgl. *Abschnitt*

2.1.3). Eine vollständige Auflistung aller abgefragten Parameter findet sich in *Anhang A.1*.

Nach dem Hochladen der CAD-Daten ist es, je nach verwendetem Dateiformat, nötig diese noch mit Zusatzinformationen zu ergänzen. Wichtige Parameter sind dabei die Masse, der Massenschwerpunkt sowie das Material des Handhabungsobjektes. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch Definition von Sperrflächen die Bereitstellungs- bzw. Ablegepose oder mögliche Bearbeitungs-, Montage- oder Spannvorgänge am Handhabungsobjekt zu modellieren. Sind diese Informationen durch entsprechende Modellierung bereits in den CAD-Daten hinterlegt kann dieser Schritt auch automatisiert erfolgen. Des Weiteren wird jedem eingelesenen Handhabungsobjekt eine Nummer zur Identifikation zugewiesen. Eine Herausforderung bei der Verarbeitung geometrischer Daten stellt die Schnittstelle zum Nutzer hinsichtlich des verwendeten Koordinatensystems dar. Dies ist beispielsweise wichtig, um später in der Synthesephase die Richtung angreifender externer Kräfte auf das Handhabungsobjekt angeben zu können. Im Rahmen der Analysephase muss deshalb, basierend auf den Angaben des Nutzers, eine Anpassung des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems erfolgen, um für die nachfolgenden Schritte eine stringente Datenstruktur zu erhalten. Durch die Festlegung einer Basisfläche durch den Nutzer wird die Orientierung des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems vorgegeben (vgl. *Abbildung 5-2*). Die Position des Ursprungs des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems muss des Weiteren in den Schwerpunkt des Handhabungsobjektes verschoben werden. Mit der so angelegten Datenstruktur sind alle weiteren Schritte der Auslegung inklusive Flexibilisierung und Auswahl durchführbar und eindeutig.



*Abbildung 5-2: Definition von Sperr- und Basisfläche(n) zur Modellierung von Handhabungsprozessen*

Folgende Bedingungen gelten für die oben genannten Flächen:

### Basisfläche:

- Die z-Achse des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems wird senkrecht zur Basisfläche ausgerichtet
- Anfahrriichtung immer senkrecht zur Basisfläche
- Unterliegt gegebenenfalls Einschränkungen von Sperrflächen (vom Nutzer festgelegt)

### Sperrfläche:

- Entnimmt dem Lösungsraum Flächen, welche beispielsweise durch Hindernisse oder Montagevorgänge nicht zugänglich sind
- Anfahrriichtung mit der Orientierung des Normalenvektors der Fläche ist gesperrt
- Parallel zu den Sperrflächen liegende Flächen werden für mechanische Greifer gesperrt

## 5.2 Greifpositionsbestimmung

Als zentraler Prozess der Analysephase erstellt die Greifpositionsbestimmung die Basis für die Prozessschritte der folgenden Phasen. Da die Planung von Greifoperationen und somit die Suche nach Greifpositionen schon ein verhältnismäßig gut erforschtes Feld ist, wird auf den Prozess der Suche nur kurz eingegangen. Der Fokus liegt vielmehr auf der Verwendung der generierten Daten. Wichtige, für das Verständnis des folgenden Kapitels notwendige Begriffe, können dem *Glossar* entnommen werden.

Eine Greifposition besitzt folgende Attribute:

ID: Um jede Greifposition eindeutig zuordnen zu können wird eine spezifische Nummer zugeteilt.

Greiferart: Beschreibt die Art der für die Greifposition zugeordneten Greifer

Geometrie: Enthält Informationen zur geometrischen Gestalt der Greifposition:

- Greifpunkt, auf welchem die Greifposition beruht (in der geometrischen Mitte der Kontaktstelle)
- Greifpunktnormale, welche die Orientierung der Kontaktstelle beschreibt

- Kontaktstelle, welche die geometrische Zusammenfassung mehrerer Oberflächensegmente darstellt. Diese besitzen ähnliche oder gleiche Normalen welche, in einer Ebene liegen.
- Freies Volumen, das den orthogonalen Abstand der Kontaktstelle zur nächsten Störkontur innerhalb eines Handhabungsobjektes beschreibt

Vakuumbreifern werden pro Greifposition je eine Kontaktfläche zugeordnet, mechanischen Greifern jeweils zwei. Kontaktstellen können als Kontaktpunkt, Kontaktlinie oder Kontaktfläche ausgeprägt sein. Für Vakuumbreifer sind aufgrund ihrer physischen Gestalt und Funktionswirkung nur Kontaktflächen zulässig.

Die große Menge an theoretisch zu betrachtenden Greifpositionen stellt eine Herausforderung für eine performante Gestaltung des Algorithmus dar. Eine Lösung dafür ist die Verwendung entsprechender Algorithmen (beispielsweise Greedy Algorithmen), welche ausgehend von einer Bewertungsfunktion die Flächen analysieren. Für die Greifpositionsbestimmung bietet es sich an zuerst Kontaktstellen um den Bereich des (Flächen-) Schwerpunktes zu analysieren und an die Auslegung zu übergeben. Die Verwendung genannter Algorithmen kann einen Verlust an möglichen Lösungen bedeuten, was gegenüber der Performanz des Algorithmus abzuwägen ist.

Ausgehend von den in *Abbildung 5-1* beschriebenen Vorgängen zur Generierung einer internen Repräsentation und einer Konfigurationsklasse kann die eigentliche Greifpositionsbestimmung (vgl. *Abbildung 5-3*) durchgeführt werden. Die Konfigurationsklasse liefert die Randbedingungen, unter welchen die Suche stattfinden soll. Ein Beispiel für den Inhalt der Konfigurationsklasse stellt die vom Nutzer tolerierte Krümmung dar, bis zu welcher eine Fläche noch für die Positionierung eines Greifers zugelassen wird. Im Rahmen der Oberflächenanalyse prüft der Algorithmus für welche Art von Greifer die jeweilige Fläche geeignet ist (vgl. *Abschnitt 5.2.1 und 5.2.2*). Für jede Fläche durchläuft der Algorithmus die interne Repräsentation und füllt diese mit Daten für die spätere Auswahl. Zur Sicherstellung eines sicheren Griffes muss für mechanische Greifer eine Angleichung der Partner-Kontaktflächen erfolgen. Dies bedeutet, dass die Kontaktflächen der beiden Backen geometrisch aufeinander abgestimmt werden, um eine symmetrische Backengestalt zu erhalten. Für prismatische Backen werden in diesem Schritt die für die Auslegung nötigen Zusatzinformationen ermittelt (vgl. *Abschnitt 5.2.2*)

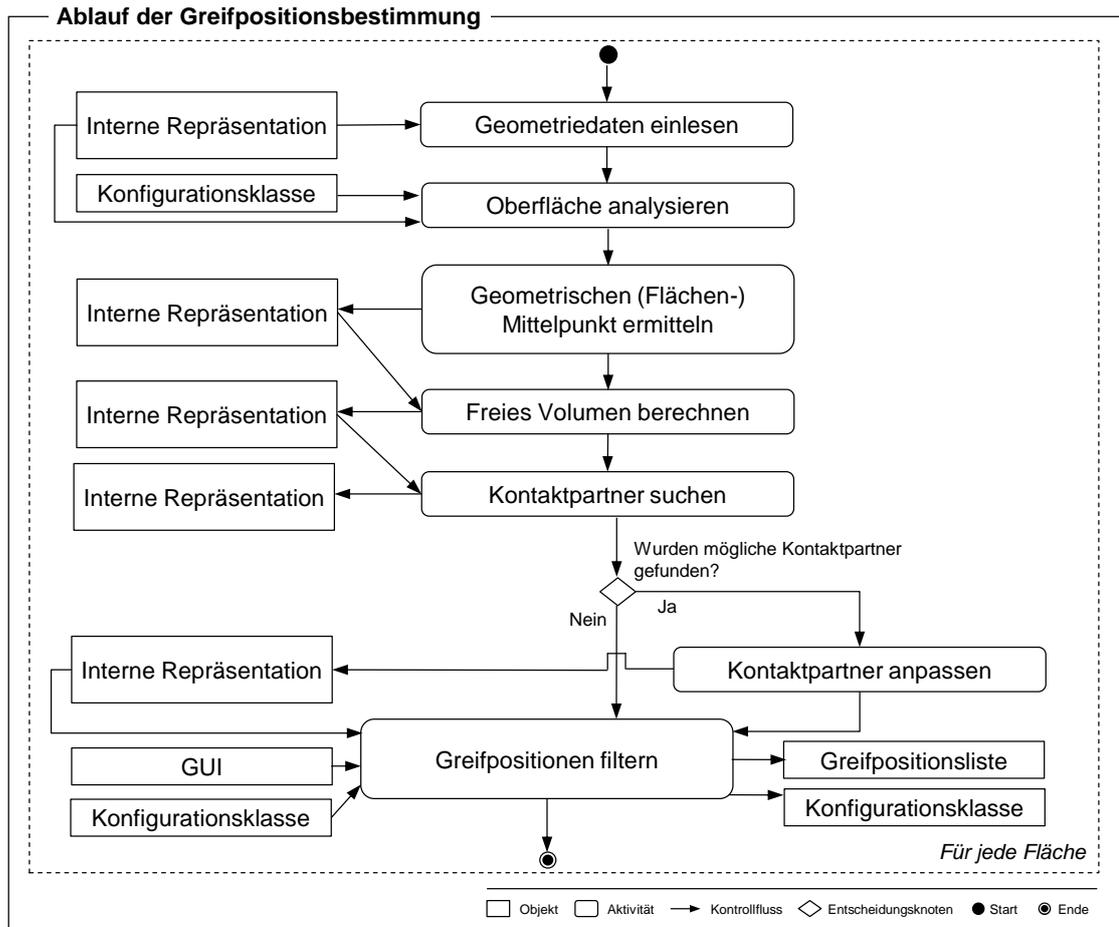


Abbildung 5-3: Ablauf der Greifpositionsbestimmung auf Oberflächen von Handhabungsobjekten

### 5.2.1 Bestimmung von Greifpositionen für mechanische Greifer

In der Literatur werden verschiedenste Greifkonfigurationen beschrieben, welche theoretisch mit mechanischen Greifern realisierbar sind (STETTER 1994, WEEKS 1997). Fälle wie beispielsweise Fläche-Kante oder Kante-Punkt Konfigurationen sind aufgrund ihrer Instabilität für die industrielle Anwendung nur bedingt geeignet. Entsprechend realisiert das hier beschriebene Verfahren nur Fläche-Fläche Konfigurationen bzw. Linienkontakte bei prismatischen Greifbacken, auch wenn die Detektion anderer Konfigurationen basierend auf den Eingangsdaten möglich wäre.

Für die Konfigurationen von zwei Kontaktstellen für mechanische Greifer müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Die Kontaktstellen müssen gegenüber liegen (Normalenvektoren entgegengesetzt gerichtet)
- Die Kontaktstellen müssen parallel sein
- Die Kontaktstellen müssen eben sein
- Bei Projektion in die Greifebene (die parallel zu den Kontaktstellen in der Mitte liegende Ebene) muss eine geometrische Schnittmenge zwischen den Kontaktstellen der beiden Greifbacken existieren
- Die Normalenvektoren des Greifpunktes müssen senkrecht zur z-Achse des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems ausgerichtet sein

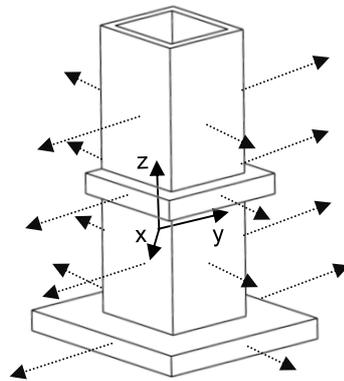


Abbildung 5-4: Greifpositionen für einen Außengriff mit mechanischen Greifern unter Annahme eines Anfahrvorganges in negativer z-Richtung

Folgende weiteren Parameter müssen für die Auslegung zu den Kontaktflächen Konfigurationen ausgelesen werden:

- Abstand der Kontaktflächen
- Größe der Kontaktflächen
- Position der Kontaktflächen

### Sonderfall prismatische Backen:

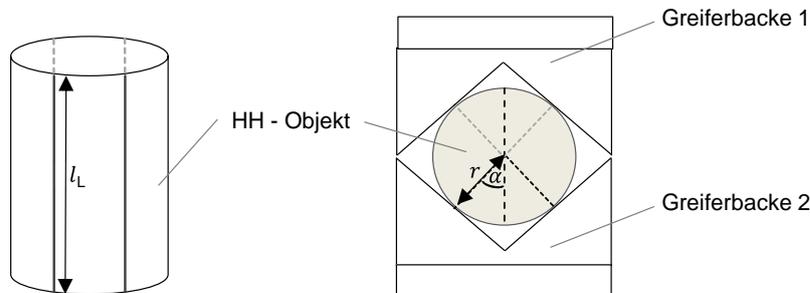
Für die Handhabung zylindrischer Handhabungsobjekte sind prismatische Backen zu bevorzugen. Für die Auslegung entsprechender Wirkelemente wurde das Verfahren nach PEDRAZZOLI ET AL. (2001) ausgewählt.

Folgende Kriterien müssen für eine Kontaktstellen-Konfiguration bei prismatischen Wirkelementen zutreffen:

- Es müssen vier Linienkontakte vorliegen, welche symmetrisch um den Zylinder angeordnet sind.
- Die Normalenvektoren der beiden Kontaktlinien müssen auf der Gegenseite (der zweiten Backe) jeweils einen Partnervektor besitzen, welche entgegengesetzt aber richtungsgleich ist.
- Die Kontaktlinien müssen eben sein.
- Die Kontaktlinien müssen parallel sein.
- Bei einer Projektion der Kontaktlinien in die Greifebene müssen alle Linienkontakte eine geometrische Schnittmenge besitzen.
- Die Linienkontakte müssen je nach Orientierung des Prismas (vgl. Kapitel 6) senkrecht oder parallel zur z-Achse des Koordinatensystems des Handhabungsobjektes ausgerichtet sein.

Um prismatische Backen auslegen zu können, werden zusätzlich die in *Abbildung 5-5* visualisierten Parameter benötigt:

- Winkel  $\alpha$
- Radius  $r$
- Länge der Kontaktlinie  $l_L$



*Abbildung 5-5: Bestimmung der für die Auslegung prismatischer Backen benötigter Parameter nach PEDRAZZOLI ET AL. (2001)*

Der Winkel  $\alpha$  darf maximal  $90^\circ$  betragen, da sonst die Backen kollidieren würden. Als Greifpunkt wird der geometrische Mittelpunkt zwischen den Kontaktlinien auf der Handhabungsobjekt-Oberfläche angegeben.

### 5.2.2 Bestimmung von Greifpositionen für Vakuumgreifer

Aufgrund ihrer Bauart benötigen Vakuumgreifer nur eine Kontaktstelle und sind im Normalfall nur für Flächenkontakte geeignet. Folgende Kriterien müssen in Anlehnung an SDAHL (2006) erfüllt sein, damit eine Kontaktstelle für einen Vakuumgreifer geeignet ist:

- Die Normale des Greifpunktes muss in positive z-Richtung des Handhabungsobjekt-Koordinatensystems gerichtet sein, um eine Anfahrbarkeit gewährleisten zu können.
- Das freie Volumen muss unendlich betragen (ebenfalls, um eine Anfahrbarkeit zu gewährleisten)
- Der Normalenvektor muss nach außen orientiert sein
- Die Krümmung der Fläche darf eine vom Nutzer festgelegte Grenze nicht überschreiten.

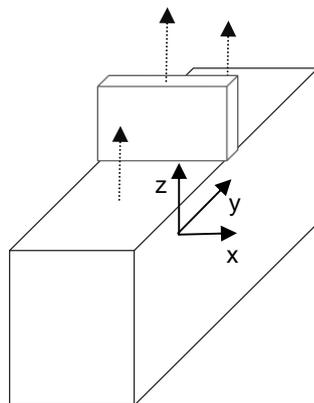


Abbildung 5-6: Greifpositionen für einen Griff mit Vakuumgreifern unter Annahme eines Anfahrvorganges in negativer z-Richtung

### 5.2.3 Filtern von Greifpositionen

Vor der Ausgabe der Ergebnisse aus der Greifpositionsbestimmung werden die Daten nochmals gefiltert. Wie bereits in den vorherigen Schritten, steht die Greifpositionsbestimmung dabei im Spannungsfeld zwischen (unnötig) großen Datenmengen und der Vollständigkeit des Lösungsraumes.

Den wichtigsten Teil bei der Filterung stellt der Ausschluss von Flächen dar, welche aufgrund funktionseller Ausschlusskriterien nicht weiter berücksichtigt werden sollen.

Dazu zählen insbesondere:

- Flächen, die aufgrund eines begrenzten freien Volumens nicht anfahrbar sind
- Sämtliche Sperrflächen
- Überschreitung von vom Nutzer vorgegebenen Grenzen (bspw. Krümmung der Fläche)

Der Filterschritt bietet außerdem für den Nutzer eine Möglichkeit den Lösungsraum hinsichtlich spezifischer Präferenzen zu beschränken. So ist es beispielsweise möglich komplette Greiferarten für die weitere Bearbeitung auszuschließen, oder nur eine gewisse Anzahl von Greifpositionen an die Auslegung weiterzugeben.

### **5.2.4 Aufbereitung von Daten für die Weiterverarbeitung**

Um eine reibungslose Übergabe der Daten an die nachfolgende Auslegung zu ermöglichen, muss ein möglichst allgemeines Ausgabeformat gewählt werden. So ist es möglich die Auslegung unabhängig von der Greifpositionsermittlung weiterzuentwickeln oder die Daten anderweitig zu verwenden. Im vorliegenden Fall herrscht eine starke Verbindung zwischen der GUI, welche mit dem Nutzer interagiert und der eigentlichen Greifpositionsermittlung. Ausgehend davon ist es zielführend zwei Dateien für die nachfolgenden Schritte bereitzustellen:

1. Konfigurationsklasse: Diese enthält alle globalen Informationen, welche das Projekt betreffen. Dabei handelt es sich insbesondere um Nutzereingaben.
2. Greifpositionsliste: In dieser Datei werden spezifisch für ein Handhabungsobjekt alle Greifpositionen sowie Zusatzinformationen wie beispielsweise die Geometriedaten des Hüllkörpers weitergegeben.

Durch diese Aufteilung können auf eine Projektdatendatei mehrere Greifpositionslisten entfallen. Die Parameter der Greifpositionsliste können Anhang A.2 entnommen werden.



## 6 Synthesephase

Dieses Kapitel thematisiert in zwei Teilen die Kernbausteine der Synthesephase anhand von Ablaufdiagrammen und Berechnungsvorschriften. Im ersten Teil werden die Auslegung von Greifersystemen und die darauf folgende automatisierte Konstruktion beschrieben. Die Auslegung beinhaltet die Dimensionierung und die Greifkraftberechnung. Grundlegende Zusammenhänge des hier beschriebenen Vorgehens wurden bereits in SCHMALZ ET AL. (2016) vorgestellt. Der zweite Teil widmet sich dem letzten Baustein der Synthesephase und beschreibt den Algorithmus zur Steigerung der Flexibilität von Greifersystemen.

Die folgenden Abschnitte gliedern sich jeweils in eine kurze Darstellung des Ablaufes, gefolgt von einer Beschreibung der dafür nötigen Berechnungen und Strukturen.

### 6.1 Grundlagen des Auslegungsvorgehens

Das Ziel der Auslegung besteht darin, geometrisch zulässige, den mechanischen Anforderungen genügende Elemente des Greifers zu gestalten. Das Handhabungsobjekt stellt dabei das Zentrum dar, von welchem gestartet wird. Basierend auf den Schnittstellen zwischen Handhabungsobjekt und Wirkelementen werden die Dimensionen der Wirkelemente und die notwendigen Greifkräfte bestimmt. Anschließend werden alle anderen Parameter zur Umsetzung dieser Schnittstelle abgeleitet bzw. angepasst.

Im ersten Schritt der Auslegung werden die Greifpositionen analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für eine spezifische Greiferart geprüft (vgl. *Abschnitt 5.2*). Bei Oberflächen(-paaren), die eine plane Oberfläche besitzen oder eine vom Nutzer vorgegebene Krümmung nicht überschreiten, werden Vakuum- bzw. mechanische Greifer mit planen Backen initialisiert. Liegen gekrümmte bzw. zylindrische Oberflächenpaare vor, werden prismatische Backen initialisiert.

Zum besseren Verständnis wird der grundsätzliche Ablauf der Auslegungsalgorithmen in *Abbildung 6-1* visualisiert. Basierend auf einer wirkelement- und greiferspezifischen Initialisierung der Datenstruktur wird der Lösungsraum der Dimensionierung aufgespannt. Mittels der Greifkraftberechnung und anderer Rahmenbedingungen wird der Lösungsraum im Anschluss unter Verwendung von Dimensionsmatrizen für jede Greifposition definiert. Ausgehend von der größt-

möglichen, auf der Kontaktstelle und im freien Volumen positionierbaren Dimension des Wirkelements, werden die Dimensionen iterativ reduziert. Diese Reduktion findet so lange statt, bis kein sicherer Griff mehr möglich ist, das Wirkelement den Belastungen nicht mehr Stand hält, oder vom Nutzer vorgegebene Grenzen erreicht werden. Die Schrittweite (Diskretisierung) der Dimensionierung wird vom Nutzer vorgegeben und in der sogenannten Konfigurationsklasse abgespeichert. Diese wird von der Analysephase übergeben.

Die maximale Ausdehnung der Kontaktstelle wird unter Abzug eines vom Nutzer definierten Sicherheitsfaktors  $S_K$  bestimmt. Das soll möglichen Ungenauigkeiten des Handhabungsgerätes, des Prozesses oder des Handhabungsobjektes entgegenwirken. So wird beispielsweise bei Saugern ein Herausragen über Kanten des Handhabungsobjektes vermieden, wodurch kein Vakuum aufgebaut werden könnte.

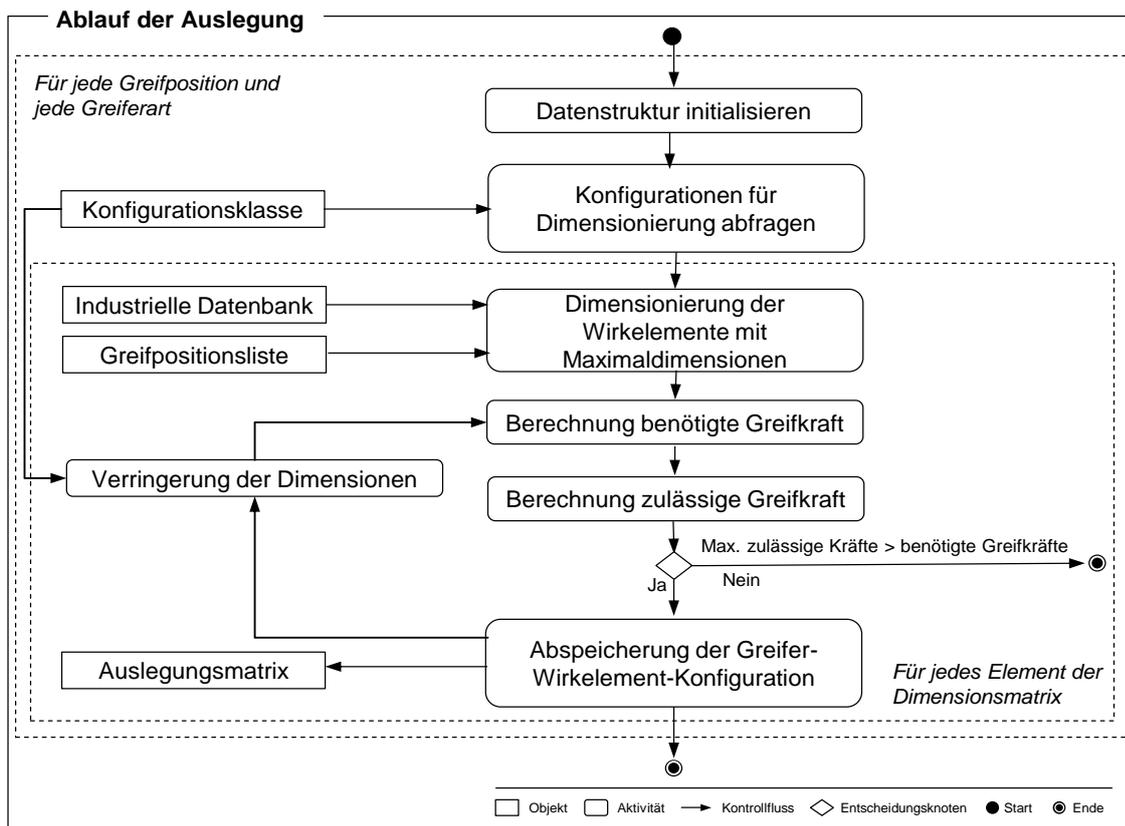


Abbildung 6-1: Grundsätzlicher Ablauf der Auslegungsalgorithmen

Vakuumsauger werden nur in bestimmten Größen industriell hergestellt. Dies sollte bei Wahl der Diskretisierungsschritte für die Dimensionierung bedacht werden. Entsprechend verursacht eine zu kleine Diskretisierung unnötig viele

Daten, welche später mangels industriell erhältlicher Sauger teilweise nicht umgesetzt werden können.

Aufgrund der Abhängigkeit von industriell verfügbaren Elementen zur Umsetzung der Handhabungsaufgabe stellt die Einbindung einer industriellen Datenbank (vgl. *Abbildung 4-1*) einen wichtigen Baustein dar. Wichtige, für die Auslegung benötigte Daten sind:

- Daten der Grundkörper von mechanischen Greifern
- Daten der Wirkelemente (Sauger) von Vakuumgreifern sowie deren zugeordnete Zusatzelemente

Neben der reinen Informationsbereitstellung zu industriell verfügbaren Elementen kommt der Datenbank noch eine weitere wichtige Aufgabe zu. So werden basierend auf den Nutzereingaben (vgl. Kapitel 5) bestimmte Filter gesetzt, die anhand einer Vorauswahl den Lösungsraum einschränken. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der vom Nutzer angegebene Temperaturbereich den zulässigen Bereich bestimmter Saugermaterialien überschreitet. Die von der Datenbank benötigten Daten können Anhang A.3 entnommen werden.

## 6.2 Vorgehen für die Dimensionierung von Greifersystemen

Im Rahmen der Dimensionierung werden die geometrischen Abmaße der Wirkelemente festgelegt. Jede generierte (Teil-)Lösung muss dabei den Nebenbedingungen nach RÖHRDANZ (1997) genügen:

1. *Gültigkeit des Griffes*, d.h. Überlappung zwischen den Greifmerkmalen des zu greifenden Objektes und den Greifmerkmalen der Wirkelemente.
2. *Kollisionsfreiheit eines Griffes*, d. h. keine Kollisionen zwischen Greifer und gegriffenem Objekt
3. *Zugänglichkeit eines Griffes*, d. h. der Griff ist für den Greifer kollisionsfrei erreichbar

### 6.2.1 Vakuumgreifer

*Abbildung 6-2* zeigt den grundsätzlichen Ablauf der Dimensionierung und Auslegung von Vakuumgreifern. In einem ersten Schritt werden dabei ausgehend von den Rahmenbedingungen aus der Konfigurationsklasse und der Greifpositio-

nen die Dimensionsmatrizen initialisiert. Unter Verwendung dieser Matrizen lassen sich anschließend die notwendigen Greifkräfte berechnen (vgl. *Abschnitt 6.3.2*).

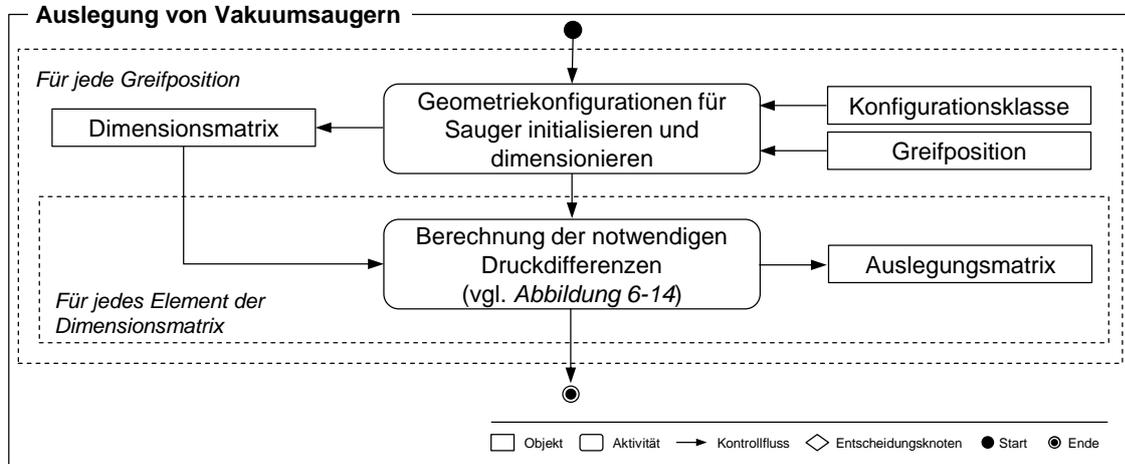


Abbildung 6-2: Ablaufdiagramm für die Auslegung von Vakuumgreifern

Die in dieser Arbeit betrachteten Ausprägungen von Vakuumsaugern können anhand der Abmessungen in *Abbildung 6-3* beschrieben werden. Die y-Achse des lokalen Greifpositions-Koordinatensystems ist bei rechteckigen Saugern immer in Richtung der längeren Seite ausgerichtet. Bei ovalen Saugern kann die Ausrichtung in beide Achsrichtungen erfolgen.

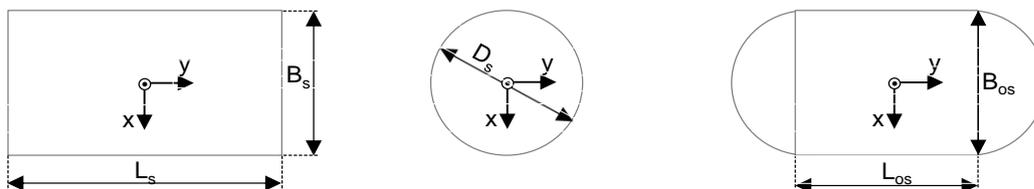


Abbildung 6-3: Nomenklatur für die Dimensionierung von Vakuumsaugern

Die Höhe des Saugers und sein Anschlussmaß stellen weitere wichtige Daten dar (CARDAUN 1981). Dies sind spezifische Daten der industriellen Saugerlösung und werden deshalb aus der industriellen Datenbank entnommen.

*Abbildung 6-4* zeigt beispielhaft die Struktur der Dimensionsmatrix eines rechteckigen Saugers. Die einzelnen Elemente der Matrix geben die für die jeweilige Geometriekombination notwendige Druckdifferenz ( $\Delta p_{ij}$ ) an. Ein „x“ bedeutet, dass die jeweilige Kombination nicht darstellbar ist, beispielsweise weil die zulässige Greifkraft überschritten würde. Die Indizes der Längen und Breiten des Saugers in *Abbildung 6-4* beschreiben abstrahiert den aufgespannten Lösungs-

raum. Max und min stellen dabei die geometrischen Grenzen der Abmaße des Saugers bei der Platzierung auf einer Kontaktstelle dar. Weitere Ausprägungen der Dimensionsmatrizen von Sauggreifern (runde Vakuumsauger und ovale Vakuumsauger) finden sich in *Anhang A.4*.

	$L_{Smax}$	$L_{S2}$	$L_{S3}$	$L_{Smin}$
$B_{Smax}$	$\Delta p_{min}$	$\Delta p_{12}$	$\Delta p_{13}$	$\Delta p_{14}$
$B_{S2}$	$\Delta p_{21}$	$\Delta p_{22}$	x	x
$B_{S3}$	$\Delta p_{31}$	x	x	x
$B_{Smin}$	x	x	x	x

Abbildung 6-4: Struktur der Dimensionsmatrix von rechteckigen Vakuumsaugern

### 6.2.2 Mechanische Greifer

Wie in *Abbildung 6-5* visualisiert, beginnt auch die Auslegung und Dimensionierung von mechanischen Greifern mit einer Initialisierung der Geometrieconfigurationen. Dafür werden neben den Daten aus der Greifpositionsbestimmung auch die benötigten Informationen aus der Konfigurationsklasse ausgelesen.

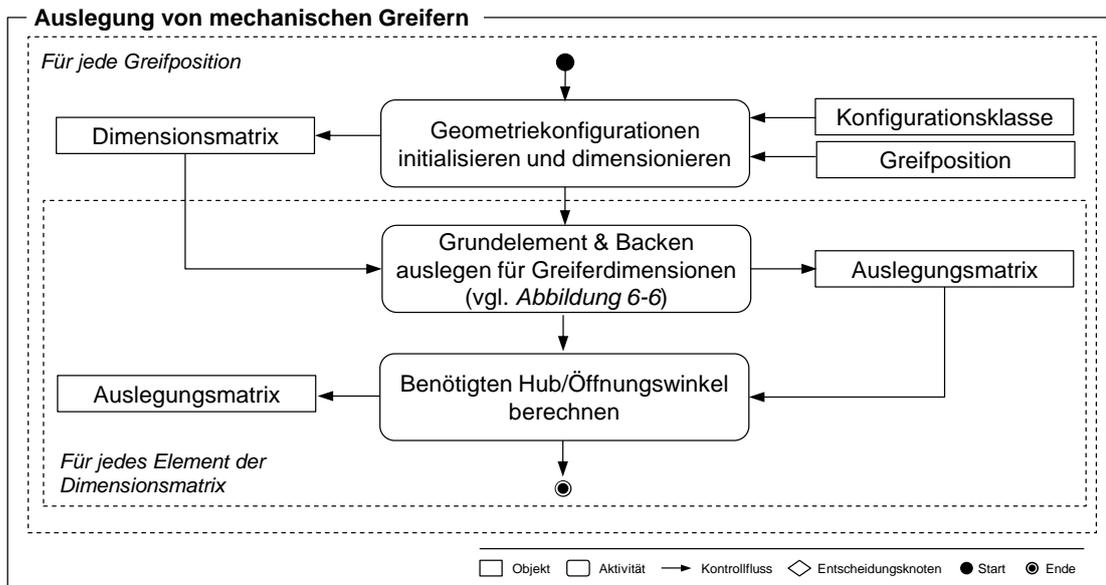
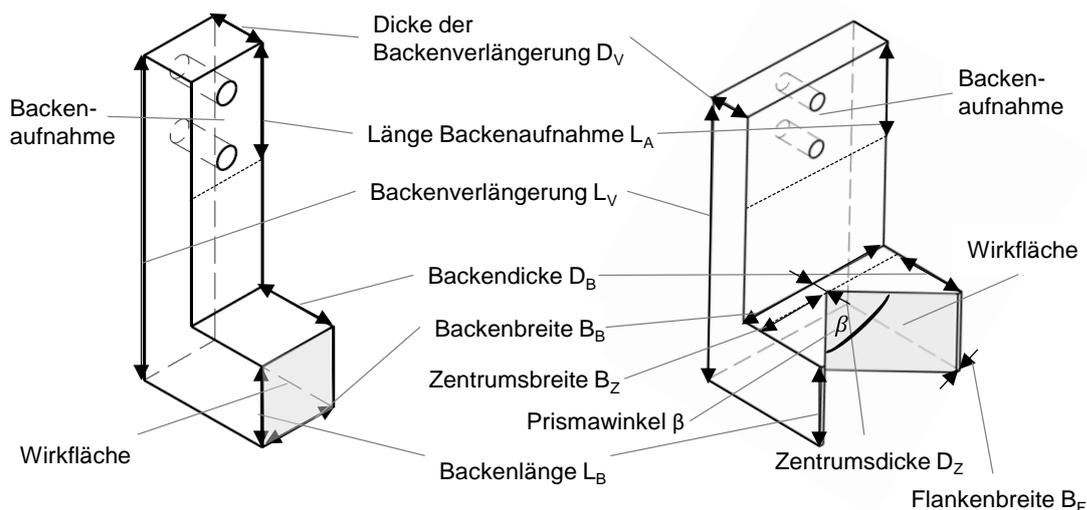


Abbildung 6-5: Ablaufdiagramm für die Auslegung von mechanischen Greifern

*Abbildung 6-7* beschreibt den Kernprozess der Auslegung und Dimensionierung, bei welchem mögliche Kombinationen aus Greifergrundkörper und Wirkelemen-

ten definiert werden. Ausgehend von den zu untersuchenden Backendimensionen, die im Schritt zuvor (vgl. *Abbildung 6-5*) generiert wurden, wird die nötige Greifkraft berechnet. Anschließend werden unter Verwendung der Backendimensionen die zulässigen Kräfte auf das Handhabungsobjekt geprüft. Sind sie zulässig, werden aus der industriellen Datenbank mögliche Greifergrundkörper mit entsprechenden Greifkraftprofilen und geometrischen Größen ausgelesen. Sind passende Greifer ermittelt, so werden deren Backenschnittstellen in die Auslegung übernommen. Diese Informationen ermöglichen es, die Backen final zu definieren und gleichzeitig eine abschließende Festigkeitsprüfung durchzuführen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden plane und prismatische Backen betrachtet. *Abbildung 6-6* zeigt die notwendigen geometrischen Parameter zur Beschreibung dieser Backen.



*Abbildung 6-6: Nomenklatur für die Dimensionierung von planen (links) und prismatischen (rechts) Greiferbacken*

Bis auf die Berechnung des notwendigen Hubes kann die Dimensionierung von Winkel- und Parallelgreiferbacken analog erfolgen. Grundsätzlich bestehen Greiferbacken aus drei Teilen:

1. Backe mit Wirkfläche, welche den Kontakt zum Handhabungsobjekt herstellt,
2. Backenverlängerung, welche die Distanz zwischen Wirkfläche und Greifergrundkörper überbrückt und

3. Backenaufnahme, welche die Schnittstelle zum Greifergrundkörper darstellt.

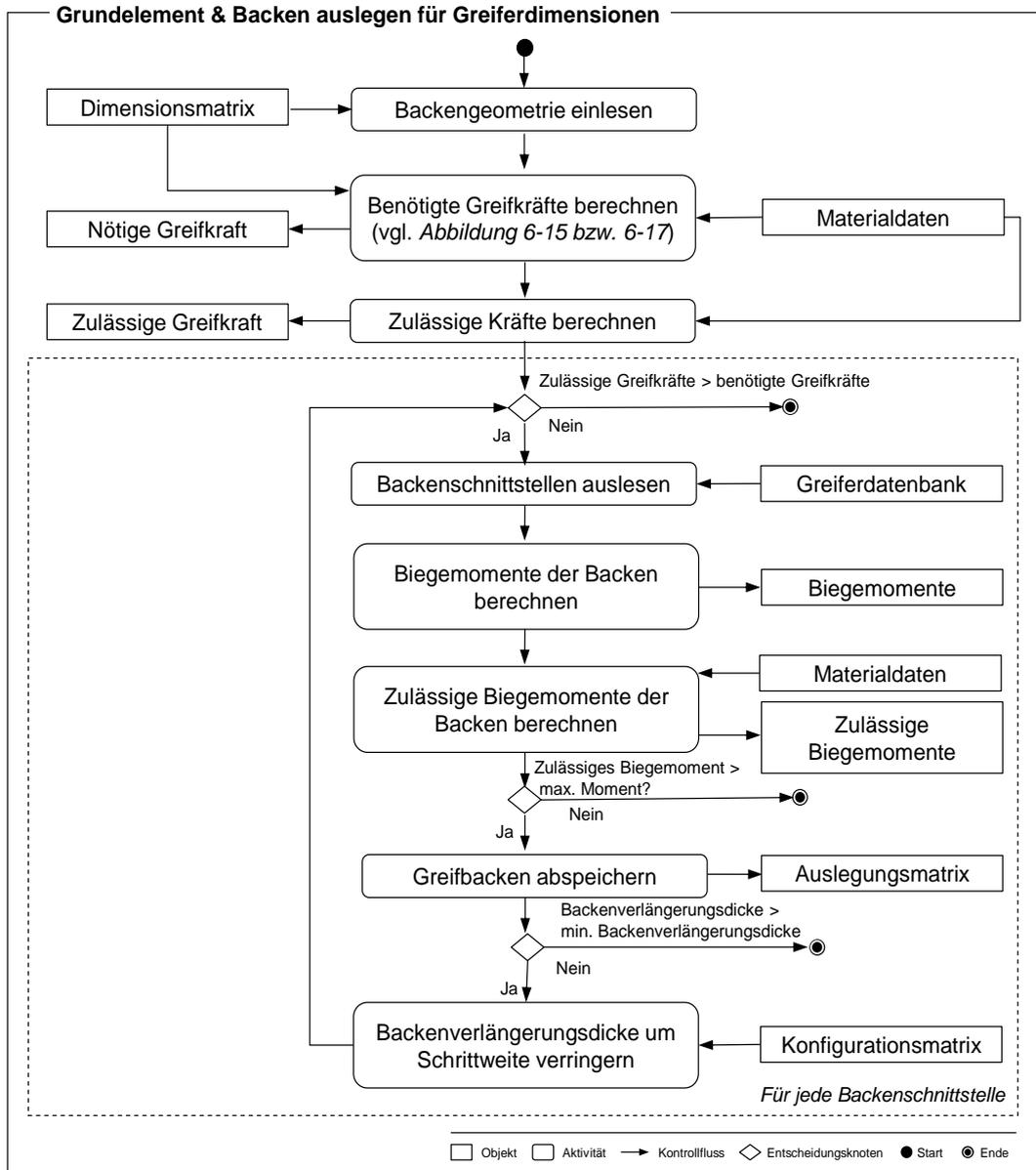
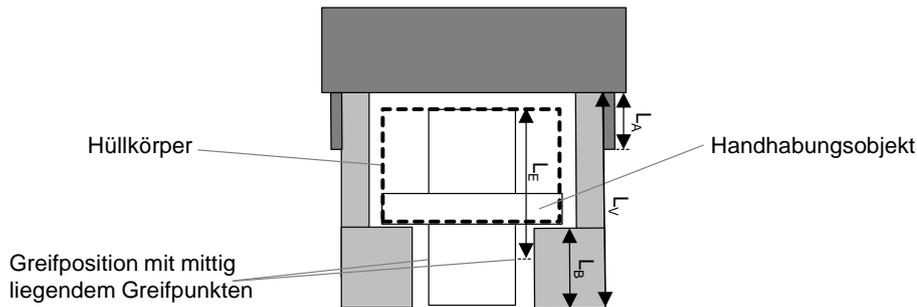


Abbildung 6-7: Ablaufdiagramm für die Auslegung von mechanischen Greifern

Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen der einzelnen Parameter aus *Abbildung 6-6* unter den in *Abschnitt 4.2* getroffenen Annahmen dargestellt. Die Geometrie und Dimension der Backenaufnahme ist spezifisch für den Greifergrundkörper und hängt von der gewählten industriellen Lösung ab. Demzufolge muss die Anpassung der Backenaufnahme individuell im Rahmen der automatisierten Konstruktion erfolgen und ist erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich.

Die Backenverlängerung ( $L_V$ ) lässt sich unabhängig von der Greiferart und der Ausprägung der Wirkflächen bestimmen. Dies erfolgt unter Annahme eines geometrisch mittig in der Wirkfläche liegenden Greifpunktes (vgl. *Abbildung 6-8*) mittels folgender Formel:

$$L_V = \frac{L_B}{2} + L_E + L_A. \quad (6.1)$$



*Abbildung 6-8: Parameter zur Bestimmung der Backenverlängerung ( $L_V$ )*

$L_B$  stellt die Länge der Backe dar und wird aufgrund der Annahme eines mittigen liegenden Greifpunktes halbiert. Die Eingriffslänge ( $L_E$ ) wird aus der Distanz zwischen dem Greifpunkt und der oberen Kante des Hüllkörpers in Anfahrriichtung bestimmt. Die Aufnahmelänge der Backe ( $L_A$ ) ist abhängig von der Schnittstelle zum Greifer. Sie kann jedoch für erste Berechnungen mit 20 Prozent der Hüllkörperlänge des Handhabungsobjektes in Anfahrriichtung angenommen werden. In der finalen Konstruktion muss sie nochmals angepasst werden. Die Dicke der Backenverlängerung ( $D_V$ ) wird im ersten Schritt überschlägig mit einem Startwert  $D_{Vstart}$ , wie in der empirisch ermittelten Formel (6.2) beschrieben, berechnet. Dieser wird anschließend iterativ verringert.

$$D_{Vstart} = \frac{(m \cdot g) \cdot 40}{R_m \cdot L_V} \quad (6.2)$$

$R_m$  steht für die Zugfestigkeit des Materials der Backen. Die Breite der Backenverlängerung ( $B_V$ ) entspricht der Breite der Kontaktfläche. Grundsätzlich sollte die Backenverlängerung so klein wie möglich dimensioniert werden, um unnötige Masse zu vermeiden (CAUSEY 2003).

### Plane Backen

Greifbackenbreite und Greifbackenlänge ergeben sich bei planen Backen im ersten Schritt aus der Größe der Kontaktfläche, abzüglich der vom Nutzer gewählten Sicherheitsfaktoren (vgl. Kapitel 5). Zur Bestimmung der Dicke der Greifba-

cke wird in der Greifpositionsbestimmung eine Ebene oberhalb (in z-Richtung) des Greifpunktes aufgespannt. Diese liegt in der Ebene der Kontaktfläche. Von dieser Fläche ausgehend werden in Richtung des Normalenvektors die Abstände ( $D_{Ni}$ ) zu allen Oberflächen  $i$ , die in z-Richtung über der Greifposition liegen, bestimmt. Der maximale Abstand bestimmt die Kontur, welche umfahren und mittels der Greifbackendicke ausgeglichen werden muss.

$$D_B = \max[D_{Ni}] \quad (6.3)$$

Ist keine Störkontur vorhanden (Hüllkörperflächenebene entspricht Flächenebene der Kontaktfläche), so ist die Backendicke null.

Basierend auf den berechneten Parametern lässt sich anschließend die notwendige minimale Öffnungsweite des Greifers  $\ddot{O}_{wpp}^{min}$  bestimmen. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung des Kontaktflächenabstandes (KA) und der Dicke der Backenverlängerung ( $D_V$ ) (vgl. *Abbildung 6-9*):

$$\ddot{O}_{wpp}^{min} = KA + 2 \cdot (D_B + D_V) \quad (6.4)$$

Für die maximale Öffnungsweite gilt unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors  $S_H$ :

$$\ddot{O}_{wpp}^{max} = KA + 2 \cdot (D_B + D_V + D_N + S_H) \quad (6.5)$$

Der Sicherheitsfaktor  $S_H$  wird in Abhängigkeit der Genauigkeit des Handhabungsgerätes festgelegt. Er dient dazu, eine Kollision des Greifers aufgrund von Ungenauigkeiten beim Anfahrvorgang zu vermeiden. Es wird angenommen, dass die Backen auf der Innenseite der Schnittstelle zum Greifer montiert werden. Dies gilt für alle im Folgenden beschriebenen Berechnungsvorschriften zu Öffnungsweite und -winkel.

Der notwendige Hub ( $H_P$ ) lässt sich zu

$$H_P = \ddot{O}_w^{max} - \ddot{O}_w^{min} \quad (6.6)$$

berechnen.

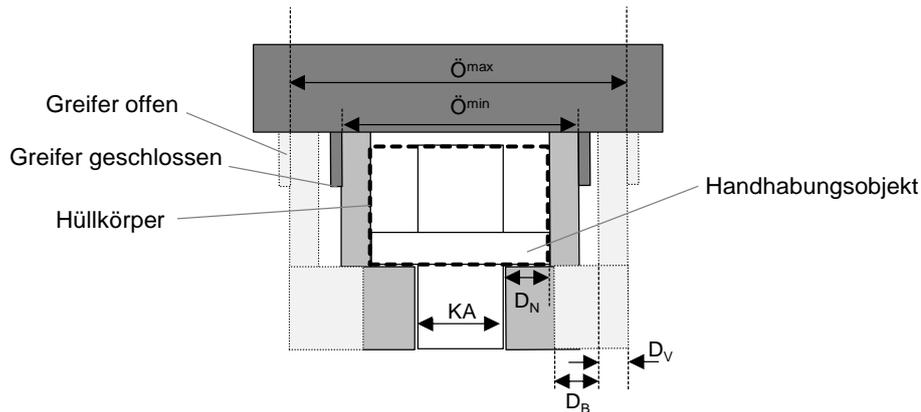


Abbildung 6-9: Parameter zur Bestimmung der Öffnungsweiten und des Hubes

Analog zu Vakuumgreifern werden bei planen Backen, wie in *Abbildung 6-10* beispielhaft abgebildet, Dimensionsmatrizen generiert. Bei Sauggreifern wird zur Beschreibung der Dimensionen und der zugehörigen Greifkraft bzw. Druckdifferenz nur eine Matrix benötigt, während bei mechanischen Greifern mehrere Matrizen notwendig sind. Im unten illustrierten Fall von planen Backen bedarf es zwei Matrizen. Zum einen die Matrix links, zur Beschreibung der notwendigen Greifkraft für die jeweilige Konfiguration, zum anderen die Matrix rechts, zur Beschreibung der Dicke der Backenverlängerung bei dieser Konfiguration.

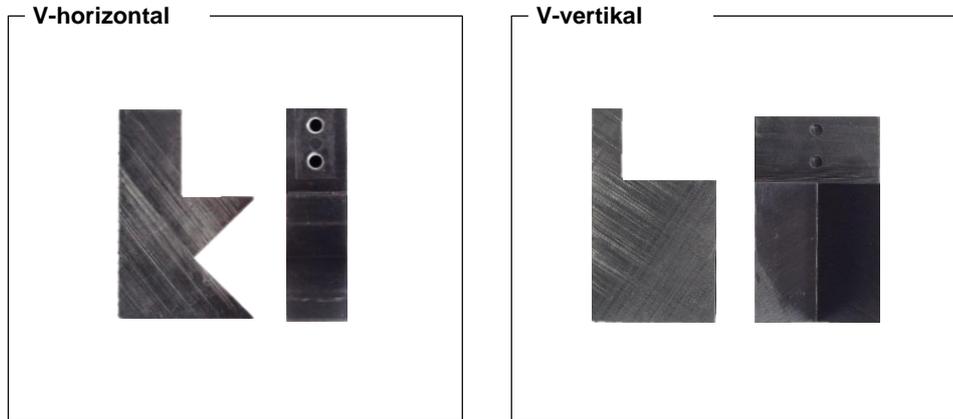
	$L_{Bmax}$	$L_{B2}$	$L_{B3}$	$L_{Bmin}$		$L_{Bmax}$	$L_{B2}$	$L_{B3}$	$L_{Bmin}$
$B_{Bmax}$	$F_{G11}$	$F_{G12}$	$F_{G13}$	$F_{G14}$	$B_{Bmax}$	$D_{V11}$	$D_{V12}$	$D_{V13}$	$D_{V14}$
$B_{B2}$	$F_{G21}$	$F_{G22}$	$F_{G23}$	x	$B_{B2}$	$D_{V21}$	$D_{V22}$	$D_{V23}$	x
$B_{B3}$	$F_{G31}$	x	x	x	$B_{B3}$	$D_{V31}$	x	x	x
$B_{Bmin}$	$F_{G41}$	x	x	x	$B_{Bmin}$	$D_{V41}$	x	x	x

Abbildung 6-10: Struktur der Dimensionsmatrizen von planen Backen mechanischer Greifer

### Prismatische Backen

Die hier beschriebenen Berechnungen zur Dimensionierung von prismatischen Greifbacken orientieren sich in ihren Grundzügen an dem von PEDRAZZOLI ET AL. (2001) entwickelten Verfahren. Im Gegensatz zu planen Backen kann bei prismatischen Backen eine Vorzugsrichtung festgestellt werden, welche sowohl die Greifkraftberechnung als auch die Anfahrriechung beeinflusst. Um den in *Abschnitt 4.2* definierten Randbedingungen bezüglich der Anfahrriechung zu genügen, wird folgende Festlegung für die Orientierung des V-förmigen Einschnitt-

tes von prismatischen Backen getroffen (vgl. *Abbildung 6-11*): Stellt die gewölbte Seite des Zylinders die Basisfläche dar, so wird das „V“ wie in *Abbildung 6-11* links dargestellt orientiert. Ist dies nicht der Fall, so erfolgt die Orientierung wie in *Abbildung 6-11* rechts dargestellt. Dies muss bei der Wahl der Basisfläche beachtet werden.



*Abbildung 6-11: Mögliche Orientierungen des „V“ bei prismatischen Backen*

Für die Berechnung der einzelnen Parameter gelten nach PEDRAZZOLI ET AL. (2001) die folgenden Zusammenhänge: Die Flankenbreite ( $B_F$ ) hat keine funktionelle Aufgabe, sodass standardmäßig eine Breite von 1 mm angenommen wird. Die Backenlänge ( $L_B$ ) entspricht der Länge des Linienkontakts unter Abzug des vom Nutzer angegebenen Sicherheitsfaktors  $S_K$  (vgl. *Abschnitt 6.1*). Ausgehend von dem Wert  $\alpha$  (vgl. *Abschnitt 5.2.1*) und dem Radius  $r$  des Handhabungsobjektes (aus Greifpositionsbestimmung), lassen sich sowohl der Öffnungswinkel des Prismas  $\beta$  als auch die Backendicke  $D_B$  mittels der Formeln (6.7) und (6.8) berechnen (PEDRAZZOLI ET AL. 2001).

$$\beta = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{4} \right) \cdot 2 \quad (6.7)$$

$$D_B = r \cdot \left( \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{4}\right)} - \cos\left(\frac{3\alpha}{8}\right) \right) \quad (6.8)$$

Die Breite  $B_B$  einer prismatischen Greifbacke mit einer Orientierung wie sie in *Abbildung 6-6* dargestellt ist, lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$B_B = 2 \cdot \left( D_B \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) + B_F \right). \quad (6.9)$$

Die Zentrumsbreite ( $B_Z$ ) entspricht dabei der halben Backenbreite.

$$B_Z = \frac{B_B}{2} \quad (6.10)$$

Wird die Orientierung des Prismas wie oben beschrieben um  $90^\circ$  gedreht (vgl. *Abbildung 6-11*), so werden bei der Dimensionierung alle Breiten und Längen entsprechend getauscht.

Um analog zu den planen Backen Störkonturen umgehen zu können, gilt für die Ermittlung der Zentrumsdicke folgendes:

$$D_Z = \max[D_{Ni}]. \quad (6.11)$$

Bei der Berechnung wird das Maximum einer der beiden virtuellen Greifpunktnormalen  $D_N$  verwendet, die sich auf der Oberfläche des Zylinders in der geometrischen Mitte zwischen den beiden Linienkontakten befinden. Entsprechend dem Vorgehen bei planen Backen lässt sich anschließend die notwendige minimale sowie maximale Öffnungsweite bzw. der notwendige Hub des Greifers bestimmen. In einem ersten Schritt muss hierfür die Eintauchtiefe  $E_Z$  der Backe in den Zylinder bestimmt werden:

$$E_Z = \frac{D_Z}{2} - D_B \quad (6.12)$$

Die minimale Öffnungsweite ergibt sich aus

$$\ddot{O}_{wv}^{min} = 2 \cdot (D_B + D_V + D_Z + E_Z) \quad (6.13)$$

und die maximale Öffnungsweite aus

$$\ddot{O}_{wv}^{max} = 2 \cdot (D_B + D_V + D_Z + E_Z + D_N + S_H). \quad (6.14)$$

Der Sicherheitsfaktor  $S_H$  wird analog wie bei planen Backen verwendet. Der notwendige Hub ( $H_{Pr}$ ) lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$H_{Pr} = \ddot{O}_{wv}^{max} - \ddot{O}_{wv}^{min} \quad (6.15)$$

### Winkelgreifer

Während die Kraftberechnung und die Dimensionierung der Winkelgreiferbacken analog zur Berechnung für Parallelgreifer erfolgen kann, müssen bei der Dimensionierung des Grundelementes einige Besonderheiten beachtet werden. Hypothetisch liegen die Backen an der Greifposition plan auf. Unter Annahme einer Montage an der Innenseite der Backenaufnahmen (vgl. *Abbildung 6-12*)

gelten für die Auslegung des nötigen Innenabstandes der Backenaufnahmen von Winkelgreifern ( $\ddot{O}_{wwi}$ ) folgende Zusammenhänge:

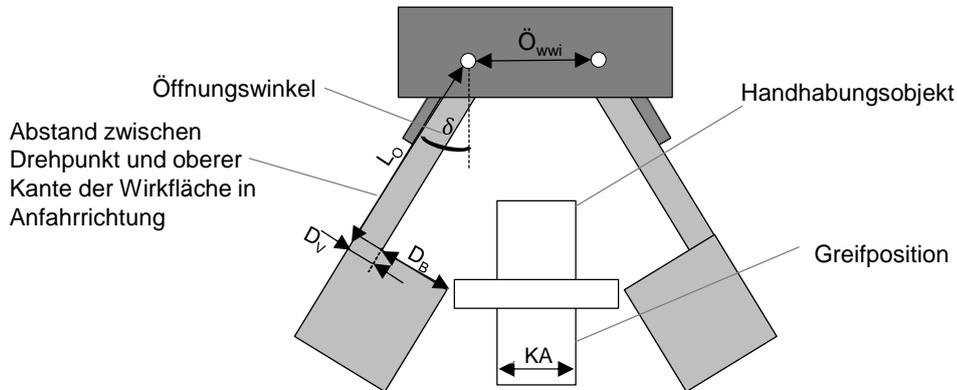


Abbildung 6-12: Nomenklatur der für die Dimensionierung von Winkelgreifern benötigten Parameter

Plane Backen:

$$\ddot{O}_{wwp} = KA + 2 \cdot (D_B + D_V). \quad (6.16)$$

Prismatische Backen:

$$\ddot{O}_{wwv} = 2 \cdot (D_B + D_V + D_Z + E_Z). \quad (6.17)$$

Für die Berechnung des benötigten Öffnungswinkels  $\delta$ , um mögliche Störkonturen umfahren zu können, gilt:

$$\delta = \arctan\left(\frac{D_B + D_V}{L_O}\right) - \arcsin\left(\frac{D_V}{\sqrt{L_O^2 + (D_B + D_V)^2}}\right). \quad (6.18)$$

### 6.2.3 Festigkeitsnachweise

Um die in *Abschnitt 6.2* beschriebene iterative Verringerung der Dimensionen der Backen von mechanischen Greifern durchführen zu können, bedarf es einer Abschätzung der zulässigen mechanischen Belastbarkeit der Backen. Des Weiteren muss sowohl bei mechanischen Greifern als auch bei Vakuumgreifern geprüft werden können, ob die aufgrund der Dimensionierung vorherrschenden Belastungen für das Handhabungsobjekt zulässig sind.

Für genaue theoretische Berechnungen der Belastbarkeit von Handhabungsobjekten oder Wirkelementen ist die Durchführung einer FEM-Analyse unumgänglich. Um eine erste grobe Schätzung abgeben zu können, ist dies jedoch vor dem Hintergrund der gewünschten Rechenzeiteffizienz zu aufwendig. Aus diesem Grund sollen andere Methoden der Abschätzung verwendet werden.

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Belastbarkeit stellt die Überprüfung mittels der zulässigen Flächenpressung dar. Übersteigt die Flächenpressung materialbedingte Grenzen bei Wirkelementen oder dem Handhabungsobjekt, so kann es zu Beschädigungen oder Verformungen kommen (FELDMANN ET AL. 2014). Der Grundablauf sowie die Einbindung der Festigkeitsüberprüfung in den Auslegungsprozess wird in *Abbildung 6-7* und *Abbildung 6-14* veranschaulicht.

Die zulässige Flächenpressung kann nach NIEMANN ET AL. (2001) für ruhende Belastungen und duktile Werkstoffe nach

$$p_{zul} = R_p / 1,2 \quad (6.19)$$

bzw. für spröde Werkstoffe nach

$$p_{zul} = R_m / 2 \quad (6.20)$$

berechnet werden.  $p_{zul}$  entspricht dabei der zulässigen Flächenpressung,  $R_p$  der Dehngrenze und  $R_m$  der Zugfestigkeit.

Die wirkende Flächenpressung auf das Handhabungsobjekt kann für plane Backen unter Verwendung der Backenfläche  $A_p$  nach

$$p_{PB} = \frac{F_G}{A_p} \quad (6.21)$$

berechnet werden. Zur Berechnung der Flächenpressung prismatischer Backen ( $p_{RB}$ ) kann *Formel (6.22)* (HESSE 2004) verwendet werden.

$$p_{RB} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_K \cdot E_R}{B_B \cdot r_C}} \quad (6.22)$$

$r_C$  steht für den Krümmungsradius der Kontaktfläche,  $E_R$  für den reduzierten E-Modul und  $B_B$  für die Backenbreite.

$F_K$  entspricht der Kontaktkraft, welche nach

$$F_K = \frac{F_G}{2 \cdot \sin(\beta)} \quad (6.23)$$

berechnet wird.  $F_G$  steht für die Greifkraft und  $\beta$  für den Prismawinkel der Backe. Der reduzierte Elastizitätsmodul lässt sich nach

$$E_r = \frac{2 \cdot E_W \cdot E_{GG}}{E_W + E_{GG}} \quad (6.24)$$

berechnen.  $E_W$  entspricht dabei dem E-Modul des Wirkelementes und  $E_{GG}$  dem E-Modul des Handhabungsobjekts.

Für Vakuumgreifer kann die Flächenpressung nur überschlägig berechnet werden. Grund dafür ist die Unsicherheit bezüglich der tatsächlich wirkenden Fläche des Vakuumsaugers (vgl. Abschnitt 2.4.3). Basierend auf der Dichtkraft  $F_D$  und der Fläche der Dichtlippe  $A_L$  (Wert aus industrieller Datenbank), kann jedoch eine Abschätzung für die Flächenpressung  $p_v$  vorgenommen werden.

$$p_v = \frac{F_D}{A_L} \quad (6.25)$$

Ausgehend von dem Minimalwert der zulässigen Flächenpressung des Materials von Wirkelement und Handhabungsobjekt kann anschließend bestimmt werden, ob die jeweilige Wirkelement-Handhabungsobjekt-Konfiguration zulässig ist. Wie bereits erwähnt, ist das Verfahren nur überschlagsmäßig gültig. Das Verhalten dünnwandiger Handhabungsobjekte sowie Oberflächenbeschädigungen werden nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zu den beschriebenen Berechnungen wird bei mechanischen Greifern geprüft, ob die Backenverlängerung den Belastungen standhält. Bei sachgerechter Benutzung der Backen ist Biegung der Lastfall, der am kritischsten einzuschätzen ist. Die auftretende Biegespannung  $\sigma_L$  wird anhand der Formel (6.26) aus der Publikation von WOLNIAKOWSKI ET AL. (2015) berechnet und mit der zulässigen Biegespannung  $\sigma_{zul}$  des verwendeten Materials verglichen.

$$\sigma_L = \frac{6 \cdot F_G \cdot L_E}{B_B \cdot D_V^2} \quad (6.26)$$

$F_G$  stellt die berechnete Greifkraft dar,  $L_E$  die Eingriffslänge der Backe,  $B_B$  die Breite der Backe und  $D_V$  die Dicke der Backenverlängerung.

### 6.3 Vorgehen zur Greifkraftberechnung für Greifersysteme

Wie in *Abschnitt 2.4* beschrieben, werden in existierenden Methoden zur Greifkraftberechnung meist starke Vereinfachungen getroffen. Das betrifft insbesondere die Wirkrichtung der angreifenden Kräfte sowie die Wirkung von Momenten, sodass nur sehr ungenaue bis gar keine Aussagen für beliebige Orientierungen eines Greifers getroffen werden können.

Bezogen auf die in *Abschnitt 2.4* genannten Einflussfaktoren auf die benötigte Greifkraft, sind für die eigentliche Berechnung insbesondere die auf das Greifgut wirkenden Kräfte und Momente, die Materialkennwerte von Greifer (bzw. Wirkelementen) und Handhabungsobjekt sowie äußere Umwelteinflüsse von Bedeutung. Weitere für die Greifkraft relevante Faktoren werden im Rahmen der Methode von anderen (vorhergehenden) Prozessschritten bereitgestellt:

- Orientierung des Greifers (aus Greifpositionsbestimmung)
- Geometrie des Handhabungsobjektes (aus Greifpositionsbestimmung)
- Geometrische Gestalt und Dimensionen der Wirkelemente (aus Auslegung)

Unter Verwendung der oben beschriebenen Eingabewerte ist es möglich, mithilfe von Kräftenmodellen bzw. Berechnungsvorschriften die Greifkraft für beliebige Orientierungen des Greifers sowie beliebige auf das Handhabungsobjekt wirkende Kräfte, inklusive eventuell anliegender Momente, zu bestimmen. Berücksichtigte Kräfte sind neben der Gewichtskraft translatorische- und rotatorische Kräfte sowie Prozesskräfte. Umgesetzt wurde diese Anforderung bei Vakuumgreifern mit einem adaptierten Modell auf Basis der Arbeiten von BRAUN (1989), MANTRIOTA (2007B) und MANTRIOTA & MESSINA (2011). Für mechanische Greifer wurde das Modell von BARBER ET AL. (1986) adaptiert, unter anderem unter Verwendung der Ergebnisse von MANTRIOTA (2007B).

Die benötigte Greifkraft ergibt sich somit aus dem Gleichgewichtszustand, bei dem die Haltekraft die Resultierende ausgleichen kann, welche durch externe Kräfte und Volumenkräfte entsteht. Die Haltekraft ist dabei die Kraft, die, bedingt durch äußere Rahmenbedingungen wie beispielsweise den Reibkoeffizienten, tatsächlich auf das Handhabungsobjekt übertragen werden kann. Die in der

Methode verwendeten Kräfte Modelle umfassen neben dem Betrag und der Wirkrichtung auch die Lastverteilung (Punkt-, Strecken oder Flächenlast) der Kräfte.

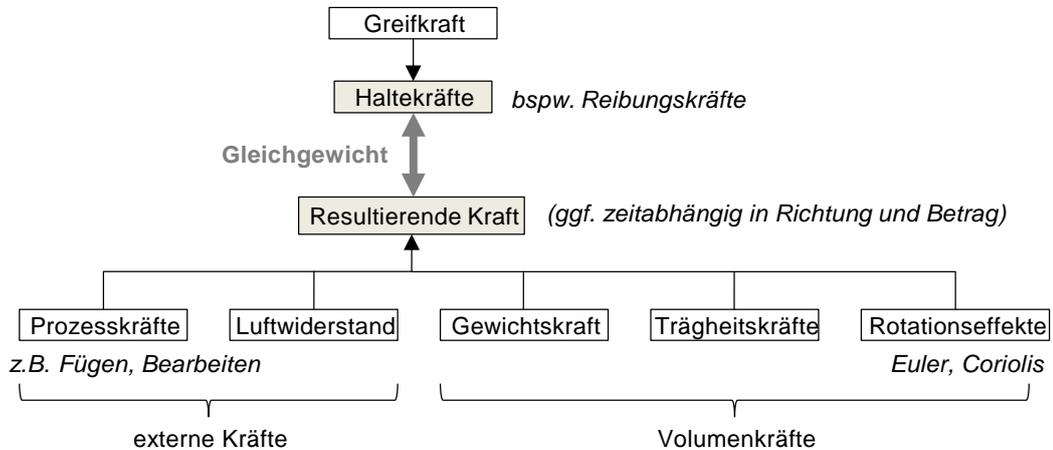


Abbildung 6-13: Grundmodell der Greifkraftberechnung

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Methode für die jeweiligen Greiferarten durchgeführt wird. Ziel der jeweiligen Kräfte Modelle ist es, mittels Gleichgewichtsbedingungen die minimal benötigte Greifkraft für die jeweilige Greifsituation zu bestimmen.

### 6.3.1 Eingabe von Randbedingungen der Greifkraftberechnung

Neben der in ihrem Betrag konstant angreifenden Gewichtskraft, welche durch die Masse des Handhabungsobjektes induziert wird, existieren noch weitere, von Bewegungsart und -richtung abhängige Kräfte, welche auf das Handhabungsobjekt wirken. Dazu zählen sämtliche durch Translation bzw. Rotation induzierten Kräfte. Während die Gewichtskraft immer in Richtung Erdmittelpunkt wirkt, ist bei den anderen genannten Kräften die Wirkrichtung nicht vorgegeben. Aufgrund dieser Tatsache ist es zielführend, verschiedene Koordinatensysteme für die Berechnung der auftretenden Kräfte einzuführen. Neben dem Handhabungsobjekt-Koordinatensystem (vgl. Kapitel 5) wird ein weiteres lokales Koordinatensystem in der Greifposition eingeführt. Die Angabe der wirkenden Kräfte und Beschleunigungen durch den Nutzer erfolgt im Handhabungsobjekt-Koordinatensystem, was eine deutliche Vereinfachung der Eingabe darstellt.

Um allgemeingültig Handhabungsvorgänge hinsichtlich der vorherrschenden Kräfte beschreiben zu können, sind drei Formen der Datenbereitstellung nötig. Diese werden in Anlehnung an die Arbeiten von BARBER ET AL. (1986),

MANTRIOTA (2007B) sowie MANTRIOTA (2007A) in folgende Kraft-Momenten-Matrix ( $\widehat{\mathcal{F}}$ ) überführt:

$$\widehat{\mathcal{F}} = \begin{bmatrix} \widehat{F}_x^{(e)} & \widehat{F}_y^{(e)} & \widehat{F}_z^{(e)} \\ \widehat{M}_x^{(e)} & \widehat{M}_y^{(e)} & \widehat{M}_z^{(e)} \end{bmatrix}. \quad (6.27)$$

$\widehat{F}_{x,y,z}^{(e)}$  stellen dabei die auf den Schwerpunkt des Handhabungsobjektes wirkenden Kräfte,  $\widehat{M}_{x,y,z}^{(e)}$  die auf den Schwerpunkt wirkenden Momente dar. Als Kraftangriffspunkt für Volumenkräfte wird der Schwerpunkt angenommen, externe Kräfte besitzen keinen vordefinierten Angriffspunkt. Die wirkenden Kräfte und Momente müssen anschließend in die jeweilige Greifposition transformiert werden, um die Greifkraft berechnen zu können.

### 1. Rein translatorische Bewegungen

$$\widehat{\mathcal{F}}_t = \begin{bmatrix} -m * a_{T,x} & -m * a_{T,y} & -m * (a_{T,z} + g) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Zur Eingabe von rein translatorischen Bewegungen wird davon ausgegangen, dass im Ausgangszustand des Prozesses die Koordinatensysteme identisch orientiert sind. Für obenstehende Kraft-Momenten-Matrix translatorischer Bewegungen ( $\widehat{\mathcal{F}}_t$ ) wirkt die Gewichtskraft in negativer z-Richtung,  $a_{T,xyz}$  stellen die betragsmäßig maximalen Beschleunigungen in den jeweiligen Bewegungsrichtungen dar.

### 2. Rotatorische und translatorische Bewegungen

Für die Erfassung von Bewegungen mit rotatorischem und translatorischem Anteil werden als Eingabeinformationen die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , die Winkelbeschleunigung  $a_w$ , der Abstand des Handhabungsobjektes von der Rotationsachse  $r_a$  sowie die translatorische Geschwindigkeit  $v_T$  und Beschleunigung  $a_T$  benötigt. Der translatorische Anteil der Bewegung wird mittels der maximalen Beträge und Richtung der Beschleunigung hinterlegt. Beispielhaft dargestellt ist in Formel (6.29) die Form der Kraft-Momenten-Matrix rotatorischer und translatorischer Bewegungen ( $\widehat{\mathcal{F}}_{tr}$ ) für positive Wirkung der Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung, die Gewichtskraft in negativer Axialrichtung sowie die Translation in positiver Radialrichtung. Die x-Achse liegt dabei tangential, die z-Achse radial und die y-Achse axial.

$$\hat{\mathcal{F}}_{tr} = \begin{bmatrix} m * (-r_a * a_W + 2 * \omega * v_T) & -m * g & m * (r_a * \omega^2 - a_T) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

### 3. Prozesskräfte

Die Betrachtung von externen Kräften erfolgt in der Methode mittels der Eingabe der Wirkrichtung, der Koordinaten des Kraftangriffspunktes ( $d_{pi}$ ) und der Komponenten der vorliegenden Prozesskraft ( $F_{pi}$ ) und werden in der Kraft-Momenten-Matrix für Prozesskräfte ( $\hat{\mathcal{F}}_P$ ) zusammengefasst:

$$\hat{\mathcal{F}}_P(2, :) = \begin{bmatrix} \widehat{F}_{px}^{(e)} & \widehat{F}_{py}^{(e)} & \widehat{F}_{pz}^{(e)} \\ \Psi_1 & \Psi_2 & \Psi_3 \end{bmatrix}. \quad (6.30)$$

Die Elemente der Kraft-Momenten-Matrix für Prozesskräfte ( $\hat{\mathcal{F}}_P$ ) lauten:

$$\Psi_1 = \widehat{F}_{py}^{(e)} \cdot d_{p,z} - \widehat{F}_{pz}^{(e)} \cdot d_{p,y} \quad (6.31)$$

$$\Psi_2 = \widehat{F}_{pz}^{(e)} \cdot d_{p,x} - \widehat{F}_{px}^{(e)} \cdot d_{p,z} \quad (6.32)$$

$$\Psi_3 = \widehat{F}_{px}^{(e)} \cdot d_{p,y} - \widehat{F}_{py}^{(e)} \cdot d_{p,x}. \quad (6.33)$$

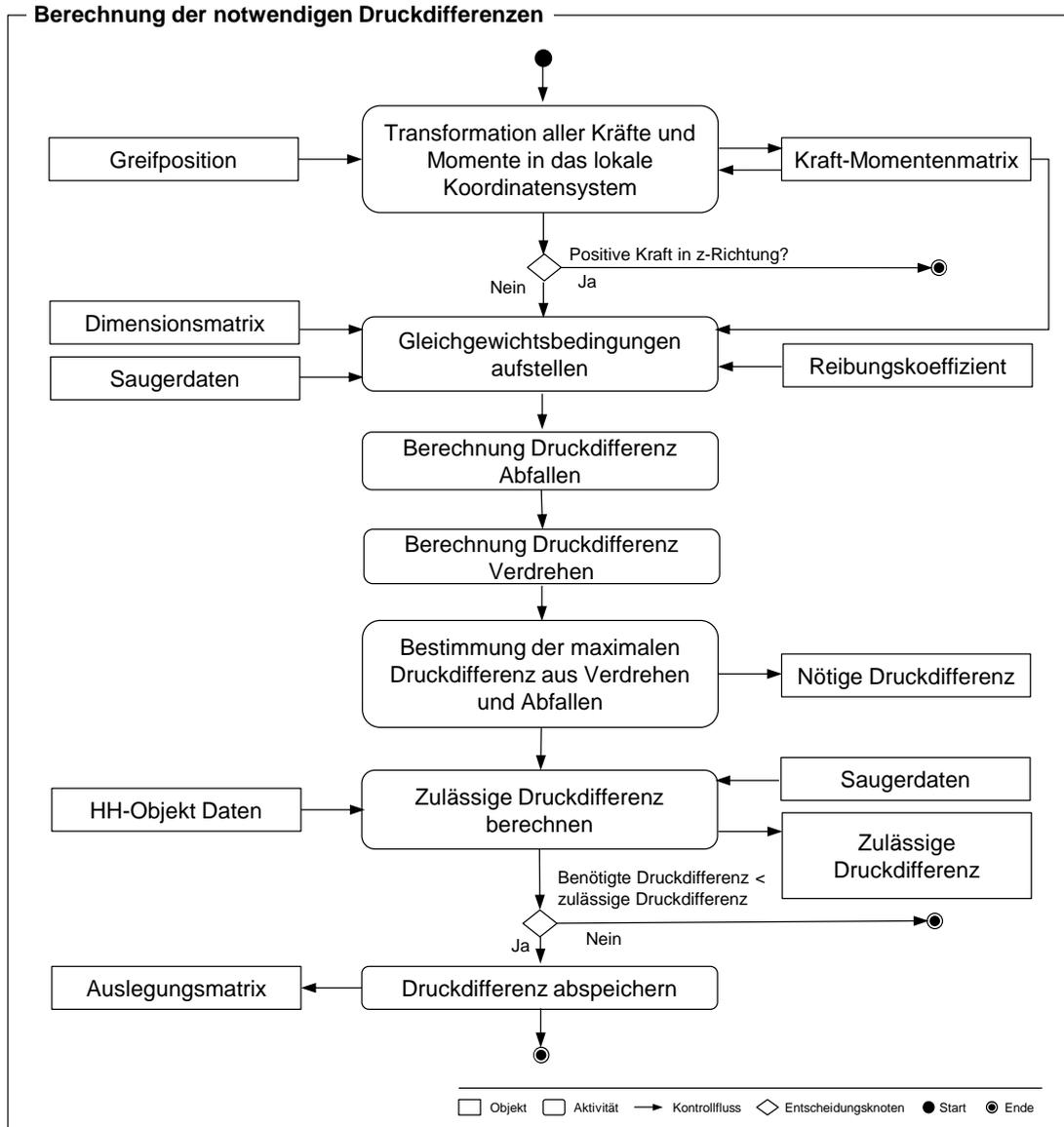
Liegt der Kraftangriffspunkt außerhalb des Schwerpunktes, werden Momente induziert.

Sämtliche Kräfte und Momente, welche auf das System wirken werden mittels Addition der Eingabe-Matrizen zur Kraft-Momenten-Matrix ( $\hat{\mathcal{F}}$ ) zusammengeführt. Es muss bei der Berechnung beachtet werden, ob nur translatorische oder translatorische und rotatorische Bewegungen durchgeführt werden, da dies entscheidet, welche der beiden Matrizen ((6.28) oder (6.29)) verrechnet wird.

Basierend auf den Eingaben wird die Greifkraft für den jeweiligen Lösungsvorschlag berechnet. Bei Handhabungsprozessen, die aus mehreren (verschiedenartigen) Bewegungen und Sequenzen bestehen, werden die Greifkräfte aller Lösungen verglichen und das Maximum als Wert für den Gesamtprozess definiert.

### 6.3.2 Vakuumgreifer

Den verallgemeinerten Ablauf der Greifkraftberechnung für Vakuumgreifer zeigt *Abbildung 6-14*. Auf die Spezifika der Berechnungen der einzelnen Ausprägungen von Vakuumgreifern wird nachfolgend eingegangen.



*Abbildung 6-14: Ablauf der Greifkraftberechnung von Vakuumgreifern*

Die Abfrage der Kraft in z-Richtung bezieht sich auf das in dieser Arbeit verwendete Kraftmodell, welches nur für negative Kräfte in z-Richtung definiert ist. Bei alternativen Kraftmodellen kann diese Zwischenabfrage unter Umständen vernachlässigt werden. Die zulässige Druckdifferenz wird, wie in *Abschnitt 6.2.3* beschrieben, überschlägig berechnet und gibt die maximal zulässige Belastung des Handhabungsobjektes an.

Neben den Matrizen der zu berechnenden Dimensionen und die wirkenden Momente und Kräfte sind die Daten des Saugers sowie des Handhabungsobjektes für die Berechnung nötig. Daten, welche vom Sauger benötigt werden, sind der Verformungskoeffizient und der Wirkungsgrad. Diese Informationen sowie der Reibungskoeffizient werden von der industriellen Datenbank bereitgestellt. Vom Handhabungsobjekt werden sämtliche Daten benötigt, welche für die Festigkeitsberechnung verwendet werden.

Für die Berechnung der Greifkräfte von Vakuumgreifern mit einem Wirkelement (Sauger) wird eine adaptierte Version des Modells von MANTRIOTA (2007B) verwendet. Der Hauptunterschied zum ursprünglichen Modell ist die Umstellung auf die benötigte Druckdifferenz für eine spezifische Saugerdimension bei gegebenem Reibkoeffizienten als Endergebnis. Des Weiteren erfolgt eine Erweiterung des Modells auf ovale und rechteckige Sauger. Für die Berechnung der Druckdifferenzen werden alle drei bei Vakuumgreifern vorkommenden Versagensfälle berücksichtigt – Abfallen, Abgleiten und Verdrehen. Die größte nötige Greifkraft aller drei Fälle wird anschließend als minimale Greifkraft (bzw. Druckdifferenz) für einen sicheren Griff definiert.

Wichtige Kernpunkte des Modells nach MANTRIOTA (2007B) sind, im Gegensatz zu anderen Modellen, dass Reibungskräfte als Streckenlasten und nicht als Punktlasten modelliert werden. Dies erlaubt deutlich genauere Berechnungen, da die Haftfunktion der Dichtlippe in Abhängigkeit ihres Abstandes zum Momentanpol berücksichtigt wird. Dies wirkt sich insbesondere beim Vergleich verschiedener Saugergeometrien aus. Der Momentanpol ist dabei der Punkt, um welchen sich das Handhabungsobjekt im Versagensfall drehen würde. Die Tangentialdruckverteilung ist orthogonal zur Achse zwischen Momentanpol und dem jeweiligen betrachteten Punkt.

Der Versagensfall des Verdrehens wird durch eine Bewegung um den Momentanpol modelliert, das Abgleiten als eine Bewegung mit einem unendlichen Abstand zum Momentanpol. Mit einem Abfallen des Handhabungsobjektes ist zu rechnen, wenn die Kontaktdruckverteilung an einer Stelle der Dichtlippe negativ wird.

Basis für die nachfolgend beschriebenen Berechnungen ist die Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen des Systems. Der Koordinatenursprung, in welchen dabei transformiert wird und welcher als Bezugspunkt gilt, wird mittig in der Fläche des Saugers bzw. der Kontaktstelle gelegt.

$$F_z^{(e)} + F_D + F_V = 0 \quad (6.34)$$

$$F_x^{(e)} + F_x = 0 \quad (6.35)$$

$$F_y^{(e)} + F_y = 0 \quad (6.36)$$

$$M_z^{(e)} + M_z = 0 \quad (6.37)$$

$$M_x^{(e)} + M_x = 0 \quad (6.38)$$

$$M_y^{(e)} + M_y = 0 \quad (6.39)$$

$F_D$  stellt die Dichtkraft dar,  $F_x$  und  $F_y$  die aus dem tangentialen Kontaktdruck resultierenden Kräfte.  $F_V$  ist die Vakuumkraft des Saugers. Bei  $F^{(e)}_{x,y,z}$  handelt es sich um in den Koordinatenursprung transformierte externe Kräfte,  $M^{(e)}_{x,y,z}$  sind die ebenfalls transformierten externen Momente.  $M_{x,y,z}$  bezeichnet die vom Sauger aufgenommenen Momente. Die Berechnung der einzelnen Elemente der Gleichgewichtsbedingungen soll im Folgenden näher beschrieben werden.

Um basierend auf der Druckdifferenz die benötigte Vakuumkraft zu berechnen, wird im Modell von MANTRIOTA (2007B) ausschließlich die Fläche des Saugers berücksichtigt. Die in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Phänomene bezüglich der Minderung der Vakuumkraft  $F_V$  werden im vorliegenden Fall mittels des Verformungsbeiwertes  $k$  sowie des Wirkungsgrades  $\eta$  eingebracht:

$$F_V = \Delta p \cdot A_S \cdot k \cdot \eta \quad (6.40)$$

Basierend auf den von KAULINJA (1979) aufgestellten Zusammenhängen zur Kontaktdruckverteilung  $q_S$  an der Position  $(x,y)$  der Dichtlippe unter Verwendung der Konstanten  $a_{KS}$  und  $b_{KS}$  (zur Bestimmung der Verteilung des Kontaktdruckes) sowie des Mittelwertes des Kontaktdruckes  $q_{0S}$ :

$$q_S(x, y) = q_{0S} + a_{KS} \cdot x + b_{KS} \cdot y \quad (6.41)$$

ergibt sich nach MANTRIOTA (2007B) folgender Zusammenhang für die Berechnung der tangentialen Kontaktdruckverteilung:

$$dF_T = \mu \cdot q_S(x, y) \cdot dl = \sqrt{dF_x^2 + dF_y^2}. \quad (6.42)$$

Die Funktion  $q_S$  stellt dabei die normale Kontaktdruckverteilung,  $dl$  das Streckendifferential und  $dF_T$  das Differential des tangentialen Kontaktdrucks dar. Die Differentiale für die Komponenten in die verschiedenen Achsrichtungen werden von  $dF_x$  und  $dF_y$  repräsentiert (MANTRIOTA 2007B).

Wie beschrieben, wirkt der Kontaktdruck orthogonal zur Verbindung des jeweiligen Punktes mit dem Momentanpol. Entsprechend muss nach MANTRIOTA (2007B) auf der ganzen Dichtlippe, bezogen auf die Koordinaten des Momentanpols  $c_x$  und  $c_y$ , die Gleichung

$$\frac{dF_y}{-dF_x} = \frac{c_x - x}{c_y - y} \quad (6.44)$$

erfüllt sein.

Über Integration der Kontaktdruckverteilung über die Länge der Dichtlippe ( $\Gamma$ ) lässt sich die Dichtkraft bestimmen.

$$F_D = - \int_{\Gamma} q_S(x, y) dl \quad (6.45)$$

Für die über den Kontaktdruck entstehenden und maßgeblich vom Reibungskoeffizienten beeinflussten Kräfte in der Kontaktebene gilt nach MANTRIOTA (2007B):

$$F_x = \mu \cdot \int_{\Gamma} q_S(x, y) \cdot \frac{(y - c_y)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dl \quad (6.46)$$

$$F_y = -\mu \cdot \int_{\Gamma} q_S(x, y) \cdot \frac{(x - c_x)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dl \quad (6.47)$$

Für Momente gelten folgende Zusammenhänge MANTRIOTA (2007B):

$$M_z = -\mu \cdot \int_{\Gamma} q_s(x, y) \cdot \frac{x \cdot (x - c_x) + y \cdot (y - c_y)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dl \quad (6.48)$$

$$M_x = - \int_{\Gamma} y \cdot q_s(x, y) dl \quad (6.49)$$

$$M_y = \int_{\Gamma} x \cdot q_s(x, y) dl \quad (6.50)$$

Die Berechnung der Integrale für die Dichtkraft ist abhängig von der Geometrie des betrachteten Saugers. Ausgehend von den Modellen nach MANTRIOTA (2007B) (quadratische Sauger) und MANTRIOTA & MESSINA (2011) (runde Sauger) wurden Modelle zur Berechnung von rechteckigen und ovalen Saugern aufgebaut. Die Formeln für die Berechnung der einzelnen Geometrien können *Anhang A.5* entnommen werden.

Ausgehend von den beschriebenen mathematischen Zusammenhängen werden folgende Schritte zur Ermittlung der notwendigen Greifkraft durchgeführt:

1. Prüfung auf Versagensfall Abfallen:

Im ersten Schritt werden in Abhängigkeit der Geometrie des Saugers die Konstanten  $a_{KS}$  und  $b_{KS}$  für die Kontaktdruckverteilung bestimmt (vgl. *Anhang A.6*). Um der Voraussetzung eines positiven Kontaktdruckes zu genügen, wird anschließend der minimale Mittelwert für die Kontaktdruckverteilung bestimmt. Aus diesen Informationen lässt sich die benötigte Druckdifferenz ( $\Delta p^{fall}$ ) und somit die Greifkraft bestimmen.

2. Prüfung auf Versagensfall Verdrehen:

Ausgehend von den in Schritt 1 berechneten Konstanten  $a_{KS}$  und  $b_{KS}$  sowie des bekannten Reibkoeffizienten der Werkstoffkombination wird ein nichtlineares

Gleichungssystem aufgestellt. Aus diesem werden die Koordinaten des Momentanpols und der Mindestwert der Kontaktdruckverteilung gegen Verdrehen bestimmt. Daraus resultiert die benötigte Druckdifferenz gegen Verdrehen ( $\Delta p^{slip}$ ).

### 3. Bestimmung der Druckdifferenz:

Ausgehend von den zwei oben bestimmten Ergebnissen wird das Maximum bestimmt und als minimal nötige Druckdifferenz ( $\Delta p$ ) definiert.

$$\Delta p = \max[\Delta p^{slip}, \Delta p^{fall}] \quad (6.51)$$

Wie zu erkennen ist, wird im beschriebenen Modell der Verformungskoeffizient und der Wirkungsgrad von Vakuumsaugern nur für den Versagensfall des Abfallens berücksichtigt. Aufgrund der großen Unsicherheiten wie sich Sauger bei Verdrehbewegungen im Zusammenhang mit dem Verformungskoeffizienten verhalten, wird dieser hier vernachlässigt. Eine Möglichkeit die Verformung und die damit verbundene Verringerung der Saugfläche zu betrachten, ist die Umwandlung der oben verwendeten Streckenintegrale in Flächenintegrale.

### 6.3.3 Mechanische Greifer

Für die Berechnung von mechanischen Greifern muss eine Fallunterscheidung in Bezug auf die Geometrie der Greiferbacken erfolgen. Grund hierfür sind prismatische Backen, die je nach Orientierung des Greifers einen formschlüssigen Anteil und keine Flächen- sondern Linienkontakte besitzen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist die Art des Greifers (Winkel- oder Parallelgreifer) für die Kraftberechnung bei sachgemäßem Einsatz der Greifer zu vernachlässigen.

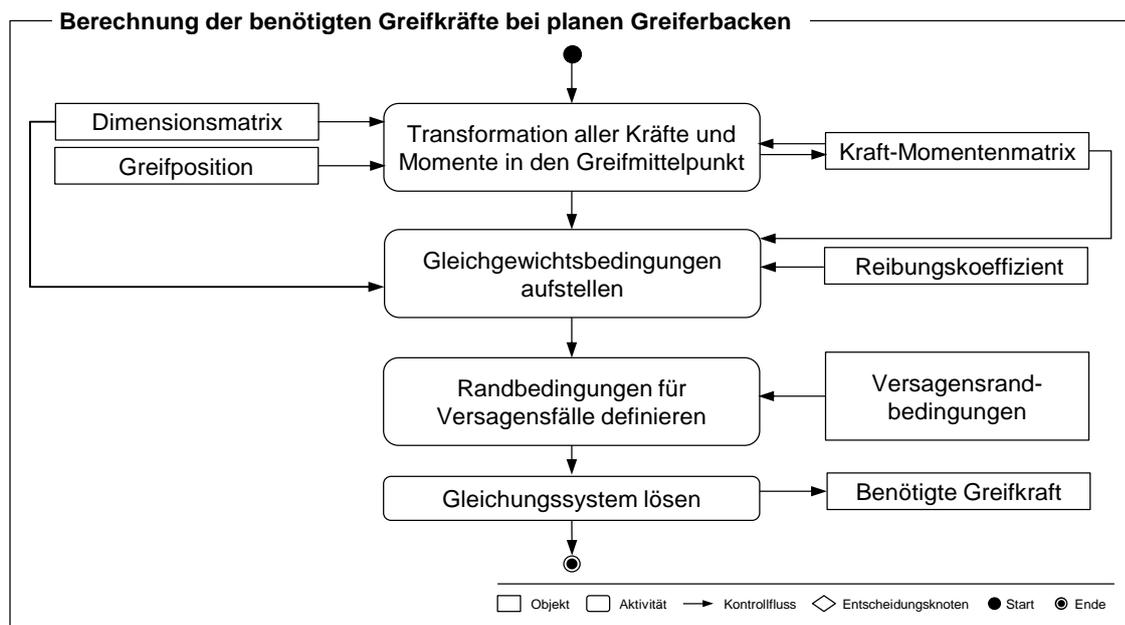


Abbildung 6-15: Ablauf der Greifkraftberechnung von mechanischen Greifern mit planen Backen

Die Berechnung der Greifkräfte für mechanische Greifer mit planen Backen basiert auf dem Modell von BARBER ET AL. (1986). *Abbildung 6-15* zeigt den Ablauf der Berechnung. Die grundsätzliche Annahme bei dem hier verwendeten Modell ist, dass der Kontaktdruck linear als Flächenlast modelliert wird. Für einen sicheren Griff muss der Kontaktdruck im Gegensatz zum Modell von BARBER ET AL. (1986) zu jedem Zeitpunkt des Handhabungsvorganges positiv sein. Analog zu den Berechnungen für die Vakuumgreifer muss jedoch auch hier das Modell dahingehend angepasst werden, dass eine Greifkraft für einen festgelegten Reibkoeffizienten berechnet wird und nicht umgekehrt.

Um die Aufstellung der Momentengleichgewichte zu vereinfachen, werden in Anlehnung an BARBER ET AL. (1986) alle Kraftkomponenten der Resultierenden in den sogenannten Greifmittelpunkt transformiert. Wie in *Abbildung 6-16* veranschaulicht, liegt dieser in der Mitte der Verbindungslinie, welche die geometrischen Mittelpunkte der zwei Kontaktflächen verbindet. Eine weitere Anpassung des Modells von BARBER ET AL. (1986) erfolgt in der Modellierung der Kontaktflächen, da diese nicht über Polygone, sondern über Rechtecke modelliert werden. Liegen Punkt- oder Linienkontakte vor, so werden diese über Rechtecke mit infinitesimal kleinen (Teil-) Abmessungen dargestellt. Andere Geometrien der Kontaktflächen können durch entsprechende Anpassungen ebenfalls mit dem beschriebenen Ansatz berechnet werden.

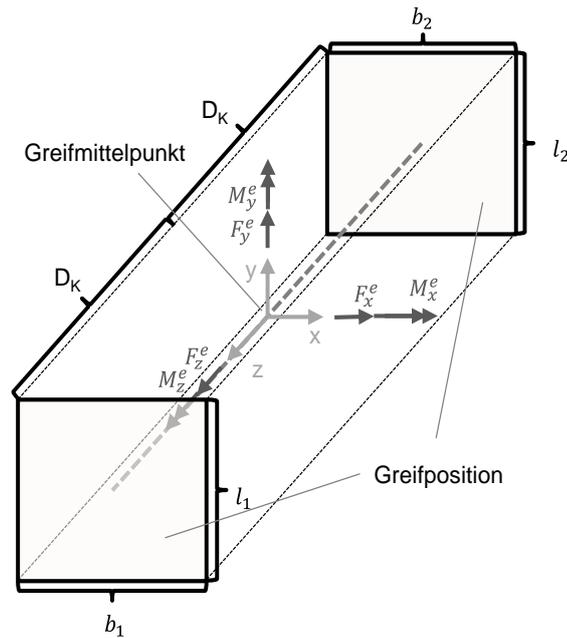


Abbildung 6-16: Greifmittelpunkt für die Greifkraftberechnung mechanischer Greifer (SCHMALZ ET AL. 2016)

Für die Berechnung der Greifkraft ( $F_{Gp}$ ) wird in Anlehnung an BARBER ET AL. (1986) der Kontaktdruck ( $q_p$ ) über den Greifflächen (1,2) integriert. Im Gegensatz zu BARBER ET AL. (1986), welche den Durchschnittswert aus den Greifkräften der beiden Kontaktflächen wählen, wird im vorliegenden Fall der größere Wert gewählt. Dies verspricht eine Erhöhung der Greifsicherheit.

$$F_{Gp} = \max \left[ \int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} \int_{-\frac{b_1}{2}}^{\frac{b_1}{2}} q_{p1} \, dx dy; \int_{-\frac{l_2}{2}}^{\frac{l_2}{2}} \int_{-\frac{b_2}{2}}^{\frac{b_2}{2}} q_{p2} \, dx dy \right] \quad (6.52)$$

Die Kontaktdruckverteilung an den beiden Greifflächen ( $q_{p1,2}$ ) lässt sich unter Verwendung des Mittelwerts des Kontaktdrucks  $q_0$  nach BARBER ET AL. (1986) wie folgt berechnen:

$$q_{p1}(x, y) = q_{0p1} + a_{KP} \cdot x + b_{KP} \cdot y \quad (6.53)$$

$$q_{p2}(x, y) = q_{0p2} - a_{KP} \cdot x - b_{KP} \cdot y \quad (6.54)$$

Die Koeffizienten  $a_{KP}$  und  $b_{KP}$  resultieren aus der Annahme des Modells, dass sich auf der Oberfläche von Greifbacken eine elastische Schicht befindet, die sich durch den Druck verformt.

Ausgehend vom Greifmittelpunkt werden anschließend (analog zur Nomenklatur für Vakuumgreifer in *Abschnitt 6.3.2*) folgende Gleichgewichtsbedingungen aufgestellt:

$$F_x^{(e)} + F_x^1 + F_x^2 = 0 \quad (6.55)$$

$$F_y^{(e)} + F_y^1 + F_y^2 = 0 \quad (6.56)$$

$$F_z^{(e)} + F_z^1 + F_z^2 = 0 \quad (6.57)$$

$$M_x^{(e)} + M_x^1 + M_x^2 = 0 \quad (6.58)$$

$$M_y^{(e)} + M_y^1 + M_y^2 = 0 \quad (6.59)$$

$$M_z^{(e)} + M_z^1 + M_z^2 = 0 \quad (6.60)$$

Der Momentanpol wird ähnlich wie bei den Berechnungen zu Vakuumgreifern für die Versagensfälle Herausrutschen und Herausdrehen in der x-y-Ebene des Ursprungskordinatensystems angenommen. Die für jeden Punkt der Kontaktfläche notwendigen Bedingungen für die einer möglichen Relativbewegung entgegengesetzt wirkenden Reibkräfte, werden mittels der Annahmen zu den Tangentialkräften bei MANTRIOTA (2007B) adressiert.

Basierend auf diesem Ansatz lassen sich die Kräfte und Momente an den Backen unter Verwendung des Momentanpols ( $c_x, c_y$ ) und des Abstands der Kontaktflächen vom Greifmittelpunkt ( $D_K$ ) wie folgt berechnen:

$$F_z^{1/2} = (-/+ ) \int_{A_P^{1/2}} q_p^{1/2}(x, y) dA \quad (6.61)$$

$$F_x^{1/2} = \mu \int_{A_P^{1/2}} q_p^{1/2}(x, y) \cdot \frac{(y - c_y)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dA \quad (6.62)$$

$$F_y^{1/2} = -\mu \int_{A_P^{1/2}} q_p^{1/2}(x, y) \cdot \frac{(x - c_x)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dA \quad (6.63)$$

$$M_z^{1/2} = -\mu \int_{A_P^{1/2}} q_p^{1/2}(x, y) \cdot \frac{x \cdot (x - c_x) + y \cdot (y - c_y)}{\sqrt{(y - c_y)^2 + (x - c_x)^2}} dA \quad (6.64)$$

$$M_x^{1/2} = (-/+)( \int_{A_P^{1/2}} y \cdot q_p^{1/2}(x, y) dA + F_y^{1/2} \cdot D_K ) \quad (6.65)$$

$$M_y^{1/2} = (+/-)( \int_{A_P^{1/2}} x \cdot q_p^{1/2}(x, y) dA + F_x^{1/2} \cdot D_K ) \quad (6.66)$$

Neben den oben beschriebenen Gleichgewichtsbedingungen (vgl. *Formel (6.55)* bis *Formel (6.60)*) muss eine weitere Randbedingung (Versagensrandbedingung) bezüglich des Verdrehens des Handhabungsobjektes beachtet werden. Unter der Voraussetzung einer zu jedem Zeitpunkt des Handhabungsprozesses positiven Kontaktdruckverteilung und Verwendung der Konstanten des Kontaktdrucks  $a_{KP}$ ,  $b_{KP}$  sowie den Längen ( $l_1, l_2$ ) und Breiten ( $b_1, b_2$ ) der Greifposition muss für den Mittelwert des Kontaktdrucks ( $q_{0p}$ ) gelten:

$$q_{0p}^1 \stackrel{!}{>} \frac{1}{2} (|a_{KP}| \cdot b_1 + |b_{KP}| \cdot l_1) \quad (6.67)$$

$$q_{0p}^2 \stackrel{!}{>} \frac{1}{2} (|a_{KP}| \cdot b_2 + |b_{KP}| \cdot l_2). \quad (6.68)$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen und den zwei obenstehenden Ungleichungen entsteht ein Gleichungssystem, welches in ein nichtlineares Optimierungsproblem überführt und gelöst werden kann.

## Mechanische Greifer mit prismatischen Backen

Im Gegensatz zu planen Backen ist für Greifer mit prismatischen Backen kein allgemeingültiges Modell bekannt, welches alle in Kapitel 3 definierten Anforderungen erfüllt. Die Herausforderung besteht bei der Berechnung von Greifkräften prismatischer Backen darin, dass keine Flächenkontakte, sondern Linienkontakte vorliegen. Des Weiteren liegen bei der Normaldruckverteilung neben Anteilen in z-Richtung, je nach Orientierung des Prismas, auch Anteile in x- und y-Richtung vor. Gleiches gilt für die Tangentialdruckverteilung, die ebenfalls Komponenten in allen Achsrichtungen besitzt.

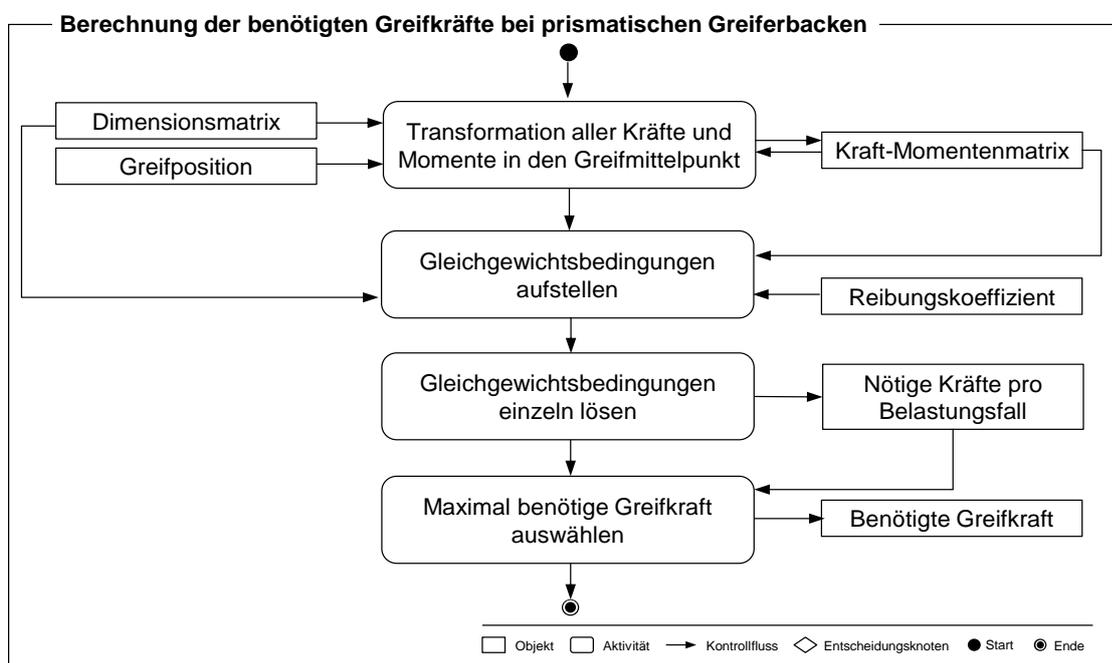


Abbildung 6-17: Ablauf der Greifkraftberechnung von mechanischen Greifern mit prismatischen Backen

Um trotz der Komplexität der Aufgabenstellung Aussagen über die erforderlichen Greifkräfte bei prismatischen Backen treffen zu können, wurde ein vereinfachtes Modell auf Basis der Standardformeln (vgl. SEEGRÄBER (1993), HESSE (2004), WOLF & STEINMANN (2004)) entwickelt.

Grundsätzlich lassen sich die wirkenden Kräfte bei symmetrischen prismatischen Backen wie in *Abbildung 6-18* dargestellt beschreiben. Relevant sind insbesondere die Reibkraft  $F_R$ , die Greifkraft  $F_{Gpr}$ , der Sicherheitsfaktor  $S_{FG}$  sowie die Geometrieparameter  $w$  und  $D_C$ .

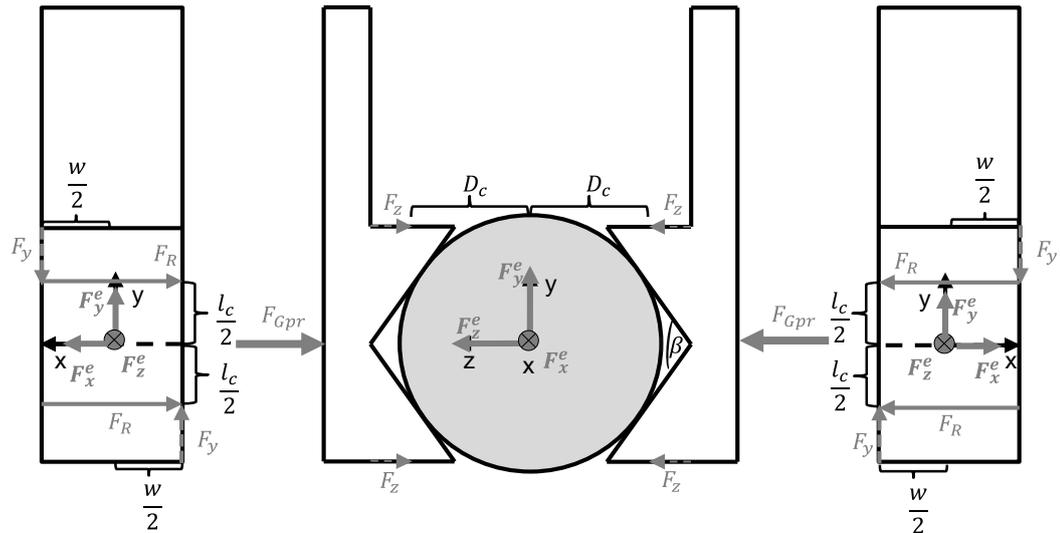


Abbildung 6-18: Kräftesystem von prismatischen Backen

Wie Abbildung 6-18 zeigt, liegt je nach Belastungsfall ein Kraftschluss (Beschleunigung in x-Richtung) oder Formschluss (Beschleunigung in y- oder z-Richtung) vor (SEEGRÄBER 1993). Ausgehend von den in der Literatur vorliegenden Formeln kann die benötigte Greifkraft aus dem Maximum aller möglichen bzw. vorliegenden Belastungsfälle bestimmt werden:

$$F_{Gpr} = \max \left[ \begin{array}{l} F_z^e + F_y^e \cdot \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2} \\ F_x^e \cdot \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2 \cdot \mu} \end{array} \right] \cdot S_{FG} \quad (6.69)$$

In der Literatur werden mögliche auftretende Momente bei prismatischen Backen nicht betrachtet. Nach obenstehendem Kraftmodell lassen sich jedoch folgende Wirkungszusammenhänge ableiten:

#### Momente um die z-Achse

$$M_z^e = 4 \cdot F_R \cdot \frac{l_c}{2} + 4 \cdot F_y \cdot \frac{w}{2} = F_{Gpr} \cdot \left( \frac{\mu \cdot l_c}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \frac{w}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \quad (6.70)$$

Momente um die y-Achse

$$M_y^e = 4 \cdot F_R \cdot D_c + 4 \cdot F_z \cdot \frac{w}{2} = F_{Gpr} \cdot \left( \frac{2 \cdot \mu \cdot D_c}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} + w \right) \quad (6.71)$$

Momente um die x-Achse

$$\begin{aligned} M_x^e &= 4 \cdot F_R \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot D_c + 4 \cdot F_R \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \frac{l_c}{2} = \\ &= F_{Gpr} \cdot \mu \cdot \left( 2 \cdot D_c + \frac{l_c}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \end{aligned} \quad (6.72)$$

Für auftretende Momente kann die Greifkraft für prismatische Greifbacken ( $F_{Gpr}$ ) analog zu den Kräften oben berechnet werden.

$$F_{Gpr} = \max \left[ \begin{array}{l} F_z^e + F_y^e \cdot \frac{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2} \\ F_x^e \cdot \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2 \cdot \mu} \\ M_z^e \cdot \left( \frac{\mu \cdot l_c}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \frac{w}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right)^{-1} \\ M_y^e \cdot \left( \frac{2 \cdot \mu \cdot D_c}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} + w \right)^{-1} \\ M_x^e \cdot \left( \mu \cdot \left( 2 \cdot D_c + \frac{l_c}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \right)^{-1} \end{array} \right] \cdot S_{FG} \quad (6.73)$$

Bei einer kombinierten Belastung mit Kräften und Momenten muss der größere der beiden Greifkraftwerte gewählt werden.

Auch wenn das entwickelte Modell für prismatische Greifer im Vergleich zu den anderen Modellen rudimentär ist, lassen sich damit die wichtigsten Versagensfälle abdecken. Insbesondere die Berechnungen für angreifende Momente gehen dabei über den Stand der Technik hinaus.

## 6.4 Automatisierte Konstruktion

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Konstruktion für additive Fertigungsverfahren ausgelegt werden. Aufgrund des hohen Gestaltungsspielraumes sind insbesondere die mit dieser Zielsetzung konstruierten Greifergrundkörper für Vakuumgreifer nicht oder nur sehr aufwendig mit anderen Fertigungsverfahren realisierbar. Die additive Fertigung bietet für die hier beschriebene Anwendung folgende von BREUNINGER ET AL. (2013) beschriebenen Vorteile:

1. Fertigung von Strukturen mit Hinterschneidungen möglich,
2. Eignung für bionische Leichtbaustrukturen und
3. Reduktion des Montageaufwandes durch Funktionsintegration.

Bei der automatisierten Konstruktion der in diesem Fall benötigten Bauteile stellt die Gestaltung der Schnittstellen zwischen Wirkelement und Grundkörper eine Herausforderung dar. Diese unterliegen zwar gewissen definierten geometrischen Abstufungen, sind in den meisten Fällen jedoch unternehmensspezifisch gestaltet. Ein Beispiel hierfür ist die Anschlussgröße des Nippels, der den Vakuumgreifergrundkörper mit dem Sauger verbindet.

Als Eingangsdaten für die automatisierte Konstruktion werden folgende Parameter benötigt:

- Schnittstellen industriell erhältlicher Greifergrundkörper (mechanische Greifer); Schnittstellen industriell erhältlicher Sauger sowie Geometriedaten von Vakuum- bzw. Druckluftkomponenten (Vakuumgreifer),
- CAD-Daten der Handhabungsobjekte,
- Ergebnisdaten der Auslegung und
- Nutzereingaben, welche sich auf die automatisierte Konstruktion beziehen.

### **6.4.1 Automatisierte Konstruktion der Backen mechanischer Greifer**

Bei der Konstruktion der Greifbacken handelt es sich um eine vergleichsweise einfach zu realisierende Parametrisierungsaufgabe. Für die Umsetzung basierend auf obenstehenden Eingangsdaten wurde ein parametrisches Modell realisiert. Dafür wurde sowohl eine Grundtopologie für Backen mit ebener Wirkfläche als auch für Backen mit prismatischer Geometrie definiert (vgl. *Abbildung 6-6*). Diese werden entsprechend der Vorgaben aus der Auslegung oder Flexibilisierung parametrisiert bzw. konstruiert und ausgegeben. Der Grundablauf gliedert sich dabei folgendermaßen:

1. Einlesen der Eingangsdaten
2. Überprüfen des verfügbaren Bauraumes
3. Parametrieren der Backen basierend auf Eingangsdaten
4. Einbringen der Schnittstellen zum Greifergrundkörper
5. Ausgeben der CAD-Datei
6. Prüfen der Festigkeit

### **6.4.2 Automatisierte Konstruktion der Greifergrundkörper von Vakuumgreifern**

Im Gegensatz zu mechanischen Greifern, bei welchen die Grundkörper zugekauft werden, müssen diese bei Vakuumgreifern zur Verbindung von Handhabungsgerät und Wirkelementen meist konstruiert werden. Es ist dafür keine standardisierte Vorgehensweise bekannt, dementsprechend vielfältig sind die industriell realisierten Lösungen. Die Konstruktionsaufgabe stellt aufgrund der höheren Anzahl an Freiheitsgraden eine größere Herausforderung dar als bei mechanischen Greifern. Nichtsdestotrotz handelt es sich für die Erstellung des Grundkörpers weniger um ein wissenschaftliches- als vielmehr um ein Implementierungsproblem, da die grundlegende Lösung der Aufgabenstellung bekannt ist und diese nur modelliert werden muss. Mit den unten beschriebenen Randbedingungen und am Markt erhältlichen 3D-Modellierungsprogrammen, welche automatisierte Konstruktionsaufgaben unterstützen, ist dies verhältnismäßig einfach möglich.

Grundsätzlich lassen sich additiv gefertigte Vakuumgreifer-Grundkörper in die drei in *Abbildung 6-19* gezeigten Kategorien hinsichtlich des Grades der umgesetzten Funktionsintegration einteilen. Die Komplexität der Auslegung ist dabei als steigend zu betrachten, die Anzahl der benötigten Montageelemente (Verschraubungen, Schläuche etc.) dagegen als fallend.

1. Struktur additiv gefertigt, Vakuumversorgung konventionell mit Verschlauchung
2. Struktur additiv gefertigt, Vakuumversorgung mittels gedruckter Kanäle
3. Struktur additiv gefertigt, Vakuumversorgung mittels in Struktur integrierter Kanäle

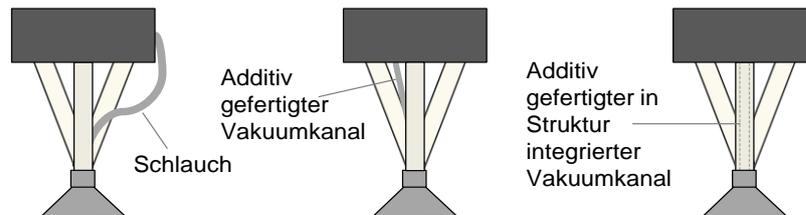


Abbildung 6-19: Einteilung additiv gefertigter Grundkörper von Vakuumgreifern

Die Auslegung von Vakuumversorgungsleitungen stellt ein eigenes Forschungsgebiet dar und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Grundsätzliche Anmerkungen dazu finden sich in HESSE (2004). Grundlegendere Betrachtungen können FRITZ (2017) entnommen werden.

Die Beachtung des freien Volumens ist bei der Konstruktion ein entscheidender Faktor. Hier kann mit Hüllkörpern gearbeitet werden, um eine kollisionsfreie Kontur zu garantieren. Der höchste Punkt des Hüllkörpers in Anfahrriichtung dient als Basis für die Konstruktion der Flanschanbindung. Dabei sollten neben Toleranzen für das Handhabungsgerät auch die Hubbewegungen des Saugers bei der Vakuumierung beachtet werden, um Kollisionen mit dem Handhabungsobjekt zu vermeiden.

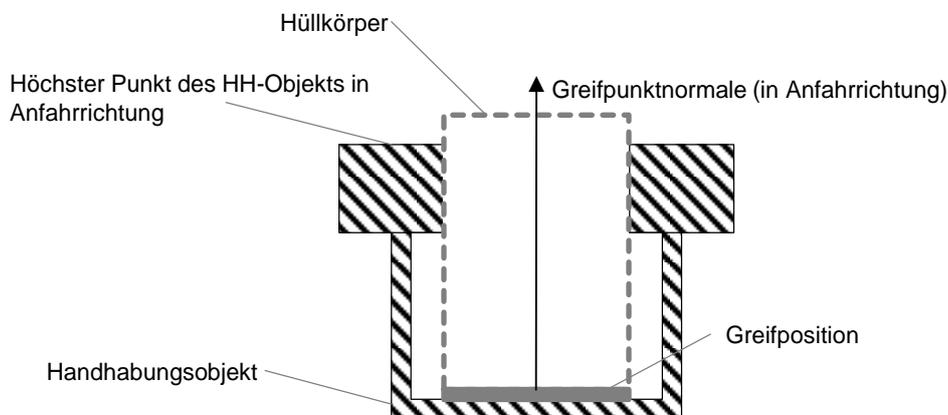
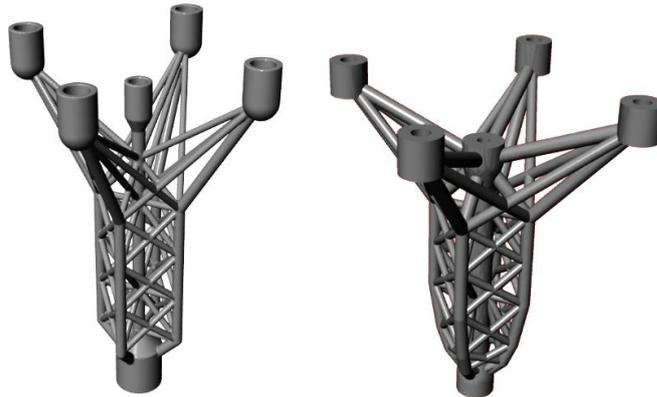


Abbildung 6-20: Verwendung von Hüllkörpern zur Generierung eines kollisionsfreien Bauraums für Vakuumgreifer-Grundkörper

Für die Gestaltung der Struktur kann auf Methoden des Leichtbaus zurückgegriffen werden, um Masse einzusparen. Beispielhaft dargestellt sind in *Abbildung 6-21* links eine Konstruktion unter Verwendung von Zugdreiecken, sowie rechts unter Verwendung der Kraftkegelmethode (vgl. MATTHECK 2010). Die erstellten Grundkörper müssen anschließend noch mittels geeigneter Methoden, beispielsweise einer FEM-Analyse, hinsichtlich ihrer Festigkeit untersucht werden.



*Abbildung 6-21: Beispiele für Grundkörper von Vakuumgreifern zum Greifen in einem Behälter*

Für die Konstruktion der Grundkörper von Vakuumgreifern wurde ein wissenschaftsbasiertes Konstruktionsmodell entwickelt, welches basierend auf bionischen Strukturen die Verbindung zwischen dem Handhabungsgerät und dem Vakuumsauger realisiert. In sieben Schritten werden alle nötigen Komponenten entsprechend der gegebenen Rahmenbedingungen modelliert:

1. Einlesen der Eingangsdaten
2. Überprüfen des verfügbaren Bauraums
3. Konstruieren der Flanschaufnahme
4. Konstruieren der Trägerstruktur
5. Einbringen der Vakuumelemente (Saugerschnittstelle sowie ggf. Vakuumkanäle)
6. Ausgeben der CAD-Datei
7. Prüfen der Festigkeit

## 6.5 Algorithmus zur Steigerung der Greiferflexibilität

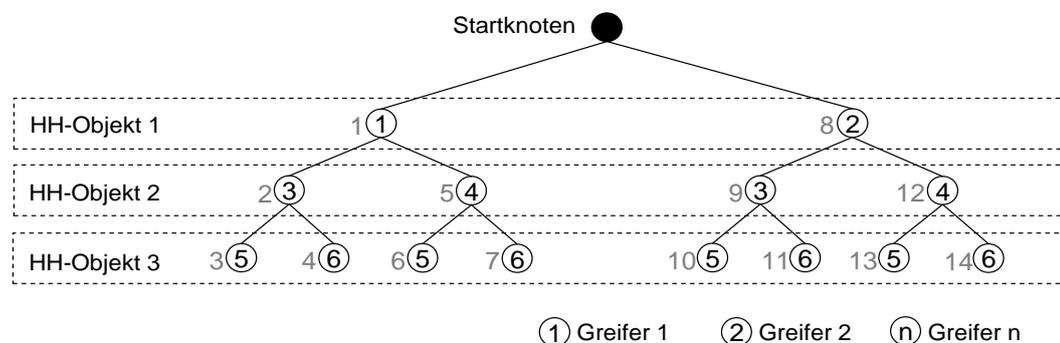
### 6.5.1 Ansatz und Einordnung des Verfahrens

Industrielle Greifer besitzen aufgrund ihres einfachen Aufbaus im Vergleich zu den meisten anthropomorphen Greifern eine inhärent kleinere Flexibilität. Mittels der beschriebenen rechnergestützten Auslegung und Auswahl ist es möglich, große Lösungsräume für die Handhabung von Objekten zu generieren und zu dokumentieren. Besonders hervorzuheben ist, dass dabei auf die Lösungsräume mehrerer Greiferarten mit deren jeweiligen Wirkelementen zurückgegriffen werden kann. Ziel des hier beschriebenen Verfahrens zur softwaregestützten Flexibilisierung von Greifersystemen ist, die Lösungsräume mehrerer Handhabungsobjekte zu analysieren und daraus neue Lösungsräume mit einer minimalen Anzahl an benötigten Greifern zu generieren. Diese werden abschließend in physische Greifer-Wirkelementkombinationen überführt.

Das entstehende Optimierungsproblem kann unter der Nebenbedingung, dass alle Handhabungsobjekte gegriffen werden müssen, anhand von zwei Zielfunktionen beschrieben werden:

1. Minimiere die Anzahl der benötigten Greifern
2. Maximiere die Qualität der Greifer

Es handelt sich um ein Auswahlproblem, welches sich mit der Graphentheorie beschreiben lässt. Die Knoten in *Abbildung 6-22* repräsentieren die Greifer, während die verschiedenen Ebenen des Baumes die jeweilig zugehörigen Handhabungsobjekte darstellen.



*Abbildung 6-22: Baumdiagramm zur methodischen Generierung möglicher Greiferkombinationen*

Der in *Abbildung 6-22* visualisierte Baum wird mittels einer Tiefensuche auf mögliche Greiferkombinationen hin analysiert. Dabei sucht der Algorithmus ausgehend von einem Startknoten alle theoretisch möglichen Greiferkombinationen. Der Ablauf, mit welchem der Algorithmus den Baum durchläuft, ist in *Abbildung 6-22* beispielhaft mittels der Ziffern neben den Knoten visualisiert. Die Auslegungsparameter der Greifer werden innerhalb des Verfahrens mittels Interpolation aufeinander abgebildet, um so mögliche Schnittmengen zu identifizieren und zu quantifizieren. Wird eine zulässige Kombination gefunden (Greifer  $n$  besitzt Schnittmengen mit Greifer  $m$  und kann mittels Interpolation auf ihn abgebildet werden), so wird diese in einer greiferartspezifischen Kombinationsmatrix abgespeichert. Ist die Tiefensuche für jede Greiferart abgeschlossen, werden die einzelnen Kombinationsmatrizen der Greiferarten in eine übergeordnete Kombinationsmatrix überführt. Anschließend ist es mittels einer ganzzahligen linearen Optimierung möglich, die minimal notwendige Anzahl für das gegebene Spektrum an Handhabungsobjekten zu ermitteln. Ausgehend von der Minimalanzahl an nötigen Greifern, kann im Folgenden eine Kombination ausgewählt werden.

Die so geschaffene Flexibilität kann nach HEGER (2007) als statische Flexibilität eingeordnet werden, da die Zustände auf welche sich das System einstellen muss von vornherein bekannt sind. Nach den Kriterien von STRASSER (2012) handelt es sich um eine Flexibilisierung des physischen Systems sowie einer Flexibilisierung des Greifprozesses. Begründet werden kann dies damit, dass sowohl die Greifer als auch der Prozess an die gestellten Aufgaben angepasst werden. Beispielsweise werden gewisse Greifpositionen anderen vorgezogen und der Prozess somit verändert.

Wird das Verfahren für Objekte eingesetzt, welche im Verlauf des Handhabungsprozesses bearbeitet werden, so ist nach CARDAUN (1981) jede Stufe der Fertigung als individuelles Werkstück zu betrachten.

In den folgenden Abschnitten wird der Ablauf des Vorgehens unter Verwendung von Ablaufdiagrammen weiter spezifiziert.

### **6.5.2 Ablauf des Algorithmus**

Nach dem Einlesen der Auslegungsdaten der Objekte, werden die Handhabungsobjekte mit den ihnen zugeordneten Greifern von einem Tiefensuche-Algorithmus durchlaufen. Dabei werden die Kennwerte der Greiferlösungen verschiedener Handhabungsobjekte mittels Interpolation, wenn möglich, aufeinander

der abgebildet. Aus den dabei entstehenden greiferartspezifischen Kombinationsmatrizen werden in einem nachfolgenden Schritt greiferartübergreifende Kombinationsmatrizen generiert. Unter Greiferart ist in diesem Zusammenhang diejenige mit ihren jeweiligen zugeordneten Wirkelementen zu verstehen, welche für die Handhabung eines spezifischen Handhabungsobjekt-Spektrums geeignet sind. Neben einer reellen Kombinationsmatrix, welche die tatsächlichen Kennwerte der Greiferkombinationen erhält, wird noch eine boolesche Kombinationsmatrix generiert. Diese enthält ausschließlich die Information, aus welchen Einzelgreiferkonfigurationen die jeweiligen Kombinationen zusammengefügt wurden. Die Komprimierung der Daten erlaubt einen deutlich schnelleren Ablauf der darauf folgenden ganzzahligen linearen Optimierung. Für die beste gefundene Lösung wird anschließend nochmals eine Interpolation durchgeführt, um wieder reelle Kennwerte zu erhalten. Damit kann abschließend ein kombinierter Greifer ausgeleitet werden.

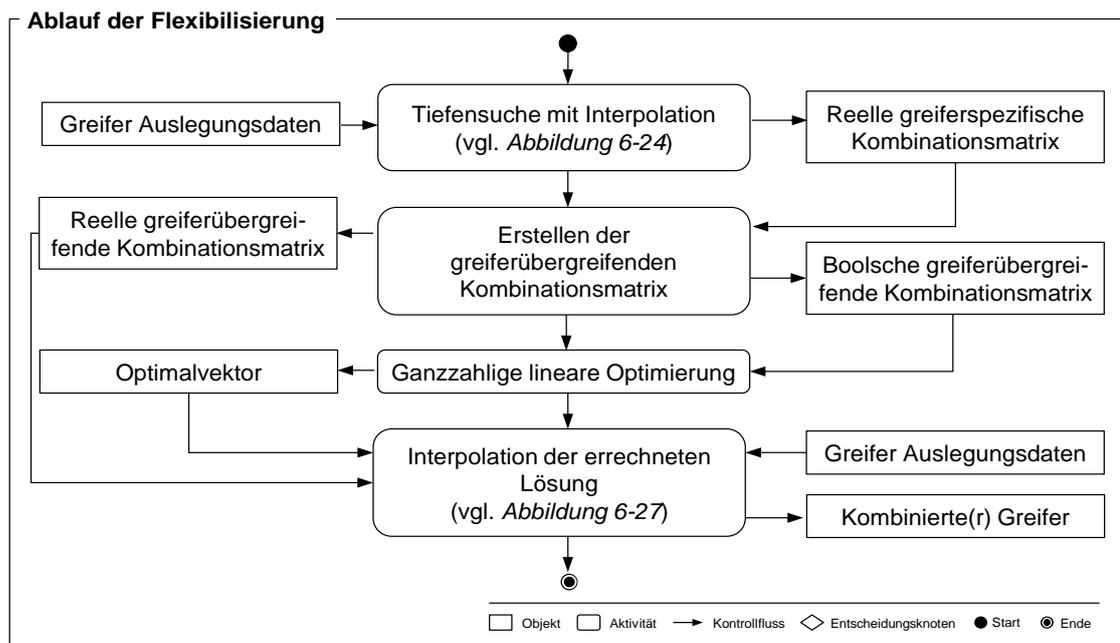
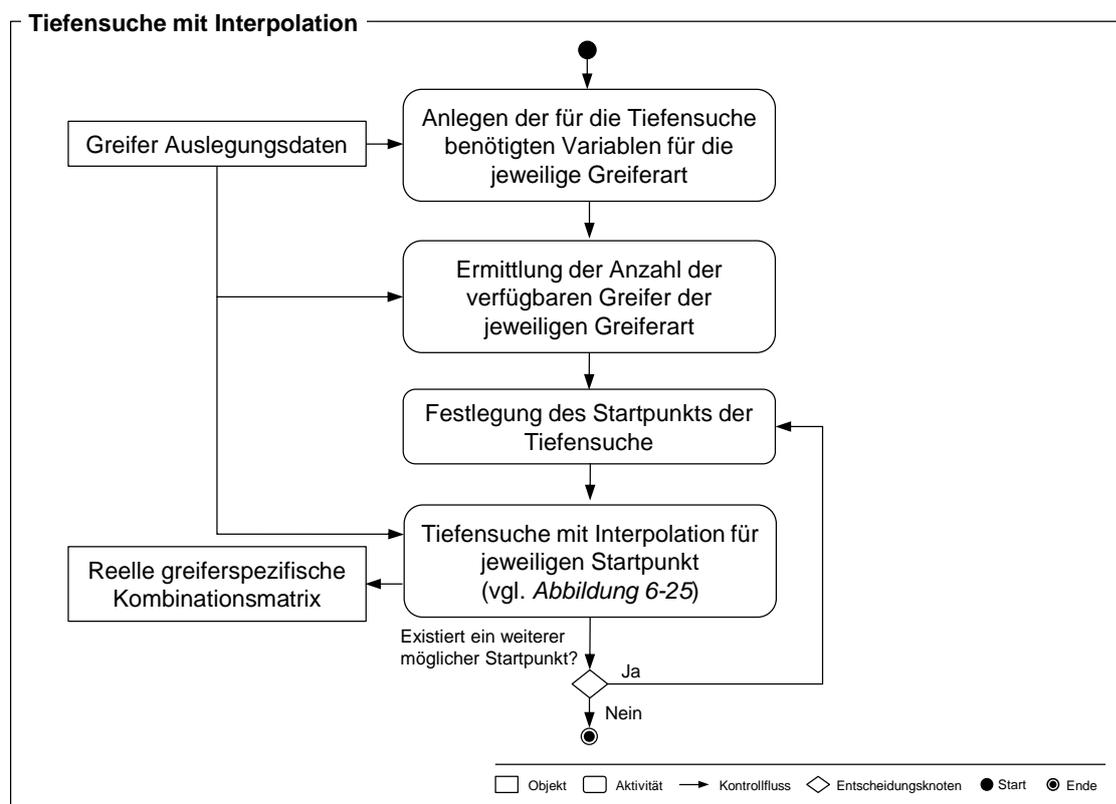


Abbildung 6-23: Ablauf des Algorithmus zur Greiferflexibilisierung

### 6.5.3 Anwendung der Tiefensuche

Wie in *Abschnitt 6.5.1* beschrieben, kann ein System aus Handhabungsobjekten und verschiedenen zugehörigen Greifern als Baum, bestehend aus Knoten und Kanten, modelliert werden. Um das Ziel der Flexibilisierung zu erreichen, ist es notwendig, alle Kombinationen aus verschiedenen Greiferkonfigurationen für die unterschiedlichen Handhabungsobjekte miteinander abzugleichen. Hierfür bietet

sich die Tiefensuche an, da sie einen Baum solange von Knoten zu Knoten in die Tiefe analysiert bis kein passender Knoten mehr existiert. Anschließend kehrt das Verfahren zum letzten Knoten zurück (MEHLHORN ET AL. 2010). Hauptvorteil der Tiefensuche ist somit, dass das zu untersuchende System vollständig analysiert wird. Aufgrund der großen Zahl an theoretisch möglichen Kombinationen ist dies mit einem großen Rechenaufwand und einer vergleichsweise langen Rechenzeit verbunden. Der Vorteil dabei ist, dass immer nur ein Ast abgespeichert wird und deswegen nur wenig Speicher benötigt wird. Der Speicherbedarf wächst entsprechend linear mit der Suchtiefe (OTTMANN & WIDMAYER 2012). Da die Greiferlösungen der verschiedenen Handhabungsobjekte iterativ paarweise verglichen werden, ist es notwendig, die Startebene des Verfahrens zu rollieren, um sicherzustellen, dass alle Teillösungen gefunden werden (vgl. *Abbildung 6-24*). Die Tiefensuche muss bei  $n$  Greifobjekten folglich  $n$ -Mal durchlaufen werden. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit des Algorithmus (bei gleichzeitigem Verlust an Performanz) könnte durch eine vollständige Permutation der Greifobjekt-Kombinationen erreicht werden.



*Abbildung 6-24: Ablauf der Tiefensuche mit Interpolation*

Ausgehend von dem in *Abschnitt 6.5.2* beschriebenen Grobablauf wird nach der Initialisierung der Variablen der jeweiligen Greiferart die Anzahl der entspre-

chenden Greifer ermittelt. Das Greifobjekt mit der niedrigsten Nummer wird anschließend als Startebene definiert. Da zu diesem Zeitpunkt keine bestehenden Greifer existieren, auf welche abgebildet werden könnte, wird der erste Greifer zusätzlich als bestehender Greifer definiert. Ab diesem Zeitpunkt wird das jeweilige Ergebnis des vorherigen Durchlaufes der Tiefensuche als bestehender Greifer verwendet.

Im Rahmen der Interpolation wird geprüft, inwieweit sich der neu geladene Greifer auf den bestehenden Greifer abbilden lässt. Der genaue Ablauf soll im folgenden Kapitel beschrieben werden.

#### 6.5.4 Interpolation der Greiferkennwerte

Die Grundvoraussetzung für die Durchführung einer Interpolation zwischen zwei Greifern ist, dass diese geometrische Schnittmengen besitzen. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Kontaktfläche der Greiferbacke eines Handhabungsobjektes A eine geometrische Schnittmenge mit der Greiferbacke eines Handhabungsobjektes B besitzt.

In einer vom Nutzer vorgegebenen Diskretisierung gibt die Auslegung die Größen der möglichen Wirkelemente für eine Kontaktstelle an. Entsprechend kann ein Verlust an möglichen Lösungen entstehen, wenn diese zu grob gewählt wird. Insbesondere bei kleinen Handhabungsobjekten ist somit auf eine ausreichend feine Diskretisierung beim Einlesen in die Auslegung zu achten.

Mathematisch gesehen, stellt eine Interpolation die Verbindung von diskreten Daten, sogenannten Stützstellen, durch eine stetige Funktion dar. Es kann dabei zwischen verschiedenen Formen der Interpolation unterschieden werden (KARPFINGER 2015). Für die hier vorliegende Problemstellung wird auf die lineare sowie die bilineare Interpolation zurückgegriffen. Lineare Interpolation bedeutet die stückweise Verbindung von zwei Stützstellen  $(x_0, y_0)$  und  $(x_1, y_1)$  mittels einer Geraden  $f(x)$ . Bei linearer Interpolation gilt für die Gerade (KARPFINGER 2015):

$$f(x) = y_0 \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} + y_1 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (6.74)$$

Bei der bilinearen Interpolation handelt es sich ebenfalls um eine lineare Interpolation, jedoch in zwei Dimensionen. Dies bedeutet, dass sowohl Stützstellen in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung existieren. Zur Lösung des Problems kann entweder ein

Gleichungssystem aufgestellt und gelöst oder alternativ dazu die Lösung stückweise zusammengesetzt werden (PRESS & VETTERLING 1999). Zweiteres Verfahren soll im Folgenden verfolgt werden. Dabei wird im ersten Schritt jeweils entlang einer der Achsen interpoliert und die Ergebnisse dieser Berechnung anschließend einer erneuten linearen Interpolation unterzogen.

Ausgehend von einem bestehendem Greifer (bzw. dem Ergebnis des vorherigen Schrittes der Tiefensuche), welcher die Koordinaten liefert, stellt der neu geladene Greifer die zugehörigen Stützstellen für die Interpolation. Bei mechanischen Greifern gilt es, zu den entsprechenden Geometrien der Kontaktstellen die zugehörigen Greifkräfte sowie Dimensionen und Ausprägungen der Backen zu bestimmen, bei Vakuumgreifern die Geometrie und Dimensionen der Sauger samt zugehöriger Greifkraft. Je nachdem, wie viele Dimensionen die geometrischen Parameter umfassen, über welche interpoliert wird, kommen unterschiedliche Interpolationsverfahren zum Einsatz. Bei der Interpolation über einen einzelnen geometrischen Parameter wird die eindimensionale lineare Interpolation verwendet. Dies trifft auf die runden Vakuumsauger zu:

- CSC-Greifer: Interpolation über den Durchmesser des Saugers ( $D_S$ ) zur Ermittlung der Greifkraft.

Bei mehr als einem Parameter, über welchen interpoliert wird, kommt die bilineare Interpolation zum Einsatz. Dies betrifft entsprechend alle übrigen Wirkelementarten:

- PPC- und APC-Greifer: Interpolation über die Länge ( $L_B$ ) und Breite ( $B_B$ ) der Greifbacke zur Ermittlung der Greifkraft und Dicke der Backenverlängerung ( $D_V$ ).
- PVC- und AVC-Greifer: Interpolation über die Länge ( $L_B$ ) und die Dicke ( $D_B$ ) der Greifbacke zur Ermittlung der Greifkraft und Dicke der Backenverlängerung ( $D_V$ ).
- OSC-Greifer: Interpolation über die Länge ( $L_{OS}$ ) und die Breite ( $B_{OS}$ ) des Saugers zur Ermittlung der Greifkraft.
- RSC-Greifer: Interpolation über die Länge ( $L_S$ ) und Breite ( $B_S$ ) des Saugers zur Ermittlung der Greifkraft.

Der in *Abbildung 6-25* abgebildete Ablauf wird als rekursive Funktion spezifisch für jede einzelne Greifer- und Wirkelementart durchlaufen, bis keine neue Kombination mehr möglich ist.

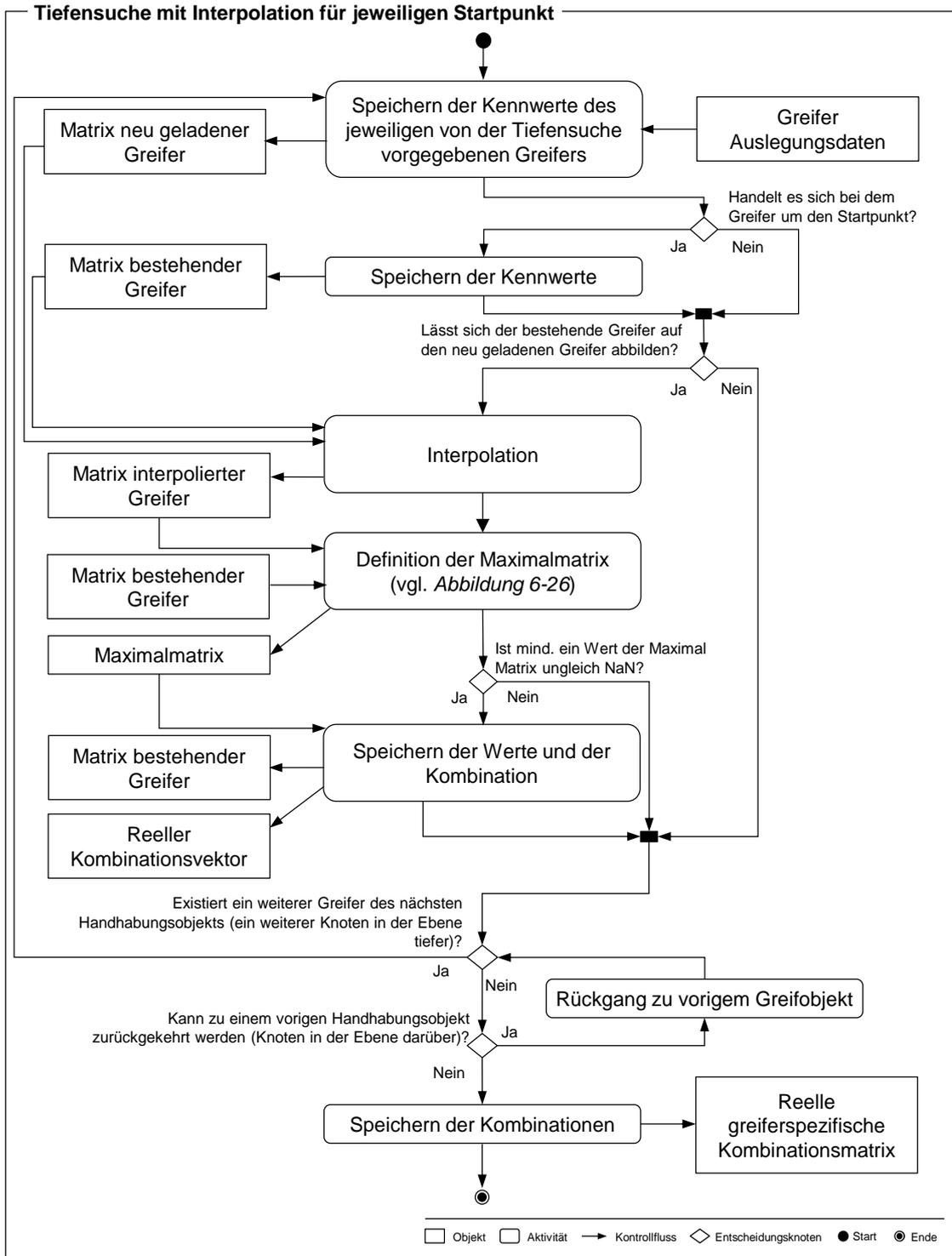


Abbildung 6-25: Ablauf der Tiefensuche mit Interpolation

Ausgehend von den Ergebnissen der Interpolation muss anschließend die finale Maximalmatrix erstellt werden (vgl. Abbildung 6-26)

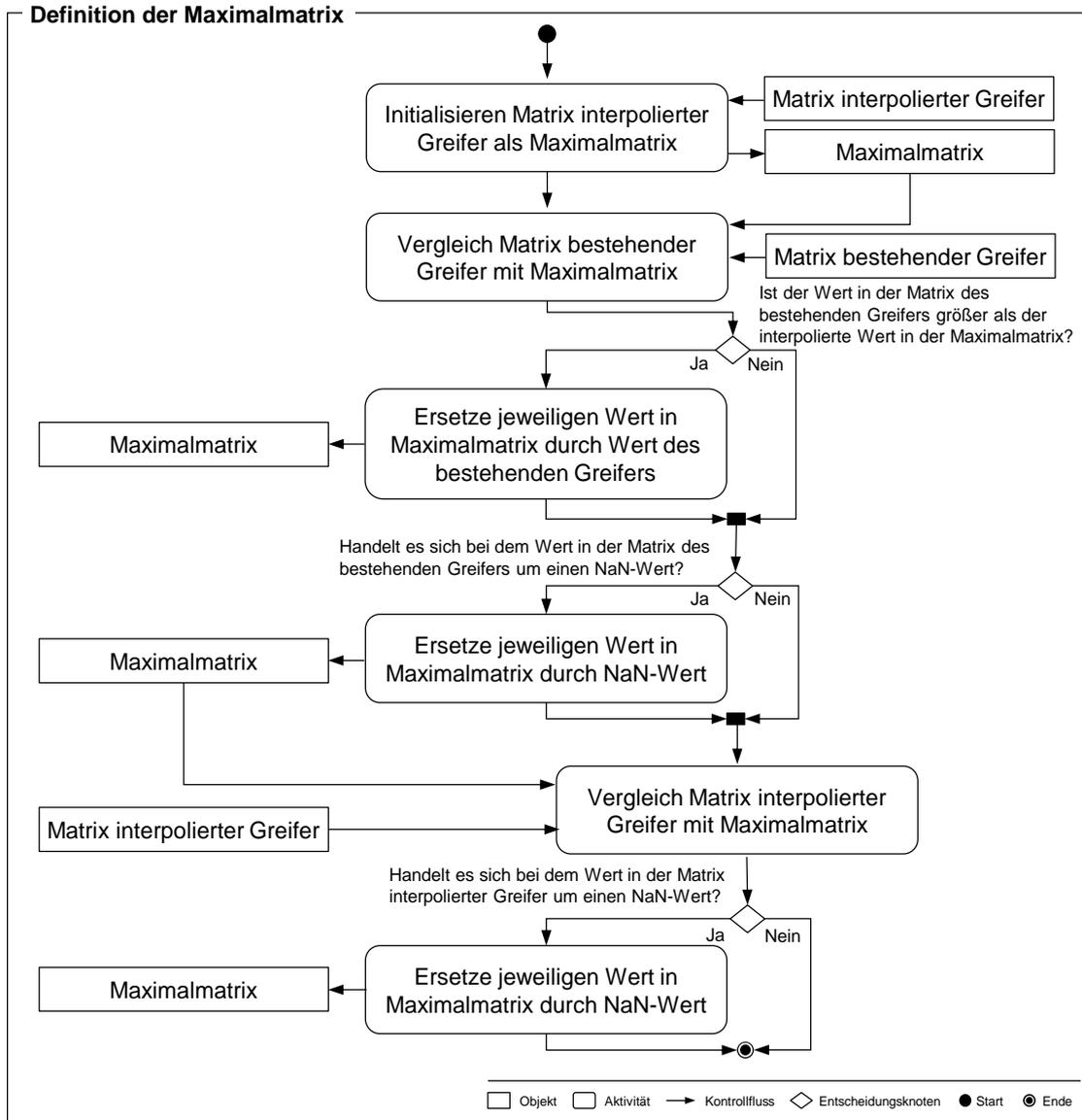


Abbildung 6-26: Ablauf für die Definition der Maximalmatrix

Beginnend wird geprüft, inwieweit sich die Werte des bestehenden Greifers von den Werten der interpolierten Matrix unterscheiden. Dafür werden alle definierten, reellen Werte der interpolierten Matrix mit den korrespondierenden Werten in der Matrix des bestehenden Greifers verglichen und das Maximum der beiden Werte in die Maximalmatrix übernommen. Mit diesem Schritt wird beispielsweise bezüglich der Greifkraft sichergestellt, dass die entsprechende Konfiguration tatsächlich in der Lage ist, alle betrachteten Handhabungsobjekte sicher zu greifen. Des Weiteren werden dadurch alle nicht definierten Konfigurationen (Kombination ist nicht umsetzbar) mittels eines NaN-Eintrags in der entsprechenden Zelle gekennzeichnet und für das weitere Vorgehen eliminiert. Dies erfolgt durch Kürzung aller durchgehend nicht definierter Zeilen und Spalten der finalen Ma-

ximalmatrix. Enthält eine Maximalmatrix ausschließlich NaN Werte, so wird diese verworfen.

### 6.5.5 Auswahl geeigneter Greiferkombinationen

Um mittels eines linearen Optimierungsverfahrens die minimal nötige Anzahl an Greifern für ein Handhabungsobjektspektrum zu ermitteln, werden die Ergebnisse der Interpolation bzw. der Abbildung der Greifer und somit der Greifbarkeitsuntersuchungen in eine boolesche Kombinationsmatrix überführt. Dafür wird für jeden Greifer ein Kombinationsvektor erstellt, welcher binär die Greifbarkeit für ein Spektrum von Handhabungsobjekten beschreibt. Die Anzahl der Elemente des Vektors gibt dabei die Anzahl der betrachteten Handhabungsobjekte an. Alle zulässigen Vektoren und somit zulässigen Greiferkombinationen werden anschließend zur finalen Kombinationsmatrix zusammengefasst. Die dadurch entstandene boolesche Matrix kann anschließend hinsichtlich der minimal nötigen Anzahl an (kombinierten) Greifern zur Durchführung der Handhabungsaufgabe analysiert werden. Das zugehörige Optimierungsproblem lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$\min\{\tilde{b}^T x \mid \sum_{j=1}^{\tilde{n}} t_{ij} \cdot x_j \geq 1\} \quad \text{mit } x_j \in \{0,1\}, i = 1 \dots \tilde{m}, j = 1 \dots \tilde{n}. \quad (6.75)$$

Dabei beschreibt  $\tilde{b}$  einen Vektor, wobei jeder Eintrag 1 entspricht. Die greiferübergreifende Kombinationsmatrix  $T \in \mathbb{R}^{\tilde{m} \times \tilde{n}}$  gibt an, welche Greifer für welche Greifobjekte geeignet sind (0 = nicht geeignet, 1 = geeignet). Die Spalten der Matrix  $T$  entsprechen dabei den unterschiedlichen Greifern, die Zeilen der Matrix den Handhabungsobjekten. Dementsprechend beschreibt  $t_{ij}$  den Eintrag der  $i$ -ten Zeile und der  $j$ -ten Spalte der Matrix  $T$ . Ferner gilt  $\tilde{b} \in \mathbb{R}^{\tilde{n}}$  sowie für den gesuchten Vektor  $x \in \mathbb{R}^{\tilde{n}}$ . Die Optimierung stellt durch ihre Nebenbedingung sicher, dass alle Handhabungsobjekte gegriffen werden können, wobei durch die Minimierung die Anzahl der unterschiedlichen Greifer auf die geringstmögliche reduziert wird. Da lineare Optimierungsverfahren meist nur ein Optimum ausgeben, muss die Kombinationsmatrix im Anschluss erneut hinsichtlich aller Kombinationen mit gleicher Anzahl von Greifern gefiltert werden. Daraus ergibt sich der ganze theoretisch mögliche Lösungsraum. Anschließend können mittels erneuter Interpolation die geometrischen Parameter der kombinierten Greifer ausgegeben werden.

### 6.5.6 Definition von kombinierten Greifern

Basierend auf der im Schritt zuvor gefundenen Anzahl an minimal zur Bewältigung der Handhabungsaufgabe notwendigen Greifern, können die finalen kombinierten Greifer ausgelegt werden (vgl. *Abbildung 6-27*).

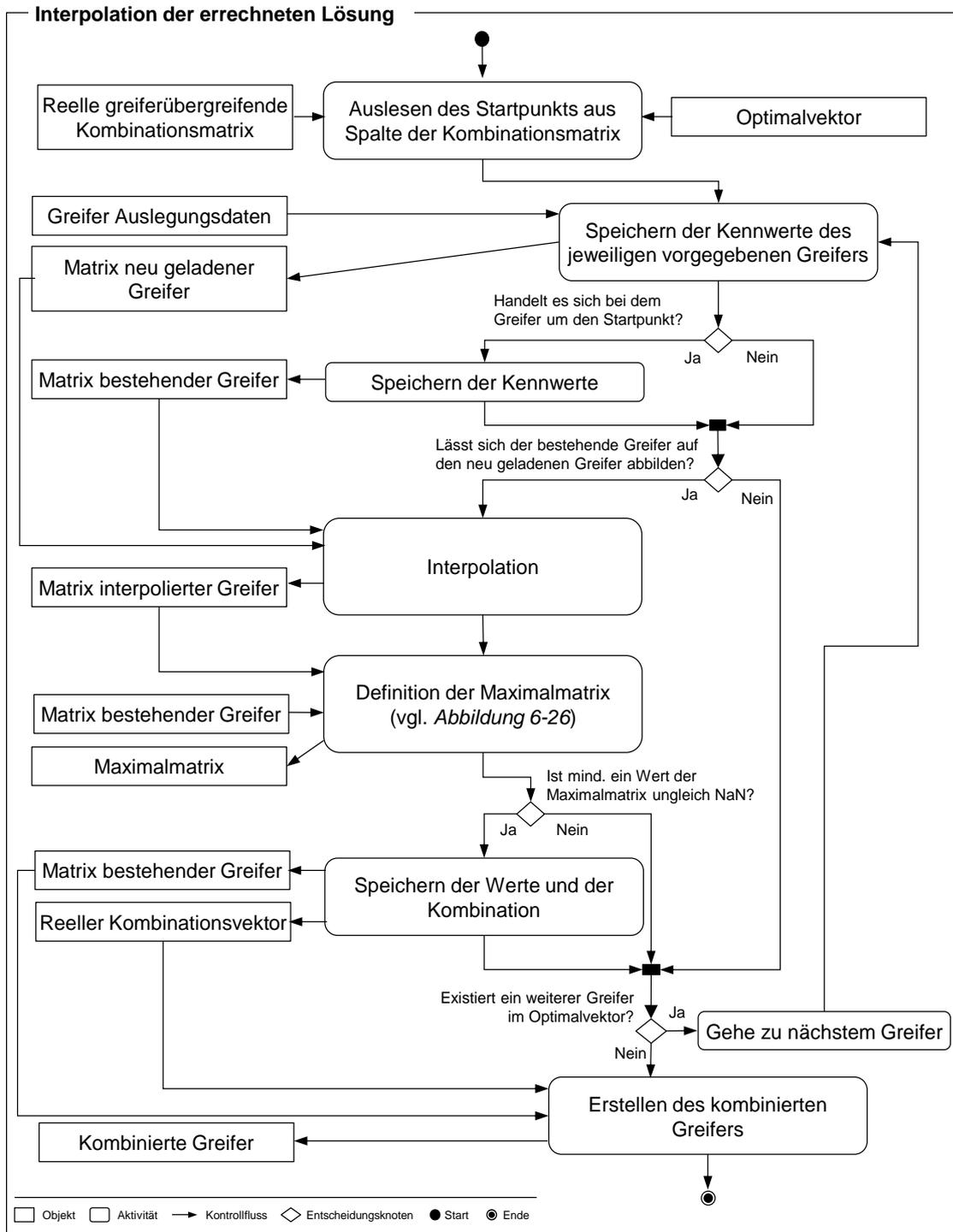


Abbildung 6-27: Ablauf zur Definition des finalen kombinierten Greifer

Dafür wird basierend auf der errechneten Lösung nochmals eine Interpolation über die für den kombinierten Greifer gewählten Konfigurationen durchgeführt (siehe *Abschnitt 6.8.4*). Aus der so entstehenden reellen greiferübergreifenden Kombinationsmatrix lassen sich anschließend die kombinierten Greifer generieren (vgl. *Abbildung 6-27*). Das Vorgehen ist dabei ähnlich zu dem in *Abschnitt 6.8.4* beschriebenen.

Für mechanische Greifer muss des Weiteren noch der nötige Hub, die Öffnungsweite bzw. der Öffnungswinkel sowie die Länge der Greiferbackenverlängerung und die Dicke bzw. Zentrumsdicke der Backe bestimmt werden. Bezüglich des Abmaßes der Greiferbackenverlängerung wird die größte Länge aller in den kombinierten Greifer eingeflossenen Wirkelemente gewählt, um alle Greifpositionen erreichen zu können. Für die Bestimmung der Backendicke wird ebenfalls das Maximum der Dicke aller eingeflossenen Wirkelemente gewählt ( $D_{Bmax}$ ). Bei prismatischen Backen zusätzlich noch das Maximum der Zentrumsdicke aller eingeflossenen Wirkelemente ( $D_{Zmax}$ ). Die Anpassung der Backenschnittstellen zu einem passenden Grundkörper erfolgt im Rahmen der Konstruktion. Für die Berechnung der Öffnungsweiten, Öffnungswinkel sowie des Hubes gelten die im Folgenden beschriebenen Zusammenhänge.

Plane Backen bei Parallelgreifern:

Ausgehend vom kleinsten Kontaktabstand aller betrachteten Handhabungsobjekte ( $KA_{min}$ ) wird die minimale Öffnungsweite ( $\ddot{O}_w^{min}$ ) bestimmt:

$$\ddot{O}_w^{min} = KA_{min} + 2 \cdot (D_{Bmax} + D_V) \quad (6.76)$$

Die maximale Öffnungsweite ( $\ddot{O}_w^{max}$ ) ergibt sich aus Formel (6.77). Sie entspricht dem maximalen Abstand der Kontaktflächen ( $KA_{max}$ ) der handzuhabenden Objekte unter Beachtung der Greifbackendimensionen ( $D_B, D_V$ ) sowie des Sicherheitsfaktors für den Hub ( $S_H$ ).

$$\ddot{O}_w^{max} = KA_{max} + 2 \cdot (D_{Bmax} + D_V + S_H) \quad (6.77)$$

Der notwendige Hub ( $H_p$ ) lässt sich mittels *Formel (6.6)* errechnen.

Prismatische Backen bei Parallelgreifern:

$$E_Z = \frac{D_{Zmax}}{2} - D_B \quad (6.78)$$

Die minimale Öffnungsweite ergibt sich aus

$$\ddot{O}_{wpv}^{min} = 2 \cdot (D_B + D_V + D_{Zmax} + E_Z) \quad (6.79)$$

und die maximale Öffnungsweite aus

$$\ddot{O}_{wpv}^{max} = 2 \cdot (D_B + D_V + D_{Zmax} + E_Z + D_{Nmax} + S_H). \quad (6.80)$$

Der notwendige Hub lässt sich mittels *Formel (6.15)* errechnen.

#### Plane Backen und prismatische Backen Winkelgreifer:

Da Winkelgreifer immer für genau eine Öffnungsweite definiert sind, bei der die Backen parallel zueinander stehen, können die Berechnungen von Öffnungsweite und -winkel analog zu *Abschnitt 6.2.3* mit einem beliebigen Wirkelement aus der Lösungsmenge erfolgen. Für die Berechnung des Öffnungswinkels zur Umfahrung von Störkonturen muss der Hüllkörper mit den maximalen Abmessungen des betrachteten Handhabungsobjekt-Spektrums gewählt werden.

Für eine finale Bewertung und Fertigung der Greifer müssen die Daten noch in die in *Abschnitt 6.7* beschriebene Form gebracht werden. Der einzige Unterschied bei der Beschreibung von kombinierten Greifern im Vergleich zu einfachen Greifern für ein Handhabungsobjekt ist, dass für jedes Handhabungsobjekt die jeweiligen Randbedingungen in die Tabelle des Greifers aufgenommen werden (vgl. *Anhang A.7*). Ein Beispiel dafür stellt die ID der anzufahrenden Greifposition dar, die dem kombinierten Greifer für jedes Handhabungsobjekte zugeordnet werden.

Ausgehend von diesem Format können wie in Kapitel 7 beschrieben Bewertungen der Greiferkombinationen durchgeführt und die bestgeeignete Lösung anschließend gefertigt werden. Ein weiteres Kriterium, welches spezifisch für die Bewertung von Lösungen zur Flexibilisierung von Greifersystemen verwendet werden kann stellt die Verteilung der Greifer auf die Handhabungsobjekte dar. Positiv bewertet werden dabei Lösungen, bei denen die kombinierten Greifer gleichmäßig über das Objektspektrum verteilt sind.

## 7 Bewertungs- und Realisierungsphase

### 7.1 Bewertungsphase

Mit der Vergrößerung des Lösungsraumes bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen steigen automatisch die Anforderungen an geeignete Bewertungsverfahren, da eine rein manuelle Bewältigung der Datenmenge nicht mehr möglich ist. Zur Bewertung von Greifersystemen existieren zahlreiche Herangehensweisen und Kriterien. Für die industrielle Nutzung von Greifersystemen ist anzunehmen, dass die finale Entscheidung basierend auf den von CARDAUN (1981) genannten Kriterien erfolgt:

- Investitionskosten
- Betriebskosten
- Flexibilität
- Zuverlässigkeit

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Masse des Greifersystems. Während die ersten drei genannten Kriterien und die Masse des Greifersystems verhältnismäßig aufwandsarm zu bestimmen sind, stellt die Bewertung der Zuverlässigkeit aufgrund der großen Anzahl an zu betrachtenden Faktoren eine Herausforderung dar. Insbesondere mit der Perspektive vollautomatisiert Greiferlösungen auszuwählen, ist es notwendig Metriken zu definieren, mit welchen eine entsprechende Bewertung durchgeführt werden kann. Diese basieren auf quantifizierbaren, mathematischen Zusammenhängen. Mittels der definierten Metriken können Gütemaße bestimmt und anhand dieser die finale Auswahl durchgeführt werden. Diesbezüglich kann auf umfangreiche Kriterien aus der Literatur zurückgegriffen werden, wobei diese teilweise nur qualitativ beschrieben wurden.

Aus dem Stand der Erkenntnisse lassen sich drei Arten von Metriken identifizieren:

1. Greifpositionsspezifische Metriken (bspw. Abstand von Störkonturen)
2. Auslegungsspezifische Metriken (bspw. Greifkraft pro Fläche oder Belastung der Wirkelemente)
3. Greiferspezifische Metriken (Gesamtgewicht des Greifers, Baugröße, Kosten für Grundkörper etc.)

Zwei Fälle der Gegenüberstellung von Greifersystemen setzen der reinen Verwendung von Metriken gewisse Grenzen. So ist zum einen der direkte Vergleich verschiedener Greiferarten, beispielsweise mechanische Greifer gegenüber Vakuumgreifern, aufgrund der unterschiedlichen Wirkprinzipien nur begrenzt möglich. Hier müssen zusätzliche Regeln definiert werden. Zum anderen stellt die Bewertung bei mehreren zu greifenden Handhabungsobjekten einen anspruchsvollen Fall dar. Hier müssen zu Gunsten einer höheren Flexibilität unter Umständen bei den Gütemaßen Abstriche im Vergleich zu handhabungsobjektspezifischen Greifern hingenommen werden (PHAM & YEO 1988A).

Für den Vergleich verschiedener Greifer und Greifkombinationen wurden im Rahmen dieser Arbeit sechs Metriken definiert, welche sich insbesondere der ersten und zweiten Art von Metriken der Aufstellung oben zuordnen lassen. Dabei muss betont werden, dass die berechneten Werte nicht den Anspruch erheben exakt zu sein. Vielmehr dienen sie dazu, verschiedene Alternativen auf Basis von Überschlagsrechnungen relativ zueinander vergleichen zu können.

### 1. Bewertung der Kontaktflächen:

Die Greifpositionsbestimmung und die Auslegung tolerieren eine gewisse Krümmung von Flächen. Jedoch verschlechtert die Krümmung einer Kontaktfläche die Sicherheit eines Griffes.

Unabhängig von der Art des verwendeten Greifers lässt sich Metrik 1 mit dem Gütemaß  $\varphi$ , unter Verwendung der Normalenvektoren  $n_i$  und  $n_j$  der Flächensegmente einer Kontaktoberfläche, folgendermaßen bestimmen:

$$\varphi_{ij} = \cos^{-1} \left( \frac{n_i \cdot n_j}{|n_i| \cdot |n_j|} \right) \quad (7.1)$$

$$\varphi = \max[\varphi_{ij}]; i = 1 \dots \tilde{m}, j = 1 \dots \tilde{n}, \quad (7.2)$$

wobei  $\tilde{m}$  und  $\tilde{n}$  die Anzahl der betrachteten Normalenvektoren darstellen. Der Winkel  $\varphi = 180^\circ$  entspricht einer planen Kontaktfläche und stellt somit das Optimum dar.

### 2. Bewertung der Belastung auf das Handhabungsobjekt

Ein Maß für die Beanspruchung des Handhabungsobjektes stellt der Druck auf die Oberfläche dar. Die Berechnung erfolgt wie in PHAM & YEO (1988A) beschrieben anhand der Formel (7.3) für mechanische Greifer und der Formel (7.4)

für Vakuumbreifer.  $A_{S,K}$  entspricht dabei der Fläche des Kontaktes zwischen Wirkelement und Handhabungsobjekt. Für die Berechnung der Metrik bei prismatischen Greiferbacken wird die Breite des Linienkontaktes mit 1 mm angenommen.

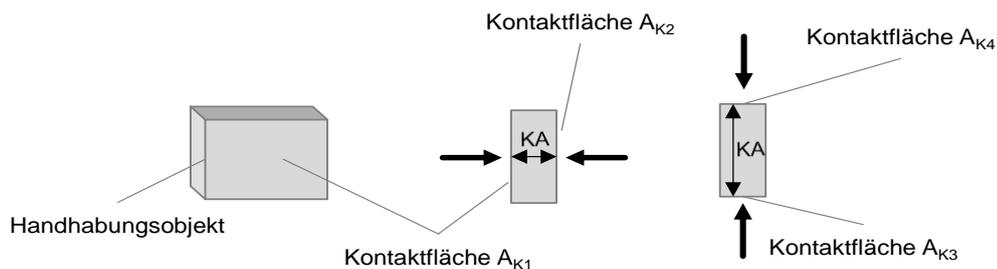
$$p_{BM} = \frac{F_G}{A_K} \quad (7.3)$$

$$p_{BV} = \frac{F_V}{A_S} \quad (7.4)$$

Um Handhabungsobjekt-Beschädigungen zu vermeiden, sollten Greifkonfigurationen mit möglichst kleinem Druck gewählt werden.

### 3. Bewertung der Stabilität des Griffs

Metrik 3 zur Bewertung der Stabilität des Griffes wird von PHAM & YEO (1988A) übernommen. Hierbei werden bei mechanischen Greifern die Neigung eines Handhabungsobjektes zum Verklebmen im Greifer sowie die benötigte Öffnungsweite bewertet. Für die Berechnung wird neben der Kontaktfläche ( $A_K$ ) auch der Kontaktflächenabstand (KA) herangezogen. So ist die in *Abbildung 7-1* dargestellte Konfiguration bestehend aus Kontaktfläche 1 und 2 der aus Kontaktfläche 3 und 4 bestehenden Konfiguration vorzuziehen.



*Abbildung 7-1: Beispiel zur Bewertung von Kontaktflächenkonfigurationen*

Bei Vakuumbreifern wird die Gefahr eines Kippens und dem damit beim Prozess induzierten Pendeln des Handhabungsobjektes bewertet. Dies geschieht unter Verwendung der Fläche des Saugers ( $A_S$ ) und dem Abstand der Kontaktfläche vom Massenschwerpunkt des Handhabungsobjektes ( $D_G$ ). Aufgrund der selbstzentrierenden Wirkung von prismatischen Backen kann für diese auf eine Berechnung von Metrik 3 verzichtet werden.

### Mechanische Greifer (mit planen Backen)

$$\alpha_{MG} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{A_K}}{KA} \right) \quad (7.5)$$

Je näher der Winkel  $\alpha_{MG}$  an  $90^\circ$  liegt, desto besser ist die Stabilität des Griffes zu bewerten.

### Vakuumgreifer

$$\alpha_V = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{A_S}}{2D_G} \right) \quad (7.6)$$

Je näher der berechnete Winkel  $\alpha_V$  an  $180^\circ$  liegt, desto besser ist die Stabilität des Griffes zu bewerten.

## **4. Bewertung der Belastung der Wirkelemente**

Um die langfristige Zuverlässigkeit eines Greifersystems beurteilen zu können, kann die Belastung auf die Wirkelemente betrachtet werden. Dies erfolgt mittels eines Vergleichs der anliegenden Belastung mit der materialbedingt zulässigen Belastung dieser Wirkelemente. Für mechanische Greifer wird dabei auf die Formeln nach WOLNIAKOWSKI ET AL. (2015) zurückgegriffen. Für Vakuumgreifer ist eine derartige allgemeingültige Berechnung aufgrund der großen Unterschiede bezüglich des Aufbaus von Vakuumsaugern nicht möglich.

Das Gütemaß  $\varepsilon$  für die Belastung von Greiferbacken mechanischer Greifer stellt den Quotienten aus maximaler ( $\sigma_{max}$ ) und zulässiger ( $\sigma_{zul}$ ) Biegespannung dar. Er muss immer kleiner 1 sein, je kleiner der Wert desto besser ist die jeweilige Greifkonfiguration zu bewerten.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{zul}} \quad (7.7)$$

Während die zulässige Biegespannung  $\sigma_{zul}$  materialabhängig ist kann die maximale Biegespannung  $\sigma_{max}$  an der Schnittstelle der Backe zum Greifergrundkörper folgendermaßen berechnet werden:

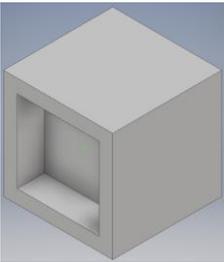
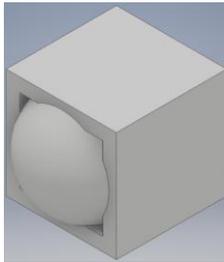
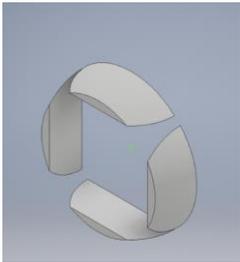
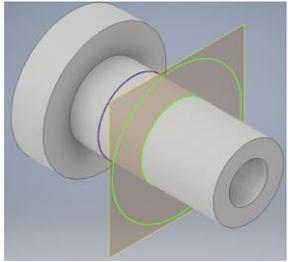
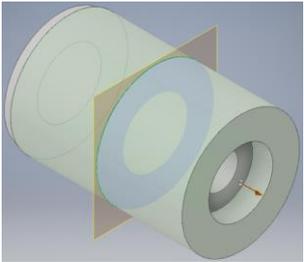
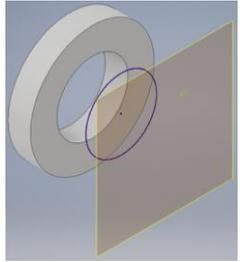
$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot F_G \cdot L_E}{B_B \cdot D_V^2} \quad (7.8)$$

$F_G$  steht für die berechnete Greifkraft,  $L_E$  für die Eingriffslänge der Backe,  $B_B$  für die Breite der Backe und  $D_V$  für die Dicke der Backenverlängerung (vgl. *Abchnitt 6.2*).

### 5. Bewertung der Gefahr des Versagens eines Griffs

Ein Grund für das Versagen eines Griffes ist die Kollision mit Störkonturen. Aufgrund der Ungenauigkeiten, welche bei einem Handhabungsprozess auftreten können (vgl. Kapitel 2), sollten Greifpositionen bzw. Wirkelementdimensionen mit möglichst großem Abstand zu Störkonturen bevorzugt werden. Ein weiterer Versagensfall stellt der Griff in der Nähe von Kanten des Handhabungsobjektes dar. Hier besteht insbesondere bei Vakuumgreifern die Gefahr, nicht oder nicht sicher greifen zu können. Um die Gefahr dieser Versagensfälle bewerten zu können, greift Metrik 5 auf die in Tabelle 7-1 visualisierten Ansätze von BALAN & BONE (2003) zurück.

*Tabelle 7-1: Nutzung von virtuellen Halbkugeln und Hohlzylindern zur Analyse des Abstandes zu Störkonturen und Kanten nach BALAN & BONE (2003)*

	Greifpunkt mit umgebender Störkontur	Simulierte Halbkugel/ Hohlzylinder um den Greifpunkt	Schnittvolumen zwischen Halbkugel/ Hohlzylinder und Störkontur
Plane Greiffläche			
Zylindrische Greiffläche			

### Vakuumgreifer und mechanische Greifer mit planen Backen

Die Bewertung des Abstands zu Störkonturen wird nach BALAN & BONE (2003) unter der Verwendung von Halbkugeln durchgeführt, welche um die Kontaktfläche positioniert werden.

Daraus lässt sich das Gütemaß  $Q_{ESV}$  berechnen.

$$Q_{ESV} = \frac{V_{EK}}{\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (E_{\max} + R)^3} \quad (7.9)$$

$E_{\max}$  steht für die absolute Ungenauigkeit des Handhabungssystems und wird vom Nutzer im Rahmen der Analysephase abgefragt.  $V_{EK}$  entspricht dem Volumen, welches beim Schneiden der Kugel von Störkonturen entsteht (vgl. Tabelle 7-1).  $R$  steht für den Radius der verwendeten Kugel. Dieser berechnet sich bei planen Backen und rechteckigen Saugern aus der Hälfte der längeren Seite der Kontaktfläche. Bei runden Saugern wird der Radius des Saugers übernommen. Bei ovalen Saugern wird zur halben Saugerlänge der Radius des Saugers addiert. Konfigurationen mit möglichst kleinem  $Q_{ESV}$  versprechen eine höhere Griffsicherheit aufgrund des Abstands zu möglichen Störkonturen (Optimum  $Q_{ESV}=0$ ).

Für die Bewertung des Abstands der Greifposition zu den Kanten wird ein Kreis mit Radius  $R$  um den Greifpunkt gezogen. Die Berechnung erfolgt analog zur Kugel oben unter Verwendung des Gütemaßes  $Q_{EKV}$ .

$$Q_{EKV} = \frac{A_{EK}}{\pi \cdot (R + E_{\max})^2} \quad (7.10)$$

$A_{EK}$  entspricht dabei der Kreisfläche, welche über Kanten des Handhabungsobjekts herausragt. Es sind Greifkonfigurationen mit möglichst geringem  $Q_{EKV}$  zu bevorzugen (Optimum  $Q_{EKV}=1$ )

### Mechanische Greifer mit prismatischen Backen

Um bei prismatischen Greiferbacken eine Bewertung hinsichtlich der Nähe zu Störkonturen treffen zu können, wird auf virtuelle Hohlzylinder zurückgegriffen, welche die Greifposition entlang des Zylinder umhüllen (vgl. Tabelle 7-1).

$$Q_{ESP} = \frac{V_{Ezs}}{\pi \cdot ((r_i + E_{\max})^2 - r_i^2) \cdot H} \quad (7.11)$$

$$H = L_B + 2 \cdot E_{\max} \quad (7.12)$$

Das Schnittvolumen des Hohlzylinders mit möglichen Störkonturen ( $V_{EzS}$ ) wird mit dem Innenradius des Hohlzylinders ( $r_i$ ), der absoluten Ungenauigkeit des Handhabungssystems ( $E_{\max}$ ) und der Höhe  $H$  des Hohlzylinders verrechnet. Der Faktor  $r_i$  entspricht dabei dem Radius des Zylinders an der Greifposition,  $H$  kann wie in *Formel (7.12)* beschrieben mit der Länge der Backe ( $L_B$ ) berechnet werden. Es ist anzustreben Greifkonfigurationen mit einem möglichst kleinen Wert für  $Q_{ESP}$  umzusetzen (Optimum=0)

Die Bewertung des Abstands von Greifpositionen prismatischer Greiferbacken von Kanten des Handhabungsobjektes kann ebenfalls unter Verwendung von Zylindern und des Gütemaßes  $Q_{EKP}$  erfolgen.

$$Q_{EKP} = \frac{V_{EZK}}{\pi \cdot r_i^2 \cdot H} \quad (7.13)$$

$V_{EZK}$  entspricht dabei dem Volumen, welches außerhalb der Kontur des Handhabungsobjektes durch die Schnittmenge des Zylinders mit dem Handhabungsobjekt entsteht,  $r_i$  dem Radius des Hohlzylinders. Auch hier gilt es  $Q_{EKP}$  zu minimieren, das erreichbare Optimum ist  $Q_{EKP}=1$ .

## 6. Bewertung der Anfahrbarkeit der Kontaktfläche

Die Metrik der Anfahrbarkeit der Kontaktfläche bewertet eine Kontaktfläche danach, wie „tief“ der Greifer in den Körper des Handhabungsobjektes eintauchen muss, um einen Kontakt herzustellen. Dies wird in Abhängigkeit der Größe der Kontaktfläche betrachtet. Für alle in dieser Arbeit betrachteten Greiferarten kann Metrik 6 für das Gütemaß  $\gamma$  wie folgt berechnet werden:

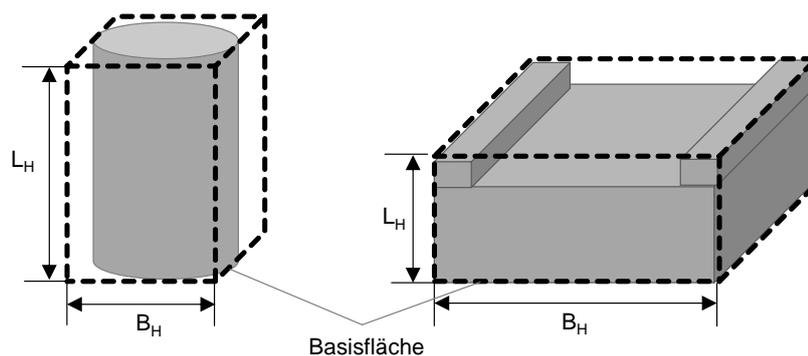
$$\gamma = \frac{\sqrt{A_{S/K}}}{T_B} \quad (7.14)$$

$A_S$  bezeichnet die Fläche des Saugers,  $A_K$  die Kontaktfläche eines mechanischen Greifers.  $T_B$  stellt die Tiefe der Fläche im Handhabungsobjekt dar. Sie kann mittels des Abstands zwischen der Kontaktfläche in Richtung der Greifpunktnormalen und der Hüllkörperkontur ( $D_N$ ) berechnet werden.

### Entscheidung für die Art des verwendeten Greifers

Ein direkter Vergleich zwischen den Gütemaßen ist nur zwischen Greifern der gleichen Greiferart (mechanische- bzw. Vakuumgreifer) zulässig. Für die Entscheidung, welche Greiferart für ein bestimmtes Handhabungsobjekt besser geeignet ist, kann eine Abschätzung in Anlehnung an BOOTHROYD (2005) herangezogen werden. Ausgehend vom Hüllkörper des Handhabungsobjektes und seiner Orientierung im Raum kann eine Zuordnung zur stab- oder scheibenförmigen Grundgeometrie erfolgen (vgl. *Abbildung 7-2*). Dabei gilt folgende experimentell ermittelte Zuordnung (als  $B_H$  wird immer die Seite mit der größten Länge in der Basisflächen-Ebene gewählt):

- $\frac{B_H}{L_H} < 1,5$ : Stabförmiger Körper
- $\frac{B_H}{L_H} \geq 1,5$ : Scheibenförmiger Körper



*Abbildung 7-2: Benötigte Parameter für die Einordnung von Hüllkörpern*

Ausgehend von der Empfehlung nach FELDMANN ET AL. (2014), Vakuumgreifer insbesondere für flächige Handhabungsobjekte heranzuziehen, kann anschließend eine Beurteilung erfolgen. Es eignet sich folgende Vorgehensweise:

1. Ergibt die Auslegung, dass sowohl mechanische als auch Vakuumgreifer verwendet werden können, so wird zuerst die Art des Körpers abgeprüft. Im Anschluss werden für die gewählte Greiferart die Gütemaße verglichen.
2. Wird von der Auslegung nur eine Greiferart ausgegeben, so können die Gütemaße direkt miteinander verglichen werden.

## 7.2 Realisierungsphase

Für die Überführung des gewählten Greifers in die physische Welt sind nach der finalen Auswahl noch folgende Schritte durchzuführen:

1. Auswahl und Beschaffung der industriell bezogenen Greiferelemente basierend auf Auslegungsdaten
2. Auswahl bzw. Auslegung zusätzlich benötigter Komponenten (wie beispielsweise Vakuumerzeuger)
3. Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens für die nicht industriell zu beschaffenden Elemente des Greifers
4. Fertigung der nicht industriell bezogenen Teile
5. Montage von Greifergrundkörper und Wirkelementen sowie eventuell zusätzlichen benötigter Komponenten

Zur Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten additiven Fertigungsverfahrens kann die Richtlinie VDI 3405 hinzugezogen werden.



## 8 Erprobung der Vorgehensweisen

### 8.1 Betrachtungsraum und Vorbemerkungen

Im Rahmen der Erprobung soll geprüft werden, ob und unter welchen Umständen die theoretisch getroffenen Annahmen gültig sind. Dafür wurden die wichtigsten Bausteine der Vorgehensweise informationstechnisch implementiert.

Der Fokus der Erprobung wird auf vier Teilbereiche der Auslegung und Auswahl gelegt:

1. Greifkraftberechnung
2. Greifpositionsbestimmung
3. Auslegung der Wirkelemente und Greiferauswahl
4. Flexibilisierungsalgorithmus

Dafür wurden Versuchsszenarien entwickelt, um ein möglichst genaues Bild über die Funktionsweise und Grenzen der einzelnen Teilbereiche zu erhalten. Um die Szenarien möglichst realitätsnah gestalten zu können, wurden zwei verschiedene Spektren an Handhabungsobjekten definiert.

#### 8.1.1 Softwaretechnische Umsetzung des Vorgehens

Die Software, welche für die Erprobung implementiert wurde, lässt sich in drei Subroutinen gliedern: Die Greifpositionsbestimmung inklusive integrierter GUI, die Auslegung mit integrierter Greifkraftberechnung sowie die automatisierte Konstruktion.

Als plattformunabhängige Lösung wurden Greifpunktbestimmung und GUI basierend auf einer Model-View-Presenter-Architektur in Java<sup>®</sup> bzw. JavaFX<sup>®</sup> realisiert. Die Auslegung sowie der Algorithmus zur Greiferflexibilisierung wurden in Matlab<sup>®</sup> realisiert und sind mittels einer CSV-Schnittstelle mit der Greifpositionsbestimmung verbunden. Während die Greifpositionsbestimmung als interaktiver Prozess mit dem Nutzer zur Definition von Basis- oder Sperrflächen definiert wurde, laufen alle anderen Bausteine der Methode als gerichteter Prozess ohne Eingriff des Nutzers ab. Bei der Nutzung der Software kann es zielführend sein, den Prozess der Greifpositionsbestimmung von dem der Auslegung und Flexibilisierung zu trennen. Da für die Greifpositionsbestimmung nur verhält-

nismäßig wenige Ressourcen benötigt werden und außerdem eine Interaktion mit dem Nutzer erfolgt, bietet sich die Nutzung eines Standard-Desktoprechners an. Die weiteren Prozesse, insbesondere die Auslegung sowie die Flexibilisierung, können berechnungs- und speicherintensiv werden, sodass die Nutzung von Workstation-PCs oder leistungsfähigen Servern ratsam ist.

Bei der Implementierung der Konstruktion muss zwischen mechanischen Greifern und Vakuumgreifern differenziert werden. Da sich die Wirkelemente von mechanischen Greifern verhältnismäßig einfach parametrieren lassen, wurde die Konstruktion mittels eines einfachen VBA-Skriptes in Catia® V5 automatisiert. Die Grundkörper von Vakuumgreifern besitzen dagegen, aufgrund des gewählten Konstruktionsansatzes, einen deutlich höheren Freiheitsgrad für mögliche Lösungen, wodurch eine einfache Parametrierung nicht mehr ausreichend ist. Aus diesem Grund wurde das Plug-In „Grasshopper®“ des 3-D Modellierers Rhinoceros® zur Realisierung gewählt. Mit diesem Programm zur visuellen Programmierung von dreidimensionalen Körpern ist es verhältnismäßig aufwandsarm möglich einen Algorithmus für die Modellierung von Grundkörpern umzusetzen. Ähnlich zu einer händischen 3-D-Konstruktion werden dabei Beziehungen zwischen geometrischen Elementen definiert. Diese sind jedoch nicht statisch, sondern es können Funktionen hinterlegt werden, welche die Beziehungen der Elemente zueinander beschreiben.

### **8.1.2 Verwendetes Handhabungsobjekt-Spektrum**

Da das Greifobjekt das zentrale Element eines Handhabungssystems darstellt (SCHMALZ ET AL. 2015), ist die Wahl des Handhabungsobjekt-Spektrums für die Erprobung einer Vorgehensweise, wie der hier beschriebenen, von großer Bedeutung. Es existiert nur wenig abstrahiertes Wissen über die Ausprägungen industriell verwendeter Handhabungsobjekte. Für die Erprobung von Greifern oder Greifaufgaben werden in der Literatur meist Gegenstände des täglichen Lebens verwendet (vgl. SHILANE ET AL. 2004, GOLDFEDER ET AL. 2009). Dies entspricht nicht der industriellen Zielstellung dieser Arbeit. Aufgrund dessen wurde ein Handhabungsobjekt-Spektrum basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche erstellt. Das Spektrum besteht aus Quadern und Zylindern, wobei sechs Eigenschaften, inklusive deren Ausprägungen, festgelegt wurden: Dimension, Werkstoff, Abmessung, Lage des Schwerpunkts, Massiv- oder Hohlteil und Störkontur. Diese wurden mittels Merkmalsleisten erfasst (vgl. DIN 32563) und entsprechende Ausprägungen der Eigenschaften anhand einer Versuchsplanung

variiert. Der generierte Screening-Plan mit sechs Faktoren und zwei Stufen ergab das in Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 beschriebene Spektrum. Die Differenzierung zwischen Massiv- und Hohlteil wurde unter Verwendung einer empirisch ermittelten Formel für die Wandstärke modelliert.

*Tabelle 8-1: Versuchsplan zylindrische Handhabungsobjekte*

Versuchsobjekt	Dimension	Hauptabmessung	Min. Wandstärke	Störkontur	Schwerpunkt	Material
1	Scheibenförmig	30 mm	$\sqrt{L} \times 0,5$	vorhanden	mittig	Kunststoff
2	Stabförmig	100 mm	Voll	vorhanden	mittig	Kunststoff
3	Stabförmig	100 mm	$\sqrt{L} \times 0,5$	vorhanden	außermittig	Metall
4	Scheibenförmig	30 mm	Voll	vorhanden	außermittig	Metall
5	Stabförmig	30 mm	$\sqrt{L} \times 0,5$	nicht vorhanden	außermittig	Kunststoff
6	Stabförmig	30 mm	Voll	nicht vorhanden	mittig	Metall
7	Schreibenförmig	100 mm	Voll	nicht vorhanden	außermittig	Kunststoff
8	Scheibenförmig	100mm	$\sqrt{L} \times 0,5$	nicht vorhanden	mittig	Metall

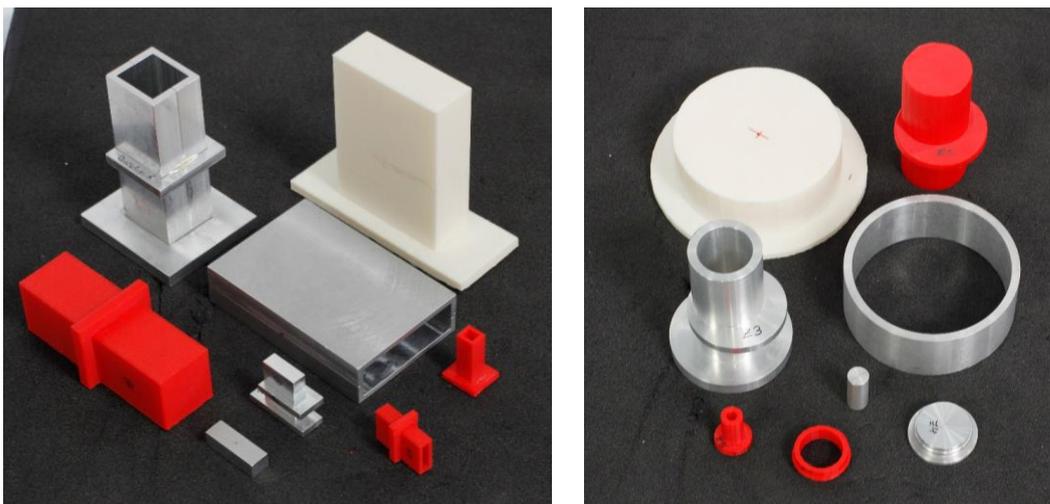
*Tabelle 8-2: Versuchsplan quaderförmige Handhabungsobjekte*

Versuchsobjekt	Dimension	Hauptabmessung	Min. Wandstärke	Störkontur	Schwerpunkt	Material
1	Scheibenförmig	30 mm	Voll	nicht vorhanden	mittig	Metall
2	Stabförmig	100 mm	Voll	vorhanden	mittig	Kunststoff
3	Stabförmig	100 mm	Voll	nicht vorhanden	außermittig	Kunststoff
4	Scheibenförmig	30 mm	$\sqrt{L} \times 1/3$	vorhanden	mittig	Kunststoff
5	Stabförmig	30 mm	$\sqrt{L} \times 1/3$	nicht vorhanden	mittig	Metall

Fortsetzung Tabelle 8-2

Versuchs-objekt	Dimension	Hauptab-messung	Min. Wand-stärke	Störkontur	Schwer-punkt	Material
6	Stabförmig	30 mm	$\sqrt{L} \times 1/3$	vorhanden	außermittig	Metall
7	Schreiben-förmig	100 mm	$\sqrt{L} \times 1/3$	nicht vor-handen	außermittig	Kunststoff
8	Scheiben-förmig	100mm	Voll	vorhanden	außermittig	Metall

Die anhand des beschriebenen Vorgehens generierten physischen Handhabungs-objekte sind in *Abbildung 8-1* sowie in detaillierter Form in Anhang A.8 abgebil-det.



*Abbildung 8-1: Handhabungsobjektspektrum mit quaderförmigen Objekten (links) und zylindrischen Objekten (rechts)*

### 8.1.3 Sonstige Rahmenbedingungen der Erprobung

Als Handhabungsgerät wurde der in *Abbildung 8-2* gezeigte, sechsachsige Vertikalknickarmroboter der Firma ABB (IRB 2600) mit einer Nennlast von 20 Kilogramm verwendet. Der vollständige Versuchsaufbau kann *Abbildung 8-2* und Anhang A.9 entnommen werden.

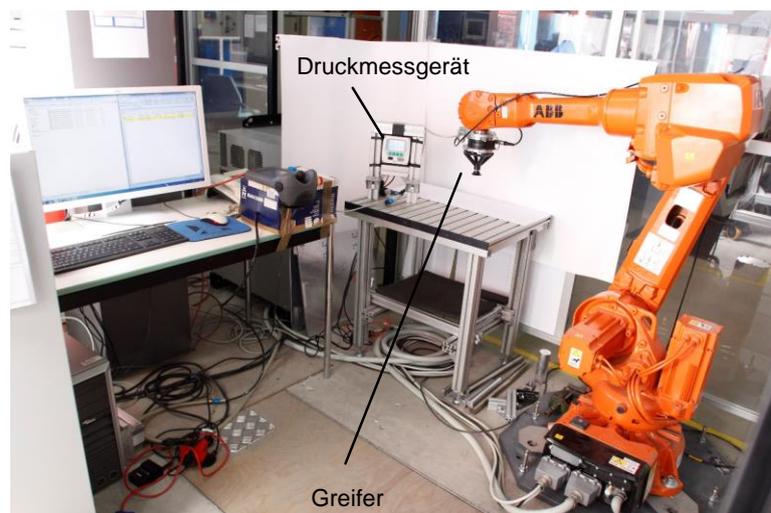


Abbildung 8-2: Versuchsumgebung zur Erprobung der Methode

Die Grundkörper der Vakuumbreifer sowie die Backen der mechanischen Greifer wurden additiv mittels Stereolithografie auf einer „Form 2“ Anlage der Firma Formlabs gefertigt. Als Material wurde das schwarze Standard-Kunstharz („Black resin“) des Anlagenherstellers verwendet.

## 8.2 Erprobung der Greifkraftberechnung

Zielsetzung der Versuche ist die Prüfung, unter welchen Umständen die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Greifkraft einen gültigen Griff ermöglichen. Dafür wurde der Greifkraftberechnungs-Baustein aus der Methode separiert und definierte Szenarien berechnet.

Um auch mehrdimensional wirkende Versagensfälle abbilden zu können, wurde als Versuchsanordnung der Minimalkraftversuch gewählt (vgl. *Abbildung 8-3*). Wie der Name schon impliziert eignet er sich dazu, möglichst genau die minimal nötige Greifkraft für einen gültigen Griff zu ermitteln. Hierbei wird der Greifer am Handhabungsobjekt unter Anlegen der spezifischen Greifkraft platziert und im Anschluss daran mit dem Handhabungsgerät die gewünschte Orientierung im Raum angefahren. Daraufhin wird die Greifkraft reduziert bis sich das Handhabungsobjekt bewegt. Die Dokumentation erfolgt dabei mittels einer Videoaufzeichnung (Canon EOS 60D), welche sowohl Greifer und Handhabungsobjekt als auch die Anzeige des jeweiligen Druck- bzw. Unterdrucksensors erfasst. Somit ist im Anschluss eine Auswertung des Versuches anhand der Einzelbilder des Videos möglich. Bezogen auf die Gesamtmethode stellt der Minimalkraftversuch

dar, wie viel Spielraum zwischen dem berechneten Ergebnis und dem tatsächlichen Versagen des Griffs vorhanden ist bzw. ob überhaupt ein Griff mit der gegebenen Greiferkonfiguration möglich ist.

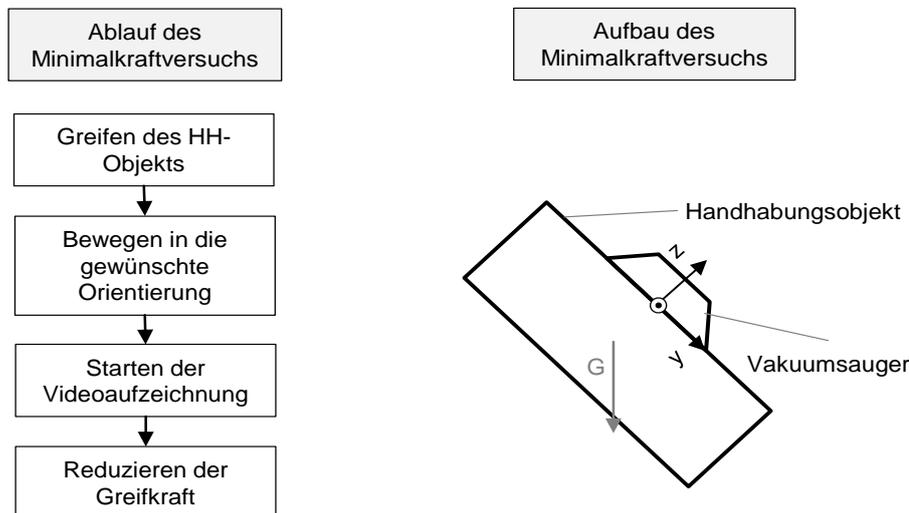


Abbildung 8-3: Ablauf und Aufbau des Minimalkraftversuches am Beispiel eines Vakuumgreifers

### 8.2.1 Vakuumgreifer

Angelehnt an die Berechnungsbeispiele von GÖTZ (1991) und MANTRIOTA (2007B) wurde ein Testfall für Vakuumgreifer definiert. Es handelt sich dabei um einen Minimalkraftversuch, bei dem schrittweise, jeweils  $10^\circ$ , eine Drehung der Orientierung des Greifers von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  um die x-Achse durchgeführt wird (vgl. *Abbildung 8-3*). Um alle bei Vakuumgreifern möglichen Versagensfälle abzutesten, wurde eine Greifposition außerhalb vom Ursprung der x-y-Ebene des Schwerpunktkoordinatensystems gewählt. *Abbildung 8-4* veranschaulicht die Greifposition und die dadurch induzierten Momente.

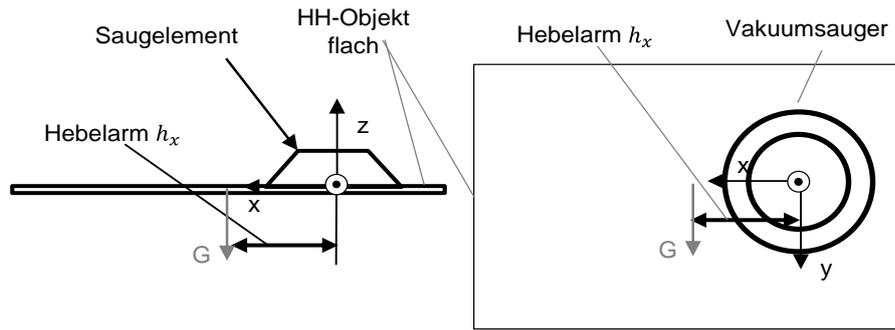
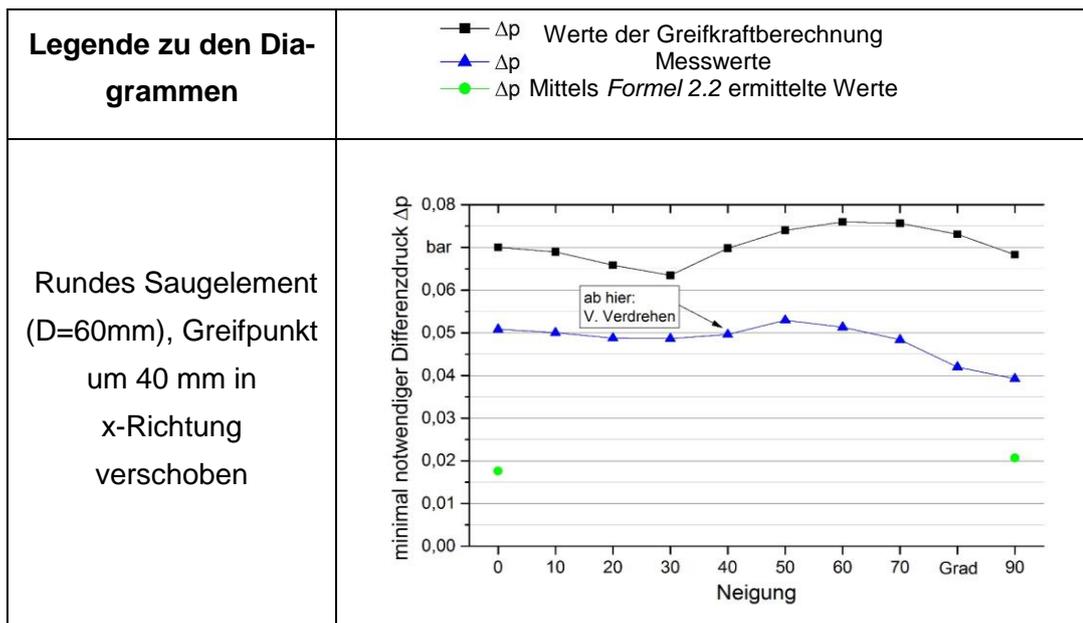
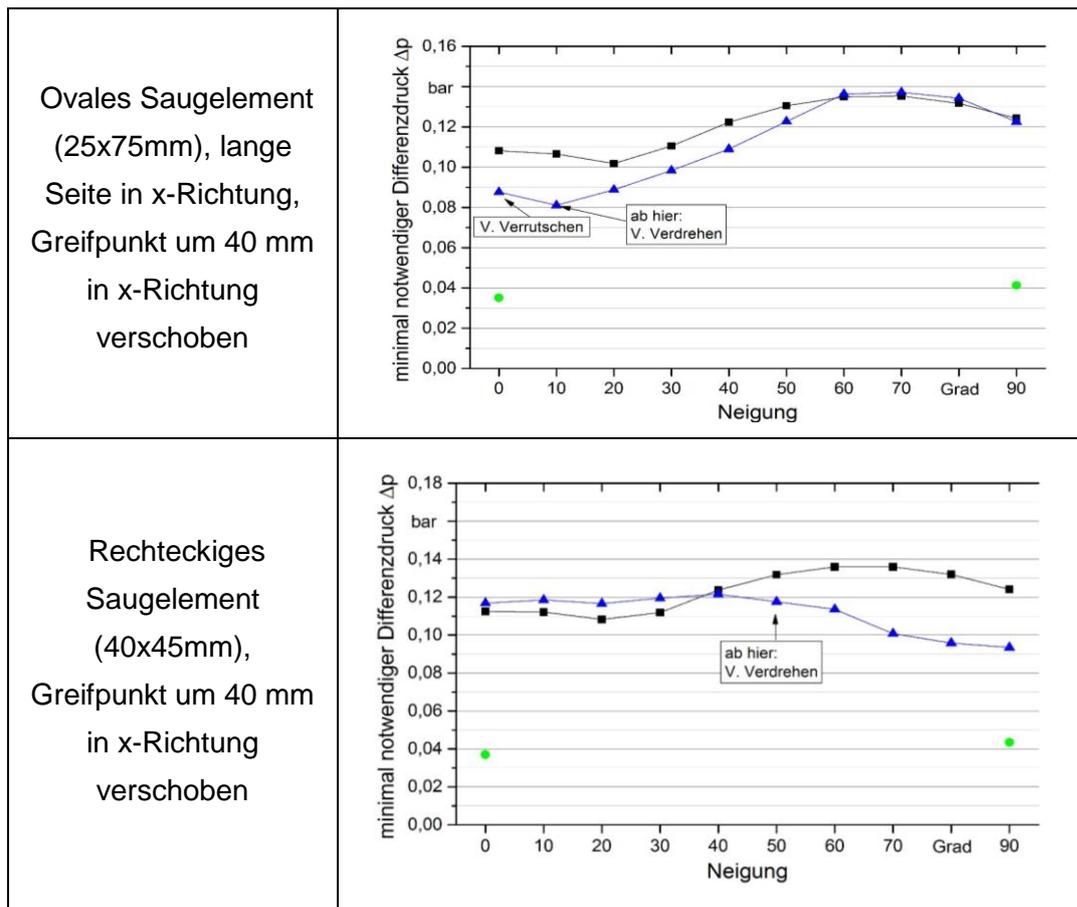


Abbildung 8-4: Schematische Darstellung des Tests für Vakuumgreifer. Links das induzierte Kippmoment bei 0° und rechts das induzierte Torsionsmoment bei 90°

Aus Tabelle 8-3 können die Ergebnisse der Versuche entnommen werden. Um eine Referenzierung mit dem Stand der Erkenntnisse zu ermöglichen, ist jeweils bei 0° und bei 90° der mit der Formel nach BRAUN (1989) (vgl. Formel (2.2)) berechnete Wert abgetragen. Falls nicht anders beschrieben, trat bei 0° immer der Versagensfall „Abfallen“ auf. Das verwendete Handhabungsobjekt war eine Aluminiumplatte mit den Abmaßen 111,7 x 180,4 x 8 mm mit einem Gewicht von 0,461 Kg. Der für die Berechnung verwendete Reibkoeffizient betrug  $\mu = 0,5$  und der verwendete Verformungsbeiwert  $k = 0,99$ . Der Wirkungsgrad des Saugers wurde mit 100% angenommen.

Tabelle 8-3: Ergebnisse der Versuche zur Greifkraftberechnung von Vakuumgreifern





Wie erkennbar ist, bildet das entwickelte Greifkraftmodell die auftretenden Kräfte ausreichend genau ab, sodass im Rahmen der Messfehler zu jeder Zeit ein sicherer Griff ermöglicht wird. Es gilt zu beachten, dass die gemessenen Werte mit Messungenauigkeiten behaftet sein können. Die berechneten Werte nach den Formeln des Stands der Erkenntnisse bestätigen die Annahme, dass die konventionell berechneten Greifkräfte bei Griffen außerhalb des Schwerpunktes die Realität nur sehr ungenau wiedergeben. Bei Handhabungsoperationen mit Beschleunigungen wird diese Abweichung zusätzlich verstärkt.

### 8.2.2 Mechanische Greifer

Analog zu den Versuchen mit Vakuumgreifern wurden die Berechnungen der Greifkraft bei mechanischen Greifern hinsichtlich aller theoretisch möglichen Versagensfälle untersucht (vgl. *Abschnitt 2.4*). Dies erfolgte mittels der in *Abbildung 8-5* beschriebenen Anordnungen der Backen auf dem Handhabungsobjekt.

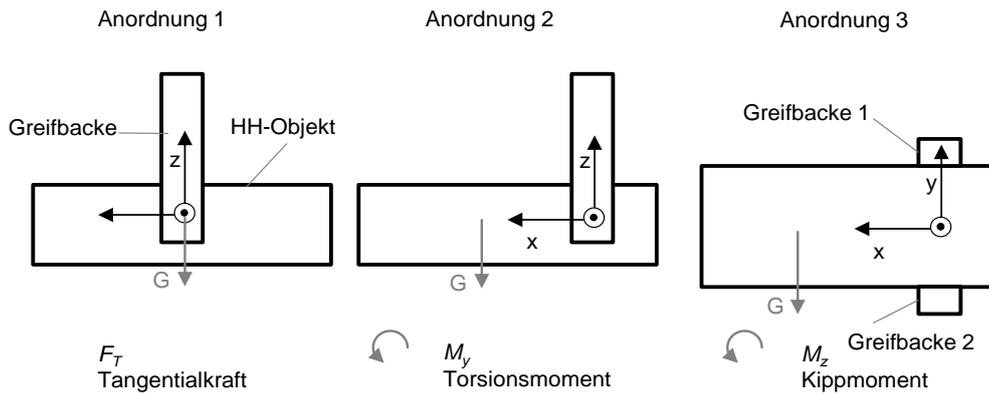


Abbildung 8-5: Schematische Darstellung der betrachteten Anordnungen zur Erprobung der Greifkraftberechnung für mechanische Greifer

Auch hier wurden mehrere Versuchsreihen für jede der drei oben beschriebenen Anordnungen sowohl für plane als auch für prismatische Backen durchgeführt. Leider musste festgestellt werden, dass Versuche der Anordnung 3 aufgrund von Verklemmen in den Kinematiken der Greifer keine reproduzierbaren und somit verlässlichen Ergebnisse liefern. Das Phänomen des Verklemmens konnte in schwächerer Form auch bei Anordnung 1 und Anordnung 2 betrachtet werden, insbesondere bei der Verwendung prismatischer Backen. Es tritt immer dann auf, wenn die Backen nur einseitig belastet werden (vgl. Anordnung 3) oder Torsionsmomente aufnehmen müssen (vgl. Anordnung 2). Es äußert sich mit einer Verkleinerung der minimalen Greifkraft, da durch das Verklemmen weniger Kraft vom Greifer selber aufgebracht werden muss. Für die Umsetzung der Fälle 1 und 2 wurde, wie in *Abbildung 8-6* beschrieben, ausgehend vom Schwerpunkt für jede Backenart, plan und prismatisch, die Greifposition in 15 mm-Schritten entlang der x-Achse verschoben.

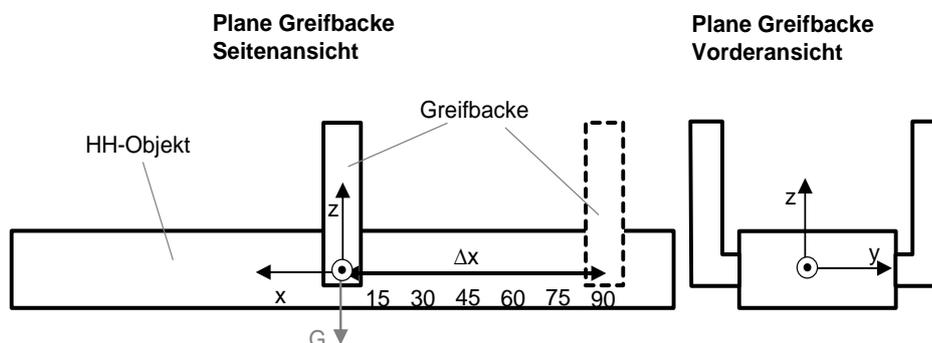


Abbildung 8-6: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Erprobung der Greifkraftberechnung von mechanischen Greifern – Anordnung 1 und 2

Für die Durchführung der Versuche wurde der Winkelgreifer SGB 50 der Firma Schunk verwendet. Die verwendeten Handhabungsobjekte haben folgende Daten:

- Für plane Backen: Vollmaterial aus Aluminium, Abmessungen 16 x 240 x 20 mm, Gewicht 0,21 kg
- Für prismatische Backen: Rundes Vollmaterial aus Stahl, Durchmesser 30 mm, Länge 240 mm, Gewicht 1,38 kg

Es wurde ein Haftreibungskoeffizient von  $\mu = 0,61$  bei der Berechnung verwendet.

Tabelle 8-4: Ergebnisse der Versuche zur Greifkraftberechnung von mechanischen Greifern Anordnung 1 und 2

Legende zu den Diagrammen	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">—■—</div> <math>F_G</math> Werte der Greifkraftberechnung                 </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="margin-right: 10px;">—●—</div> <math>F_G</math> Messwerte                 </div>																					
Plane Greifbacke Anordnung 1 und 2	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Data for Plane Gripper Graph</caption> <thead> <tr> <th>Abstand (mm)</th> <th><math>F_G</math> Berechnung (N)</th> <th><math>F_G</math> Messwerte (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6.5</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>15</td><td>4.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>30</td><td>9.5</td><td>9.5</td></tr> <tr><td>45</td><td>13.5</td><td>11.0</td></tr> <tr><td>60</td><td>18.0</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>90</td><td>27.5</td><td>27.5</td></tr> </tbody> </table>	Abstand (mm)	$F_G$ Berechnung (N)	$F_G$ Messwerte (N)	0	6.5	6.5	15	4.5	4.5	30	9.5	9.5	45	13.5	11.0	60	18.0	14.5	90	27.5	27.5
Abstand (mm)	$F_G$ Berechnung (N)	$F_G$ Messwerte (N)																				
0	6.5	6.5																				
15	4.5	4.5																				
30	9.5	9.5																				
45	13.5	11.0																				
60	18.0	14.5																				
90	27.5	27.5																				
Prismatische Greifbacke Anordnung 1 und 2	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Data for Prismatic Gripper Graph</caption> <thead> <tr> <th>Abstand (mm)</th> <th><math>F_G</math> Berechnung (N)</th> <th><math>F_G</math> Messwerte (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>15</td><td>7.5</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>30</td><td>15.0</td><td>11.5</td></tr> <tr><td>45</td><td>23.5</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>60</td><td>31.5</td><td>20.5</td></tr> <tr><td>90</td><td>47.5</td><td>32.5</td></tr> </tbody> </table>	Abstand (mm)	$F_G$ Berechnung (N)	$F_G$ Messwerte (N)	0	6.5	4.5	15	7.5	6.5	30	15.0	11.5	45	23.5	14.5	60	31.5	20.5	90	47.5	32.5
Abstand (mm)	$F_G$ Berechnung (N)	$F_G$ Messwerte (N)																				
0	6.5	4.5																				
15	7.5	6.5																				
30	15.0	11.5																				
45	23.5	14.5																				
60	31.5	20.5																				
90	47.5	32.5																				

Die Ergebnisse der Greifkraftberechnung für mechanische Backen zeigen, dass das Modell zu jeder Konfiguration einen gültigen Griff ermöglicht. Bei großem Abstand zum Schwerpunkt neigen jedoch insbesondere die Berechnungen für prismatische Backen dazu, zu große Kräfte auszugeben. Beim Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Erkenntnisse, lassen sich auch hier die Verbesserungen deutlich erkennen. Bei einer Berechnung der Greifkraft nach HESSE (2011) ergibt sich für die Konfiguration der planen Backe (Griff im Schwerpunkt des Handhabungsobjektes) eine Greifkraft von 2,6 N. Bei der prismatischen Backe beträgt die benötigte Greifkraft nach WOLF ET AL. (2016) 6,7 N (ebenfalls für einen Griff im Schwerpunkt). Während die nach dem Stand der Erkenntnisse berechneten Größen für einen Griff im Schwerpunkt noch geeignet sind, zeigt sich ein großer Fehler bei Griffen außerhalb des Schwerpunkts. Wie beschrieben, ist die Kraft beim Öffnen von mechanischen Greifern aufgrund von Verklemmungsphänomenen nicht immer deterministisch. Bei der Bewertung der hier vorgestellten Ergebnisse gilt es dies zu beachten. Aufgrund von numerischen Fehlern bei der Berechnung gibt das Modell bei den planen Backen keinen Wert für die Berechnung im Schwerpunkt aus.

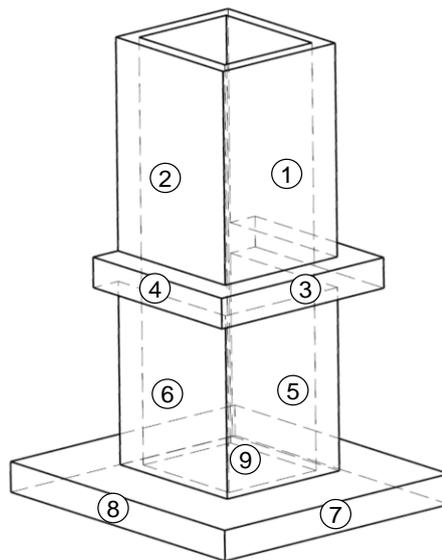
### **8.3 Erprobung Greifpositionsbestimmung, Auslegung von Wirkelementen und Greiferauswahl**

Mittels des Handhabungsobjekt-Spektrums aus *Abschnitt 8.1.3* wird im Folgenden die Funktionsweise der Greifpositionsbestimmung sowie der Auslegung und Auswahl erprobt. Anhand eines Beispiel-Handhabungsobjekts wird die Gesamtmethode getestet. Mit Hilfe des Referenzhandhabungsobjekt-Spektrums wird anschließend die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Objekte und Geometrien aufgezeigt.

Neben einer Gesamtevaluation werden jeweils die einzelnen Subroutinen geprüft. Die Greifpositionsbestimmung wird in Anlehnung zum Vorgehen von DINI & FAILLI (2000) auf Vollständigkeit und Zulässigkeit der ermittelten Greifpositionen überprüft. Im nächsten Schritt wird manuell untersucht, inwieweit die von der Auslegung definierten Wirkelemente und Grundkörper zulässig und passend für die Greifpositionen sind. Abschließend werden die Greifer anhand einer Versuchsreihe unter realen Bedingungen (siehe *Abschnitt 8.1.3*) auf ihre Funktionsfähigkeit erprobt.

### 8.3.1 Erprobung anhand eines quaderförmigen Handhabungsobjekts

Das quaderförmige Handhabungsobjekt 6 (vgl. Anhang A.8) wurde unter Verwendung der Eingabedaten (vgl. Anhang A.10) in die Software geladen. Die Basisfläche entspricht der Standfläche des Handhabungsobjektes in, wie *Abbildung 8-7* dargestellt. Sperrflächen wurden nicht definiert. Es werden nur Außengriffe zugelassen.



*Abbildung 8-7: Visualisierung der identifizierten Greifpositionen auf Quader 6*

Der Algorithmus für die Greifpositionsbestimmung generiert insgesamt 9 Greifpositionen. Bei den Positionen 1-8 handelt es sich um Positionen für mechanische Greifer, Greifposition 9, im Inneren des Objektes, ist für einen Sauggreifer vorgesehen. Somit findet der Algorithmus alle für dieses Szenario zulässigen Lösungen.

Alle Ergebnisse der Auslegung wurden manuell geprüft und waren zulässig und richtig. Um eine finale Auswahl treffen zu können, wurden jeweils die geometrisch maximalen Wirkelemente auf den Greifpositionen gewählt und die Gütemaße der Metriken bestimmt (vgl. *Tabelle 8-5* und *Tabelle 8-6*). Eine dunkle Färbung markiert das beste Gütemaß in der jeweiligen Kategorie. Es ist deutlich erkennbar, dass Greifposition 2 zu favorisieren ist. Obwohl es sich bei dem Objekt um ein stabförmiges Gebilde handelt (vgl. *Abschnitt 7.1*), wurde der Vollständigkeit halber der ausgelegte Vakuumgreifer ebenfalls betrachtet. Auffällig ist hierbei die schlechte Anfahbarkeit der Greifposition des Vakuumgreifers.

### 8.3 Erprobung Greifpositionsbestimmung, Auslegung von Wirkelementen und Greiferauswahl

*Tabelle 8-5: Metriken mechanische Greifer Quader 6 (beste Gütemaße in jeder Kategorie grau eingefärbt)*

Greifposition	1) Ebenheit Greifflächen [°]	2) Beanspruchung Greifobjekt [Pa]	3) Stabilität des Griffs [°]	4) Belastungsmetrik	5.1) Versagen des Griffs - Störkontur	5.2) Versagen des Griffs - Objektkante	6) Anfahbarkeit
1	180	7,06*10 <sup>3</sup>	48,31	0,005	0	0,89	8
2	180	5,62*10 <sup>3</sup>	52,74	0,005	0	0,91	8
3	180	2,95*10 <sup>5</sup>	20,72	0,055	0	0,057	8
4	180	3,81*10 <sup>5</sup>	20,65	0,071	0	0,57	8
5	180	7,06*10 <sup>3</sup>	46,11	0,011	0	0,89	5,19
6	180	5,62*10 <sup>3</sup>	50,60	0,010	7,7*10 <sup>-4</sup>	0,90	5,47
7	180	2,95*10 <sup>5</sup>	16,70	0,091	0	0,57	8
8	180	2,95*10 <sup>5</sup>	19,36	0,091	0	0,57	8

*Tabelle 8-6: Metriken Sauggreifer Quader 6*

Greifposition	1) Ebenheit Greifflächen [°]	2) Beanspruchung Greifobjekt [Pa]	3) Stabilität des Griffs [°]	4) Belastungsmetrik	5.1) Versagen des Griffs - Störkontur	5.2) Versagen des Griffs - Objektkante	6) Anfahbarkeit
9	180°	1,03*10 <sup>5</sup>	50,46	-	0,015	0,96	0,267

Nach der Identifizierung und Bewertung der Greifpositionen wurden drei der ausgelegten Greifer gefertigt und montiert. Alle drei Lösungen konnten das Handhabungsobjekt unter Verwendung der von der Auslegung ausgegebenen Greifkräfte sicher greifen (vgl. *Tabelle 8-7*). Neben dem favorisierten Greifer von Greifposition 2 wurde der Greifer von Position 6 als Vergleichsgreifer sowie der Vakuumgreifer gewählt.

Tabelle 8-7: Testgreifer Quader 6

Greifposition Nummer 6	Beste Greifposition Nummer 2	Sauggreifer
		

Alle Lösungen sind gültig, da das Handhabungsobjekt sicher gegriffen werden kann. Gut zu sehen sind die durch die Metriken bereits absehbaren Abstriche, welche bei den jeweiligen Greifern gemacht werden müssen. So muss bei Greifpunkt 6 beim Anfahren die Störkontur umfahren werden, die sich nahe an der Greifposition befindet. Dies spiegelt sich in den Metriken 5 und 6 wieder. Beim Vakuumgreifer ist nachvollziehbar, dass diese Lösung aufgrund der tief im Handhabungsobjekt liegenden Greifposition ebenfalls sehr fehleranfällig und aufwändig zum Anfahren ist.

### 8.3.2 Erprobung anhand eines Handhabungsobjekt-Spektrums

Das Handhabungsobjekt-Spektrum wurde mit den gleichen Rahmenbedingungen wie im vorherigen Versuch in die Software geladen. Die gewählten Grundflächen können anhand der Standflächen der Objekte in den Bildern im *Anhang A.8* entnommen werden. Auch bei diesem Versuch wurden keine Sperrflächen definiert und ausschließlich Außengriffe betrachtet.

Für die Fertigung und Montage wurde auf eine tiefere Bewertung anhand der Metriken verzichtet. Stattdessen wurde jeweils die Grundkörper-Wirkelement-Kombination mit der geringsten nötigen Greifkraft ausgewählt. Alle Handhabungsobjekte konnten unter Verwendung der ausgegebenen Greifkraft erfolgreich gegriffen werden (vgl. *Anhang A.11*). Um die Anzahl an benötigten Greifergrundkörpern zu reduzieren, wurden die verwendeten Greiferbacken teilweise spezifisch an den in den Bildern (vgl. *Anhang A.11*) erkennbaren

Grundkörper angepasst. Dies führt zu überdurchschnittlich dicken Wirkelementen, hat aber keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Greifers.

### 8.4 Erprobung der Greiferflexibilisierung

Nach diversen Vorversuchen in Bezug auf spezifische Greiferarten wurden zwei große Versuchsreihen zur Erprobung des Algorithmus zur Greiferflexibilisierung durchgeführt. Dafür wurden die Handhabungsobjekt-Spektren aus *Abbildung 8-8* (Handhabungsspektrum 1) und das in *Abschnitt 8.1.3* beschriebene Handhabungsobjekt-Spektrum 2 (vgl. *Anhang A.8*) verwendet. Die Ergebnisse der Erprobung des Flexibilisierungsalgorithmus stellen jeweils nur eine mögliche von vielen theoretisch denkbaren Lösungen dar (vgl. *Abschnitt 6.5.5*). Es handelt sich dabei also vielmehr um eine Stichprobe als um eine vollständige Lösung.



*Abbildung 8-8: Handhabungsobjekt-Spektrum 1 zur Erprobung des Algorithmus zur Steigerung der Greiferflexibilität*

#### Versuch Handhabungsobjekt-Spektrum 1

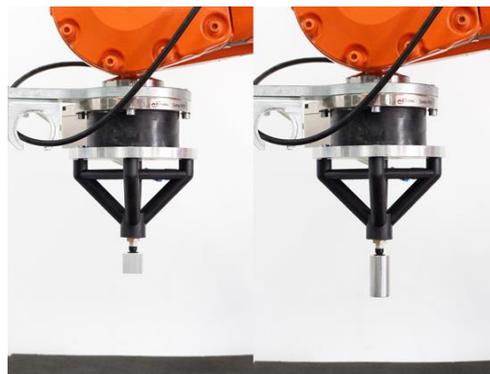
Die Eingabewerte für die Greifpositionsbestimmung und Auslegung wurden entsprechend *Anhang A. 10* gewählt. Der Versuchsaufbau entspricht dem in *Abschnitt 8.1.3* dargestellten.

Die für die Handhabungsaufgabe errechneten kombinierten Greifer bestehen aus zwei Vakuumgreifern mit runden Saugern (Radius 1: 5,9 mm und Radius 2: 15,7 mm). Die notwendigen Greifkräfte der Greifer betragen 0,34 N (Greifer 1) und 14,52 N (Greifer 2). Dies resultiert in einem benötigten Unterdruck von 0,03 bar (Greifer 1) und 0,2 bar (Greifer 2). Da keine Bauraumbeschränkung vorhanden ist, wurde für die Erprobung ein Standard-Vakuum-Grundelement verwendet.

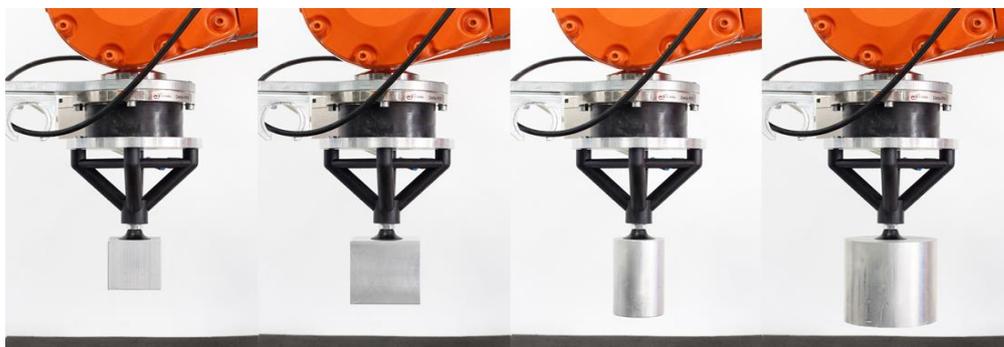
Bei der Betrachtung der Ergebnisse scheint es zunächst fraglich, warum zwei und nicht nur ein Vakuumgreifer benötigt werden. Eine überschlagsmäßige Berech-

nung nach *Formel (2.2)* unter Verwendung der vorgegebenen Randbedingungen und einem Unterdruck von 0,6 bar zeigt jedoch, dass für das Handhabungsobjekt mit der größten Masse (Zylinder 3) ein Mindestsaugerdurchmesser von 17,6 mm benötigt wird. Die zwei kleinsten Objekte (Zylinder 1 und Würfel 1) besitzen einen Durchmesser bzw. eine Kantenlänge von 20 mm. Unter Abzug des in den Nutzereingaben hinterlegten Abstandsmaßes vom Rand (2 mm) wird deutlich, warum zwei verschiedene Größen benötigt werden. Folgerichtig verteilt der Algorithmus die verfügbaren Sauger unter Nutzung der jeweils maximal möglichen Greiffläche auf die Handhabungsobjekte.

Unter Verwendung eines Saugers mit dem Durchmesser von 10 mm (erster kombinierter Greifer, vgl. *Abbildung 8-9*), eines weiteren Saugers mit einem Durchmesser von 30 mm (zweiter kombinierter Greifer, vgl. *Abbildung 8-10*) und den oben genannten Unterdrücken konnten alle Handhabungsobjekte sicher gegriffen werden.



*Abbildung 8-9: Realversuch Greiferflexibilisierung – Handhabungsobjekt-Spektrum 1 – erster kombinierter Greifer*

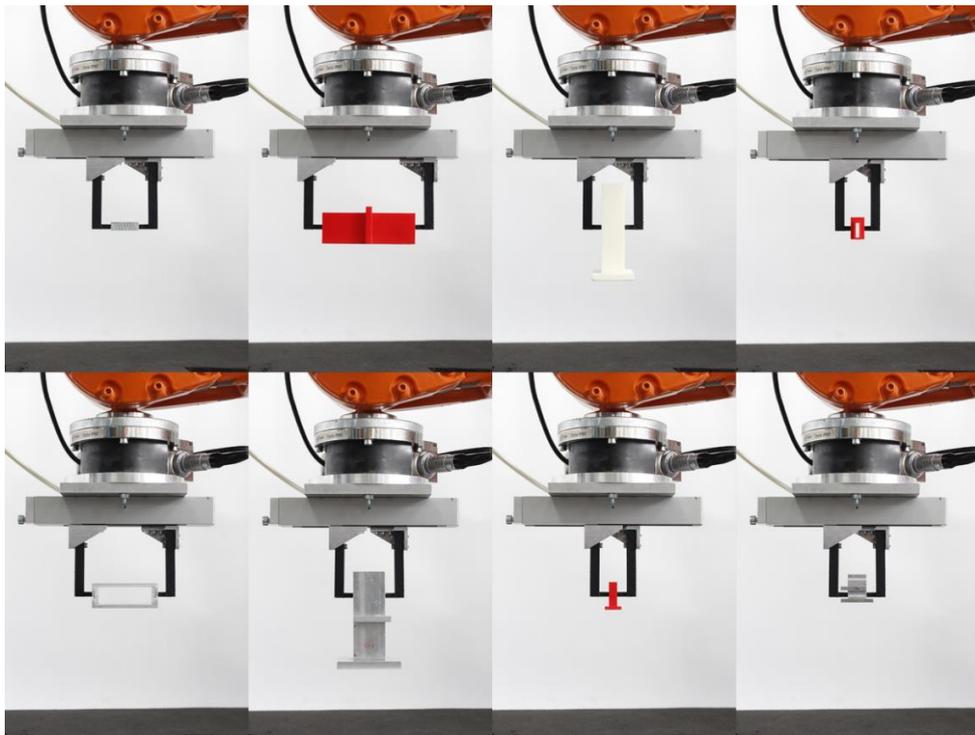


*Abbildung 8-10: Realversuch Greiferflexibilisierung – Handhabungsobjekt-Spektrum 1 – zweiter kombinierter Greifer*

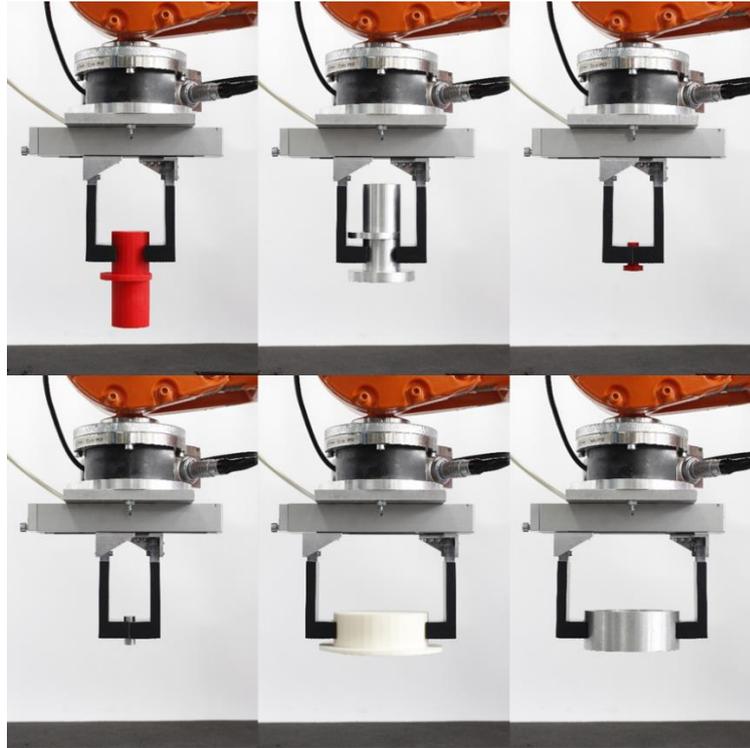
Versuch Handhabungsobjekt-Spektrum 2

Auch bei diesem Versuch wurden die Eingabewerte für die Greifpositionsbestimmung und Auslegung entsprechend *Anhang A.10* gewählt. Das Handhabungsobjektspektrum umfasst die Teile aus *Anhang A.8*

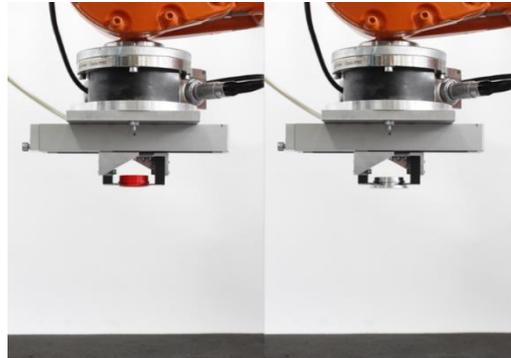
Die vom Algorithmus ausgegebene Lösung besteht aus einem planen Parallelgreifer (vgl. *Abbildung 8-11*), einem prismatischen Parallelgreifer (vgl. *Abbildung 8-12*) und einem prismatischen Winkelgreifer (vgl. *Abbildung 8-13*). Da kein entsprechender Winkelgreifer-Grundkörper zur Verfügung stand, wurde die Greifkraft mittels des bereits zuvor genutzten Parallelgreifer-Grundkörpers aufgebracht, was aber keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Greifers hat. Unter der Verwendung der Ausgabedaten des Flexibilisierungsalgorithmus konnten alle Handhabungsobjekte sicher gegriffen werden.



*Abbildung 8-11: Realversuch Greiferflexibilisierung – Handhabungsobjekt-Spektrum 2 – erster kombinierter Greifer*



*Abbildung 8-12: Realversuch Greiferflexibilisierung – Handhabungsobjekt-Spektrum 2 – zweiter kombinierter Greifer*



*Abbildung 8-13: Realversuch Greiferflexibilisierung – Handhabungsobjekt-Spektrum 2 – dritter kombinierter Greifer*

Bei einer kritischen Prüfung der Ausgabe des Flexibilisierungsalgorithmus muss festgestellt werden, dass theoretisch auch möglich gewesen wäre, eine Handhabung des Spektrums mit nur zwei kombinierten Greifern durchzuführen. Demzufolge ist es möglich, alle zylindrischen Handhabungsobjekte mit einem Greifer handzuhaben. Der Grund für das Ergebnis im vorliegenden Fall hängt mit der Diskretisierung innerhalb der Auslegung zusammen. Diese wurde für alle in Kapitel 8 beschriebenen Versuche auf 5 mm festgelegt. Die Kontaktlinien der Greifpositionen von Zylinder 1 und 4 (vgl. *Abbildung 8-13*) sind jedoch kürzer

als 5 mm, sodass sie bei der Interpolation mit größeren Handhabungsobjekten „übersehen“ werden. Verkleinert man die Diskretisierung, so findet der Algorithmus zwei kombinierte Greifer. Es muss hinzugefügt werden, dass diese aufgrund der kleinen Backendimensionen zu sehr instabilen Griffen bei den größeren Handhabungsobjekten geführt hätten. Das Beispiel zeigt die Notwendigkeit, trotz der größeren zu bearbeitenden Datenmenge auf eine ausreichende Diskretisierung bei der Auslegung zu achten.

### **8.5 Kritische Reflexion des Erprobungsergebnisses**

Die Erprobung der Methode anhand der beschriebenen Szenarien ermöglicht nur eine beschränkte Aussage über den Gültigkeitsbereich und die Funktionalität des Vorgehens. Deswegen soll im Folgenden basierend auf den Erfahrungen der Erprobung nochmals kritisch reflektiert werden, wo mögliche Grenzen oder Herausforderungen bestehen.

Im ersten Schritt der Methode, der Analysephase, stellt die Qualität der verwendeten Daten die größte mögliche Fehlerquelle dar. Beispiele hierfür sind fehlerhafte CAD-Dateien, die nicht verarbeitet werden können oder die zu einer Missinterpretation der Eingangsdaten führen. Weiter besteht die Möglichkeit, dass ein spezifisches Handhabungsobjekt von unterschiedlichen Konstrukteuren bzw. mit verschiedenen Konstruktionsprogrammen unterschiedlich modelliert wird. Dies kann zu einer Verfälschung der Ergebnisse aus der Analysephase führen. Im Bereich der Greifpositionsbestimmung ist es mit dem verwendeten Algorithmus aktuell nicht möglich, Oberflächen zu rastern. Folglich werden ausschließlich Flächen ohne Löcher bzw. mit konvexen Oberflächen als Greifpositionen erkannt, da keine Segmentierung der Oberflächen möglich ist. Eine weitere Konsequenz ist, dass das Zentrum von Greifpositionen aktuell nur im geometrischen Mittelpunkt einer Fläche platziert werden kann.

Bei kritischer Betrachtung der Synthesephase ergeben sich aus der Komplexität der Aufgabe sowie der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Ablaufschritten der Methode ebenfalls diverse Herausforderungen. So beruhen die Festigkeitsbetrachtungen auf verhältnismäßig rudimentären Gleichungen, zudem wird jeweils nur ein Lastfall betrachtet. Deswegen kann es unter spezifischen Bedingungen vorkommen, dass Wirkelemente ausgelegt werden, die den Belastungen nicht standhalten. Neben der Gefahr eines Totalversagens der Wirkelemente besteht dabei die Gefahr, dass es durch eine Überbelastung der Wirkele-

mente zu einer Veränderung der Kontaktsituation mit dem Handhabungsobjekt kommt und somit die berechneten Greifkräfte unter Umständen nicht mehr ausreichend sind. Ein Beispiel dafür stellt eine Verbiegung von planen Backen bei mechanischen Greifern dar. Dadurch kann beim Greifen beispielsweise anstatt des angestrebten (und berechneten) Flächenkontakts nur ein Linienkontakt zustande kommen. Dies kann die Sicherheit des Griffes negativ beeinflussen und die Belastung des Handhabungsobjektes verstärken. Eine entsprechende Situation kann neben Fehlern bei der Festigkeitsbetrachtung auch durch Toleranzen von Wirkelementen und Handhabungsobjekten ausgelöst werden. Bezogen auf die Greifkraftberechnung gibt es zwei Punkte, welche beachtet werden müssen. Zum einen war es aufgrund der beschriebenen Verklemmproblematik nicht möglich, den Berechnungsansatz für prismatische Greiferbacken ausreichend hinsichtlich möglicher Grenzen zu testen. Aufgrund der (im Vergleich zu den anderen Berechnungen) starken Vereinfachungen ist jedoch davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Greifkraftberechnung von prismatischen Backen deutlich weniger belastbar sind als die der anderen verwendeten Ansätze. Einen zweiten Unsicherheitsfaktor stellen die Solver dar, welche bei der Greifkraftberechnung mittels der komplexeren Modelle verwendet wurden. Hier kann es vorkommen, dass wegen numerischer Fehler keine oder fehlerhafte Lösungen berechnet werden. Im Rahmen der Erprobung wurde des Weiteren festgestellt, dass es insbesondere bei komplexen Grundkörpern von Vakuumgreifern vorkommt, dass die automatisch erstellten CAD-Dateien fehlerhaft waren. Dies kann dazu führen, dass diese nicht fertigbar sind oder bei der Behebung der Fehler die Funktionsfähigkeit der Grundkörper verloren geht. Besonders betroffen sind dabei die integrierten Vakuumkanäle, welche beim Reparieren der Modelle durch entsprechende Algorithmen der additiven Fertigung des Öfteren konstruktiv verschlossen werden.

### **8.6 Zusammenfassung der Erprobung**

Im Rahmen der Erprobung wurde ein Versuchsaufbau definiert und realisiert, sowie ein Vorgehen zur Erprobung der rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen entwickelt und durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die rechnergestützte Auslegung und Auswahl mit ihren Subroutinen unter Verwendung von Metriken die Anforderungen für den beabsichtigten Gebrauch erfüllt. Ausgehend von den Versuchen konnten weitere Verbesserungspotentiale aufgedeckt werden. Des Weiteren wurden Randbedingungen definiert,

welche bei der Verwendung eines entsprechenden Vorgehens beachtet werden müssen.

Bei Vakuumgreifern konnten große Unterschiede bezüglich der Verformungswerte und den damit einhergehenden Unterschieden bei der tatsächlich wirksamen Fläche beobachtet werden. Um bei der Greifkraftberechnung noch genauere Aussagen treffen zu können, sollte der Beschreibung und Vermessung entsprechender Verformungsparameter große Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Der Minimalkraftversuch konnte als probates Mittel zur Messung von minimal notwendigen Greifkräften identifiziert werden. Bei der Durchführung muss darauf geachtet werden, in Abhängigkeit des Greifers keine zu niedrigen Greifkräfte zu untersuchen. Andernfalls können die Ergebnisse durch äußere Störfaktoren stark verfälscht werden. Bei mechanischen Greifern muss darauf geachtet werden, dass die durch die Kinematik induzierten Kräfte zum Öffnen des Greifers nicht zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Sowohl bei der Durchführung der Versuche als auch bei der rechnergestützten Auslegung und Auswahl stellen die Reibkoeffizienten eine Herausforderung dar. Sie haben einen großen Einfluss auf die Greifkraftberechnung, unterliegen jedoch großen Schwankungen (vgl. POPOV 2010, KÖHLER 2004). Dies muss entsprechend vom Nutzer beachtet werden. Denkbar ist beispielsweise die Berechnungen der Greifkraft nicht nur für einen spezifischen Reibkoeffizienten durchzuführen, sondern für einen Bereich durchzuführen, in welchem der Reibkoeffizient vermutet wird.



## 9 Bewertung

### 9.1 Technische Bewertung

Die entwickelte Methode zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen kann im industriellen Umfeld dazu beitragen, diesen Prozess in Zukunft deutlich strukturierter, effektiver und effizienter ablaufen zu lassen.

So sind im Vergleich zu einer manuellen Auslegung und Auswahl von Greifersystemen folgende Nutzenpotentiale zu erwarten:

- Dem Nutzer wird durch die beschriebene Methode ermöglicht, unter Verwendung der Metriken objektiv zwischen mehreren Lösungen zu wählen, ohne einen Mehraufwand zu generieren. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass der Lösungsraum vollständig bestimmt und genutzt wird.
- Durch die Standardisierung des Prozesses können Unterschiede bei der Auslegung und Auswahl durch subjektive Nutzereinschätzungen reduziert werden. Mittels der durchgehenden Datenbasis ist es außerdem möglich, die Eingangsdaten und getroffenen Annahmen digital zu dokumentieren und einzusehen.
- Die im Vergleich zum Stand der Erkenntnisse verbesserte Greifkraftberechnung erlaubt es, genauere Abschätzungen bezüglich der zu erwartenden Greifkräfte zu machen. Somit ist davon auszugehen, dass die mit der Methode generierten Greifersysteme besser auf die jeweilige Handhabungsaufgabe zugeschnitten sind. Das verspricht einen geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch der Greifersysteme, eine Reduktion von Versuchsreihen vor der Inbetriebnahme sowie eine höhere Prozesssicherheit im Betrieb.
- Mittels der (Teil-)Automatisierung des Vorgehens ist es möglich, auch große Mengen von Handhabungsobjekten innerhalb eines vertretbaren zeitlichen Rahmens zu analysieren. Der Algorithmus zur Flexibilisierung ermöglicht dabei die effiziente und effektive Generierung von flexiblen Greifersystemen.
- Im vorhergehenden Erprobungskapitel konnte gezeigt werden, dass die ausgelegten Greiferlösungen fertigbar und funktionstüchtig sind. Dies bestätigt die Funktionsfähigkeit des entwickelten Vorgehens.

Wie in der Erprobung gezeigt wurde, erfüllt die entwickelte Methode unter Beachtung der geschilderten Rahmenbedingungen die in Kapitel 3 formulierten Anforderungen. Im Rahmen der Erprobung war es Nutzern ohne Vorwissen möglich, funktionsfähige Greifer der drei Greiferarten auszulegen und auszuwählen. Ein industrieller Einsatz ist somit denkbar. Eine Verbesserung der Greifkraftberechnung konnte erreicht werden, während bei den verwendeten Modellen noch Potential zur Verbesserung besteht. Die strukturierte Betrachtung der Greiferflexibilisierung wurde in das Gesamtverfahren eingebunden und erfolgreich getestet. Die Vollständigkeit der Lösungsmenge der Ergebnisse der Auslegung und Auswahl ist schwierig nachweisbar. Bei der Erprobung der Greifpositionssuche konnte gezeigt werden, dass das Vorgehen alle theoretisch möglichen Greifpositionen findet. Für alle gefundenen Greifpositionen konnten Greifer ausgelegt werden, was als Indiz für die Größe des Lösungsraumes gewertet werden kann. Die Konsistenz und Eindeutigkeit des Vorgehens kann mit den in der Arbeit vorgestellten Ablaufdiagrammen und den zugehörigen Rechenvorschriften sowie Formeln nachvollzogen werden. Die Eignung des Verfahrens zur Entscheidungsfindung wurde erfolgreich im Rahmen der Erprobung an einem Beispiel-Handhabungsobjekt präsentiert.

Den beschriebenen Vorteilen stehen aktuell noch Herausforderungen entgegen, welche im Rahmen zukünftiger Forschung tiefergehend betrachtet werden müssen. Des Weiteren konnte im Rahmen der Erprobung der Methode festgestellt werden, dass eine Reihe von Faktoren einen überdurchschnittlichen Einfluss auf das Ergebnis der Auslegung und Auswahl haben, was entsprechend beachtet werden muss. Neben bereits erwähnten Rahmenbedingungen wie der Feinheit der Diskretisierung von Dimensionierungsmatrizen, gilt es insbesondere alle Faktoren betreffend der Greifkraftberechnung zu beachten. Hintergrund dafür ist, dass diese zu einer Fehleinschätzung der Greifsituation und somit zu einem unsicheren Griff führen können. Dies widerspricht einem der Ziele der Methode, welche den Betrag der Sicherheitsfaktoren reduzieren soll. Den größten Einfluss in dieser Hinsicht hat die Reibung zwischen den Wirkelementen und dem Handhabungsobjekt. Aufgrund der in diesem Zusammenhang Herausforderungen (vgl. *Abschnitt 2.4.1*), muss bei der Bestimmung der Haftreibungskoeffizienten sehr sorgfältig vorgegangen werden. Gleiches gilt bei der Bestimmung der Verformungsbeiwerte, der wirksamen Fläche und des Wirkungsgrades von Vakuumsaugern.

## 9.2 Wirtschaftliche Bewertung

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, kann eine Anwendung der Methode zu einer Verbesserung der Effektivität bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen beitragen. Es ist des Weiteren anzunehmen, dass durch die Automatisierung von Auslegung und Auswahl auch hinsichtlich der Effizienz Verbesserungen möglich sind. Wie groß die zu erwartenden (monetären) Einsparpotentiale der Methode sind, soll nachfolgend untersucht werden. Ausgehend davon soll anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung diskutiert werden, unter welchen Rahmenbedingungen eine Anwendung der Methode wirtschaftlich sinnvoll ist.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass durch den Einsatz der Methode große Einsparpotentiale im Bereich manueller Tätigkeiten von technischem Personal (Ingenieuren, Technikern, etc.) entstehen. Demgegenüber stehen Kosten, welche durch die Nutzung der Software (Anschaffungskosten, Betreuung der Software, Einarbeitung, etc.) entstehen. Je nach Geschäftsmodell können für die Bereitstellung der Software erhebliche Fixkosten entstehen.

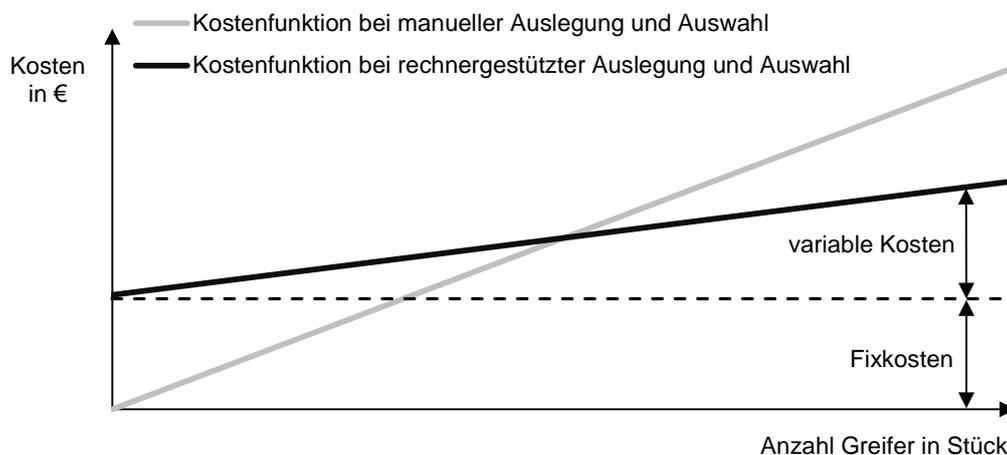


Abbildung 9-1: Abstrahierter Verlauf der Kostenfunktionen bei manueller sowie rechnergestützter Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Wie bereits beschrieben, ist der Einsatz von Greifern sehr vielfältig und über sämtliche Industriezweige vertreten. Entsprechend herausfordernd ist es, eine allumfassende Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer solchen Methode zu treffen. Nachfolgend soll deshalb anhand eines Beispielszenarios die Kostenstruktur aufgezeigt und mittels einer Kostenvergleichsrechnung quantifiziert werden. Ausgehend davon soll eine allgemeingültige Formel zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit hergeleitet werden.

### 9.2.1 Randbedingungen und Szenario

Im Rahmen der Szenarios soll für das quaderförmige Handhabungsobjekt aus *Abschnitt 8.3.1* ein Parallelgreifer ausgewählt, ausgelegt, gefertigt (Wirkelemente) und montiert (Verbindung von Wirkelementen mit Greifergrundkörper) werden. Es wird zugrunde gelegt, dass die Software für die Auslegung und Auswahl käuflich erworben wird. Des Weiteren wird angenommen, dass die manuell erstellte Lösung mit der rechnergestützt generierten Lösung identisch ist. Die Wirkelemente werden in beiden Fällen additiv gefertigt und manuell montiert. Die Kosten für die Fertigung der Wirkelemente sowie des Greifergrundkörpers orientieren sich an marktüblichen Preisen. Für die Berechnungen werden die Rahmenbedingungen aus *Tabelle 9-1* zugrunde gelegt.

*Tabelle 9-1: Randbedingungen für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit*

Annahme	Einheit	Zahlenwert
Anzahl ausgewählte Greifer	Stück	20
Softwarekosten Lizenz <sup>1</sup>	€	5000
Nutzungsdauer Software	Jahre	5
Restwert nach 5 Jahren der Softwarenutzung	€	0
Betrachtungszeitraum	Jahre	1
Kalkulatorische Abschreibungen <sup>2</sup>	€/Jahr	1000
Kalkulatorischer Zinssatz <sup>3</sup>	%	2,5
Personalkosten	€/h	37 <sup>4,5</sup>
Manueller Zeitaufwand bei der Auslegung und Auswahl durch die manuelle Methode	h/Greifer	8
Manueller Zeitaufwand bei der Auslegung und Auswahl durch die rechnergestützte Methode	h/Greifer	0,1677
Manueller Zeitaufwand für die Montage der Greifer	h/Greifer	0,087

<sup>1</sup> Anschaffungskosten entsprechen Wiederbeschaffungswert

<sup>2</sup> vgl. (BUNDESFINANZMINISTERIUM 2005)

<sup>3</sup> vgl. (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ 2016)

<sup>4</sup> vgl. (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2016)

<sup>5</sup> Wochenarbeitszeit von 38h und 4 Wochen pro Monat

Basierend auf den Randbedingungen ergeben sich folgende Kosten:

*Tabelle 9-2: Kostenvergleichsrechnung unter Verwendung der Randbedingungen von Tabelle 9-1 in Anlehnung an EICHHORN & MERK (2016)*

Kostenart	Manuelle Auslegung und Auswahl	Rechnergestützte Auslegung und Auswahl
<u>Fixkosten</u>		
Kalkulatorische Zinskosten pro Greifer	/	3,15 €
Kalkulatorische Abschreibungen pro Greifer	/	50 €
<u>Variable Kosten</u>		
Personalkosten pro Greifer	296 €	6,2 €
Kosten pro Greifer (Grundkörper und Wirkelement)	233,3 €	233,3 €
Montagekosten pro Greifer	2,95 €	2,95 €
<b>Gesamtkosten pro Greifer</b>	<b>532,25 €</b>	<b>295,6 €</b>

Weitere Kosten wie Raumkosten, Energiekosten, Kosten für Rechnerhardware, etc. sollen bewusst ausgespart werden, da davon ausgegangen wird, dass sich diese durch den Einsatz einer rechnergestützten Auslegung und Auswahl nicht oder nur vernachlässigbar verändern.

Wie sich anhand dieses Szenarios zeigt, ergibt sich durch die Verwendung einer rechnergestützten Auslegung und Auswahl ein deutlicher Kostenvorteil. Erkennbar ist jedoch auch, dass die Wirtschaftlichkeit der Anwendung stark von den Rahmenbedingungen abhängig ist. Zu diesen zählen die Anzahl der pro Jahr ausgelegten Greifer sowie die Kosten für die Software. Diese Faktoren sollen im folgenden Abschnitt weiter ausdetailliert werden.

### 9.2.2 Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Ausgehend von der beschriebenen Kostenstruktur lässt sich abstrahiert folgender Zusammenhang für die Wirtschaftlichkeitsbewertung einer entsprechenden Softwarelösung festhalten:

$$O + I \cdot Z_1 \cdot W \geq I \cdot Z_2 \cdot W \quad (9.1)$$

Dabei entspricht O den jährlich für die Nutzung der Software anfallenden Kosten, I den zu veranschlagenden Personalkosten pro Stunde, Z den Personenstun-

den, welche rechnergestützt ( $Z_1$ ) bzw. manuell ( $Z_2$ ) für die Auslegung und Auswahl aufgebracht werden müssen sowie  $W$  der Anzahl an ausgewählten und ausgelegten Greifern pro Jahr.

Unter der Annahme konstanter Zeiten für die manuellen Zeitanteile für die Auslegung und Auswahl spielen neben der Höhe der anzusetzenden Personalkosten insbesondere die Kosten für die Software sowie die Anzahl der jährlich ausgewählten und ausgelegten Greifer eine wichtige Rolle. Der Fixkostenanteil für die Nutzung der Software kann durch entsprechende (webbasierte) Nutzungsmodelle wie beispielsweise Pay-per-use- oder Abonnementmodelle (VOSSEN ET AL. 2012), so weit verringert werden, dass eine wirtschaftliche Nutzung ab Losgröße eins denkbar erscheint. Es ist davon auszugehen, dass bei einer kleinen Anzahl an ausgelegten und ausgewählten Greifern mangelndes Erfahrungswissen zu einem Anstieg der benötigten Zeit für die manuellen Tätigkeiten führt.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

Die Greiftechnik spielt in der automatisierten Produktion eine wesentliche Rolle, da sie die Schnittstelle zwischen Werkstück und dem Handhabungsgerät darstellt. Um das Hauptziel, ein sicherer beschädigungsfreier Griff, zu erreichen, muss der verwendete Greifer möglichst genau an das vorherrschende Handhabungsszenario angepasst werden. Dabei gilt es eine Reihe von Randbedingungen zu beachten, welche sich teilweise untereinander beeinflussen. Im industriellen Umfeld erfolgt die Auslegung und Auswahl von Greifern bis heute meist basierend auf Erfahrungswissen ohne klar definierte Vorgehensweise. Aufgrund der Komplexität der Aufgabe darf somit bezweifelt werden, dass die gefundene Greiferlösung immer die theoretisch beste Lösung darstellt. Vor dem Hintergrund immer kleinerer Losgrößen und größerer Variantenvielfalt in der Produktion muss zudem untersucht werden, wie Greifer flexibler gestaltet werden können.

Basierend auf dieser Ausgangssituation wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methode zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen entwickelt. Ausgehend von Nutzereingaben und den CAD-Daten der zu handhabenden Objekte unterstützt die Methode den Nutzer bei der systematischen Auslegung und Auswahl von Greifersystemen. Die Vorgehensweise gliedert sich in eine automatisierte Suche nach Greifpositionen, mit welcher anschließend mechanisch und geometrisch passende Wirkelemente bzw. Greifer in der Auslegung definiert, konstruiert und mittels Metriken bewertet werden. Einen wichtigen Baustein der Auslegung stellt die Berechnung der Greifkräfte dar. Für die Handhabung mehrerer Objekte werden die Daten der Auslegung an einen Flexibilisierungsalgorithmus übergeben. Dieser bestimmt systematisch die minimale Anzahl benötigter Greifer und deren Auslegungsdaten.

Die entwickelte Methode zeichnet sich im Vergleich zum Stand der Forschung und Technik insbesondere durch ihre Durchgängigkeit sowie die greiferartübergreifende Betrachtung von Handhabungsaufgaben aus. Im Rahmen umfangreicher Versuchsreihen wurde die Vorgehensweise getestet. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Ziel der Arbeit erreicht wurde und diese im industriellen Einsatz zu einer Effektivitäts- und Effizienzsteigerung bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen beitragen kann.

## 10.2 Weitere Forschungs- und Entwicklungspotentiale

Die Komplexität der Methode sowie die große Zahl an Randbedingungen bietet Potential für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Ein erster logischer Schritt wäre, die bestehende Vorgehensweise auf weitere Greiferarten auszuweiten. Aufgrund der geringen Anwendungszahlen anderer Greiferarten scheint es jedoch zielführender, sich der Problemstellung von Mehrfachgreifern unter Verwendung der in dieser Arbeit beschriebenen Greiferarten zu widmen. Insbesondere bei Vakuumgreifern ist diese Art der Konfiguration mit mehreren Wirkelementen industriell sehr verbreitet. Aktuelle Modelle (MANTRIOTA 2007A, BRAUN 1989) der Greifkraftberechnung müssen jedoch noch stark verbessert und ausgeweitet werden, um industriellen Standards zu genügen. Während der Fokus dieser Arbeit auf einer innerfabriklichen Verwendung lag, gibt es auch Ansätze für die Handhabung größerer Güter (MIRHOSSEYNI & WEBB 2009). Von Interesse könnte eine Untersuchung der Gemeinsamkeiten zwischen den Modellen sein, um so auch die Auslegung und Auswahl von Handhabungssystemen für größere Güter zu verbessern. Gleiches gilt für eine Anpassung an die Verwendung in der Präzisions- und Mikrotechnik (GRUTZECK & KIESEWETTER 2002, FREUNDT 2012, BRECHER & PESCHKE 2005). In der Robotik stellt die Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) ein wachsendes Anwendungsfeld dar (IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016). Im Bereich der Auslegung und Definition von Greifern könnten in Zukunft entsprechende Gestaltungsrandbedingungen bei der rechnergestützten Auslegung und Auswahl mit berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Modelle, welche für die Auslegung und Auswahl benötigt werden, gibt es unzählige Möglichkeiten zur Verbesserung der Vorgehensweise. Ein vielversprechendes Feld stellt dabei die Simulationstechnik dar. Neben verschiedenen Ansätzen, Modelle der Physiksimulation (FROMM & BIRK 2016) einzubinden und so beispielsweise eine frühzeitige Absicherung der generierten Lösungen zu erzielen, besteht insbesondere bei der Greifkraftberechnung noch großes Potential. Zusätzlich zu einer weiteren Erforschung der in dieser Arbeit beschriebenen Modelle könnte unter Verwendung von (simulativen) Ansätzen (vgl. LIU & HAMMELE 2002, LIU ET AL. 2006, NOVOTNÝ & HORÁK 2012, NOVOTNY & HORAK 2009, GE ET AL. 2015) auch die Beschreibung von Wirkelementen und deren Verhalten genauer erfolgen. Ein Beispiel dafür stellen die von RADTKE (1991) und BECKER (1993) verwendeten Verformungskräfte bei Sauggreifern dar, welche in der hier vorliegenden Arbeit vernachlässigt wurden.

Bei der Berechnung von Vakuumgreifern bietet sich außerdem an, noch weitere Faktoren zu berücksichtigen. Zu diesen zählen beispielsweise die Gurley-Zahl (HUTTEN 2007) oder die Porosität für die Verluste aufgrund von Durchsaugung. Auf Seite der mechanischen Greifer gilt es, ein ausgereifteres Modell für prisma-tische Backen zu entwickeln.

Wie bereits angedeutet, bieten sich bei der finalen Auswahl eines Greifers noch diverse Ansätze für weitergehende Forschung. Neben der Möglichkeit, weitere Metriken einzuführen oder mathematische Modelle bei der Entscheidungsfindung einzubinden (KARANDE & CHAKRABORTY 2013), bietet sich auch die Verwendung neuronaler Netze (PINTO & GUPTA 2016, JOHNS ET AL. 2016) oder künstlicher Intelligenz bzw. Cloud-robotic (TIAN ET AL. 2017) zur Lösung der Problemstellung an. Dies ermöglicht die Bewertung der Greifqualität als lernendes System aufzubauen und so immer weiter zu verbessern.

Abgesehen von der Verbesserung der eigentlichen Methode, stellt sich die Frage, wie diese in übergeordnete Systeme integriert werden kann. Beispiele hierfür sind Montage- oder Handhabungsplanungssysteme, welche ebenfalls in zunehmendem Maße rechnergestützt entwickelt werden (REINHART 2017). Ein weiteres Feld liegt im Bereich der Produktgestaltung, da sich die handhabungsgerechte Gestaltung, anhand einer Methode wie der hier beschriebenen, noch deutlich verbessern ließe. So wäre es möglich, verschiedene Gestaltungsalternativen sofort greiftechnisch bewerten zu können.

In der hier beschriebenen Vorgehensweise werden die Grundelemente von mechanischen Greifern als fertige Kaufteile betrachtet. Aktuelle Forschungsansätze beschäftigen sich damit, wie auch die Grundelemente von mechanischen Greifern inklusive der Kinematik additiv gefertigt werden können. Die Einbindung von additiv gefertigten Greifergrundkörpern würde den Lösungsraum der Methode nochmals drastisch erhöhen (vgl. DER KONSTRUKTEUR 2016).



## 11 Literaturverzeichnis

AGRAWAL ET AL. 1991

Agrawal, V. P.; Kohli, V.; Gupta, S.: Computer aided robot selection: the 'multiple attribute decision making' approach. *International Journal of Production Research* 29 (1991) 8, S. 1629-1644.

AGRAWAL ET AL. 1992

Agrawal, V. P.; Verma, A.; Agarwal, S.: Computer-aided evaluation and selection of optimum grippers. *International Journal of Production Research* 30 (1992) 11, S. 2713-2732.

AMEND ET AL. 2012

Amend, J.; Brown, E.; Rodenberg, N.; Jaeger, H. M.; Lipson, H.: A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Transactions on Robotics* 28 (2012) 2, S. 341-350.

AMEND ET AL. 2016

Amend, J.; Cheng, N.; Fakhouri, S.; Culley, B.: Soft Robotics Commercialization. Jamming Grippers from Research to Product. *Soft Robotics* 3 (2016) 4, S. 213-222.

AUCH 1989

Auch, M.: Fertigungsstrukturierung auf der Basis von Teilefamilien. (Dissertation) Universität Stuttgart. Stuttgart (1989).

AUER 1976

Auer, H. B.: Beitrag zur Steigerung der Flexibilität von Handhabungseinrichtungen im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung. (Dissertation) Technische Universität Berlin. Berlin (1976).

BALAN & BONE 2003

Balan, L.; Bone, G. M.: Automated Gripper Jaw Design and Grasp Planning for Sets of 3D Objects. *Journal of Robotic Systems* 20 (2003) 3, S. 147-162.

BARBER ET AL. 1986

Barber, J.; Volz, R.; Desai, R.; Rubinfeld, R.; Schipper, B.; Wolter, J.: Automatic two-fingered grip selection. *Proceedings 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA 1986, S. 890-896.

BARTENSCHLAGER ET AL. 1998

Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G.: Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Braunschweig: Vieweg 1998. ISBN: 978-3-528-03830-4.

BAUER 2002

Bauer, F.: Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme. (Dissertation) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen (2002).

BAUERNHANSL ET AL. 2016

Bauernhansl, T.; Hansmersmann, A.; Birenbaum, C.; Burkhardt, J.; Schneider, M.; Stroka, M.: Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau. (Studie) Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung. Stuttgart (2016).

BECKER 1993

Becker, R.: Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifern. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (1993).

BERGELIN ET AL. 2011

Bergelin, B.; Slaboch, B.; Sun, J.; Voglewede, P. A.: A handy new design paradigm. Mechanical Sciences 2 (2011) 1, S. 59-64.

BICCHI & KUMAR 2000

Bicchi, A.; Kumar, V.: Robotic grasping and contact: a review. Proceedings 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). San Francisco, USA, 2000, S. 348-353.

BICCHI 2000

Bicchi, A.: Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity. IEEE Transactions on Robotics and Automation 16 (2000) 6, S. 652-662.

BIERBAUM 2012

Bierbaum, A.: Haptische Exploration von unbekanntem Objekten mit einer humanoiden Roboterhand. (Dissertation) Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe (2012).

BIRK ET AL. 1981

Birk, J. R.; Kelley, R. B.; Martins, H. A.: An Orienting Robot for Feeding Workpieces Stored in Bins. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 11 (1981) 2, S. 151-160.

BÖGER 1997

Böger, T.: Beitrag zur Projektierung von Greifelementen für die Handhabung flächiger, biegeweicher Materialien. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (1997).

BOGUE 2016

Bogue, R.: Flexible and soft robotic grippers. The key to new markets? Industrial Robot: An International Journal 43 (2016) 3, S. 258-263.

BOHG ET AL. 2014

Bohg, J.; Morales, A.; Asfour, T.; Kragic, D.: Data-Driven Grasp Synthesis – A Survey. IEEE Transactions on Robotics 30 (2014) 2, S. 289-309.

BOOTHROYD 2005

Boothroyd, G.: Assembly Automation and Product Design. 2 Aufl. Boca Raton, USA: Taylor & Francis 2005. ISBN: 978-1-57444-643-2.

BOUBEKRI & NAGARAJ 1993

Boubekri, N.; Nagaraj, S.: An integrated approach for the selection and design of assembly systems. *Integrated manufacturing systems* 4 (1993) 1, S. 11-17.

BOUBEKRI & RAMANUJAM 1995

Boubekri, N.; Ramanujam, G.: Design of grasping methodologies for rotational assembly components. *International journal of flexible manufacturing systems* 7 (1995) 4, S. 373-388.

BOYLE ET AL. 2011

Boyle, I.; Rong, Y.; Brown, D. C.: A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27 (2011) 1, S. 1-12.

BRAUN 1989

Braun, D.: *Industrieroboter – Auslegung von pneumatischen Flächengreifern*. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (1989).

BRECHER & PESCHKE 2005

Brecher, C.; Peschke, C.: Greifer und Montagemaschinen. In: Dilthey, U., Brandenburg, A. (Hrsg.): *Montage hybrider Mikrosysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer 2005, S. 7-20. ISBN: 3540237062.

BREUNINGER ET AL. 2013

Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg 2013. ISBN: 978-3-642-24324-0.

BROCK & FRICKE 1983

Brock, R.; Fricke, A.: Greifkraftkennlinien zur Auswahl von Standardgreifern. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt* 25 (1983) 5, S. 682-687.

BROST 1988

Brost, R. C.: Automatic Grasp Planning in the Presence of Uncertainty. *The International Journal of Robotics Research* 7 (1988) 1, S. 3-17.

BROWN & BROST 1999

Brown, R. G.; Brost, R. C.: A 3-D modular gripper design tool. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1999) 1, S. 174-186.

BUNDESFINANZMINISTERIUM 2005

Bilanzsteuerrechtliche Beurteilung von Aufwendungen zur Einführung eines betriebswirtschaftlichen Softwaresystems (ERP-Software). Bundesfinanzministerium. < [https://www.giessen-berg.ihk.de/blob/giihk24/Geschaeftsbereiche/Recht\\_und\\_Steuern/Steuern/downloads/1826156/f011238508274facc5f4e71c3a10f8e0/Steuerliche\\_Beurteilung\\_von\\_Aufwendungen\\_fuer\\_ERP-Software-data.pdf](https://www.giessen-berg.ihk.de/blob/giihk24/Geschaeftsbereiche/Recht_und_Steuern/Steuern/downloads/1826156/f011238508274facc5f4e71c3a10f8e0/Steuerliche_Beurteilung_von_Aufwendungen_fuer_ERP-Software-data.pdf) > - 11.01. 2017.

- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ 2016  
Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Bekanntmachung des kalkulatorischen Zinssatzes nach §7 Absatz 4 Satz 1 der Allgemeinen Gebührenverordnung (AGebV). <[http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Gesetzestexte/gebuehrenrecht-kalkulatorischer-zinssatz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Gesetzestexte/gebuehrenrecht-kalkulatorischer-zinssatz.pdf?__blob=publicationFile)> - 11.01.2017.
- CANNY & GOLDBERG 1995  
Canny, J. F.; Goldberg, K. V.: A RISC approach to sensing and manipulation. *Journal of Field Robotics* 12 (1995) 6, S. 351-363.
- CARDAUN 1981  
Cardaun, U.: Systematische Auswahl von Greiferkonzepten für die Werkstückhandhabung. (Dissertation) Universität Hannover. Hannover (1981).
- CAUSEY & QUINN 1998  
Causey, G. C.; Quinn, R. D.: Gripper design guidelines for modular manufacturing. *Proceedings 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven , Belgium, 1998, S. 1453-1458.
- CAUSEY 1999  
Causey, G. C.: Elements of agility in manufacturing. (Dissertation) Case Western Reserve University. Cleveland (1999).
- CAUSEY 2003  
Causey, G.: Guidelines for the design of robotic gripping systems. *Assembly automation* 23 (2003) 1, S. 18-28.
- CECCARELLI 2004  
Ceccarelli, M.: Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2004. ISBN: 978-1-4020-1810-7. (International series on microprocessor-based and intelligent systems engineering 27).
- CHAKRABARTI ET AL. 2011  
Chakrabarti, A., Shea, K., Stone, R., Cagan, J., Campbell, M., Hernandez, N. V., Wood, K. L.: Computer-based design synthesis research: an overview. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11 (2011) 2, S. 021003-1–021003-10.
- CHEN 1982  
Chen, F. Y.: Force analysis and design considerations of grippers. *Industrial Robot: An International Journal* 9 (1982) 4, S. 243-249.
- CHOI & KOÇ 2006  
Choi, H.; Koç, M.: Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006) 12-13, S. 1350-1361.

CONTROZZI ET AL. 2014

Controzzi, M.; Cipriani, C.; Carrozza, M. C.: Design of Artificial Hands: A Review. In: Balasubramanian, R. et al. (Hrsg.): The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development. Cham: Springer International Publishing 2014, S. 219-246. ISBN: 978-3-319-03016-6. (Springer Tracts in Advanced Robotics).

CUADRADO ET AL. 2002

Cuadrado, J.; Naya, M. A.; Ceccarelli, M.; Carbone, G.: An optimum design procedure for two-finger grippers: a case of study. IFToMM Electronic Journal of Computational Kinematics 15403 (2002) 1.

CUTKOSKY 1989

Cutkosky, M. R.: On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. IEEE Transactions on Robotics and Automation 5 (1989) 3, S. 269-279.

DATTA & DEB 2011

Datta, R.; Deb, K.: Multi-objective design and analysis of robot gripper configurations using an evolutionary-classical approach. In: Lanzi, P. L. et al. (Hrsg.): Proceedings on the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation. Dublin, Ireland, 2011, S. 1843.

DER KONSTRUKTEUR 2016

Der Konstrukteur: Additive Fertigung macht es möglich. Individuell anpassbare Greifer für kollaborierende Roboter.

<<https://keosk.3dz.com/apps/#/html5/mag/HOQOhHnp3ANkl/page/52>> - 02.09.2016.

DIN 32563

DIN 32563, 21.020; 37.020: Fertigungsmittel für Mikrosysteme Klassifizierungssystem für Mikrobauteile. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2002.

DIN EN ISO 9409-2

DIN EN ISO 9409-2, 25.040.30: Industrieroboter Mechanische Schnittstellen Teil 2: Schäfte. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2003.

DIN EN ISO 8373

DIN EN ISO 8373, 25.040.30: Industrieroboter - Wörterbuch. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1996.

DINI & FAILLI 2000

Dini, G.; Failli, F.: Planning grasps for industrial robotized applications using neural networks. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 16 (2000) 6, S. 451-463.

DINI 1993

Dini, G.: A module for the automated planning of grasps in robotized assembly operations. CIRP Annals-Manufacturing Technology 42 (1993) 1, S. 1-4.

DOLL & HUBER 1988

Doll, T.; Huber, D.: Ein Expertensystem zur Auswahl von Greifern und Sensoren für Roboter Anwendungen. WIMPEL 1988, S. 142-156.

DRÖDER ET AL. 2016

Dröder, K.; Dietrich, F.; Löchte, C.; Hesselbach, J.: Model based design of process-specific handling tools for workpieces with many variants in shape and material. CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 1, S. 53-56.

DUDEN 2017A

Duden: "Auslegen" auf Duden online.

<<http://www.duden.de/node/746588/visions/1396718/view>> - 29.06.2017.

DUDEN 2017B

Duden: "Auswählen" auf Duden online.

<<http://www.duden.de/node/666080/visions/1379471/view>> - 29.06.2017.

EICHHORN & MERK 2016

Eichhorn, P.; Merk, J.: Das Prinzip Wirtschaftlichkeit. Basiswissen der Betriebswirtschaftslehre. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016. ISBN: 978-3-658-07829-4.

ELLEKILDE & PETERSEN 2006

Ellekilde, L.-P.; Petersen, H.: Design and Test of Object Aligning Grippers for Industrial Applications. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China, 2006, S. 5165-5170.

ERDMAN ET AL. 1988

Erdman, A. G.; Thompson, T.; Riley, D. R.: Type Selection of Robot and Gripper Kinematic Topology Using Expert Systems. In: Pham, D. T. (Hrsg.): Expert systems in engineering. Kempston, Bedford, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: IFS Publ.; Springer 1988, S. 324-333. ISBN: 0-948507-77-2. (Artificial intelligence in industry).

ESMAELIAN ET AL. 2016

Esmailian, B.; Behdad, S.; Wang, B.: The evolution and future of manufacturing: A review. Journal of Manufacturing Systems 39 (2016), S. 79-100.

FANTONI ET AL. 2012

Fantoni, G.; Gabelloni, D.; Tilli, J.: How to design new grippers by analogy. (Report) University of Pisa. Pisa (2012).

FANTONI ET AL. 2014A

Fantoni, G.; Capiferri, S.; Tilli, J.: Method for Supporting the Selection of Robot Grippers. Procedia CIRP 21 (2014), S. 330-335.

FANTONI ET AL. 2014B

Fantoni, G.; Santochi, M.; Dini, G.; Tracht, K.; Scholz-Reiter, B.; Fleischer, J.; Kristoffer Lien, T.; Seliger, G.; Reinhart, G.; Franke, J. Nørgaard Hansen, H.; Verl, A.: Grasping devices and methods in automated production processes. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63 (2014) 2, S. 679-701.

FELDMANN ET AL. 2014

Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. Handbuch der Fertigungstechnik. 2. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-42827-0.

FELSCH & HERKER 2010

Felsch, T.; Herker, C.: Automatic reconfiguration of flexible robot gripping system. Proceedings IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Bilbao, Spain, 2010, S. 1-4.

FERNANDEZ ET AL. 2006

Fernandez, C.; Reinoso, O.; Vicente, M. A.; Aracil, R.: Part grasping for automated disassembly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 30 (2006) 5-6, S. 540-553.

FESTO 2017

Festo: Festo Produktfinder. <[https://www.festo.com/cms/de\\_de/986.htm](https://www.festo.com/cms/de_de/986.htm)> - 07.06.2017.

FLEISCHER ET AL. 2013

Fleischer, J.; Ruprecht, E.; Haag, S.: Handhaben von Batteriezellen. wt Werkstattstechnik Online 103 (2013) 9, S. 644-648.

FRANK 1975

Frank, H.-E.: Handhabungseinrichtungen. Grundlagen, Übersicht, Beispiele. Mainz: Krausskopf 1975. ISBN: 3-7830-0101-3. (Buchreihe Produktionstechnik heute Bd. 13).

FRANZKOWIAK 2014

Franzkowiak, M.: Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung. (Dissertation) Technische Universität München (TUM). München (2014).

FREUNDT 2012

Freundt, M.: Einsetzbarkeit und Flexibilität hochpräziser Handhabungs- und Montagetechnik. (Dissertation) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen (2012).

FRITZ 2017

Fritz, F.: Ein Modell zur energetischen Analyse und Bewertung von Vakuum-Greifsystemen. (Dissertation) Universität Stuttgart. Stuttgart (2017).

FROMM & BIRK 2016

Fromm, T.; Birk, A.: Physics-Based Damage-Aware Manipulation Strategy Planning Using Scene Dynamics Anticipation. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, South Korea, 2016, S. 915-922.

GE ET AL. 2015

Ge, D.; Matsuno, T.; Sun, Y.; Ren, C.; Tang, Y.; Ma, S.: Quantitative study on the attachment and detachment of a passive suction cup. *Vacuum* 116 (2015) 116, S. 13-20.

GOLDFEDER ET AL. 2009

Goldfeder, C.; Ciocarlie, M.; Dang, H.; Allen, P. K.: The Columbia grasp database. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Kobe, Japan 2009, S. 1710-1716.

GORCE & FONTAINE 1996

Gorce, P.; Fontaine, J. G.: Design methodology approach for flexible grippers. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 15 (1996) 3, S. 307-328.

GÖTZ 1991

Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile. (Dissertation) Technische Universität München (TUM). München (1991).

GOURASHI 2003

Gourashi, N. S.: Knowledge-based conceptual design of robot grippers. (Dissertation) Cardiff University. Cardiff (2003).

GREBENSTEIN 2012

Grebenstein, M.: Approaching Human Performance – The Functionality Driven Awiwi Robot Hand. (Dissertation) ETH Zürich. Zürich (2012).

GRUBBA 2002

Grubba, M.-A.: Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifsystemen für Hohlkörper. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (2002).

GRUTZECK & KIESEWETTER 2002

Grutzeck, H.; Kieseewetter, L.: Downscaling of grippers for micro assembly. *Microsystem Technologies* 8 (2002) 1, S. 27-31.

GRUTZECK 2000

Grutzeck, H.: Fluidisches Greifen in der Mikrosystemtechnik. (Dissertation) Brandenburgische Technische Universität Cottbus. Cottbus (2000).

GUO ET AL. 2017

Guo, M.; Gealy, D. V.; Liang, J.; Mahler, J.; Goncalves, A.; McKinley, S.; Goldberg, K.: Design of parallel-jaw gripper tip surfaces for robust grasping. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore, 2017.

HASHEMI ET AL. 2014

Hashemi, H.; Shaharouna A.M.; Izman, S.; Ganjia B.; Namazianb Z.; Shojaeic S.: Fixture Design Automation and Optimization Techniques. *Review and Future Trends. International Journal of Engineering* 27 (2014) 11 (B).

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. (Dissertation) Leibniz Universität Hannover. Hannover (2007).

HEGINBOTHAM 1984

Heginbotham, Wilfred B.: Programmable assembly. Berlin: Springer 1984. ISBN: 3540134794. (International trends in manufacturing technology).

HEINRICH ET AL. 2015

Heinrich, B.; Glöckler, M.; Linke, P.: Grundlagen Automatisierung. Sensorik, Regelung, Steuerung. Wiesbaden: Springer 2015. ISBN: 978-3-658-05960-6.

HERZOG ET AL. 2014

Herzog, A.; Pastor, P.; Kalakrishnan, M.; Righetti, L.; Bohg, J.; Asfour, T.; Schaal, S.: Learning of grasp selection based on shape-templates. *Autonomous Robots* 36 (2014) 1-2, S. 51-65.

HESSE 2004

Hesse, S.: Robotergreifer. Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik. München, Wien: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22920-5.

HESSE 2011

Hesse, S.: Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42422-7.

HONARPARDAZ ET AL. 2016A

Honarpardaz, M.; Tarkian, M.; Ölvander, J.; Feng, X.; Sirkett, D.: Generic Automated Finger Design. *Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, ASME 2016. Charlotte, USA, 2016.

HONARPARDAZ ET AL. 2016B

Honarpardaz, M.; Tarkian, M.; Sirkett, D.; Ölvander, J.; Feng, X.; Elf, J.; Sjögren, R.: Generic Automated Multi-function Finger Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 157 (2016) 1.

HONARPARDAZ ET AL. 2017

Honarpardaz, M.; Tarkian, M.; Ölvander, J.; Feng, X.: Finger design automation for industrial robot grippers: A review. *Robotics and Autonomous Systems* 87 (2017), S. 104-119.

HÖRMANN & HÖRMANN 1990

Hörmann, A.; Hörmann, K.: Planung kollisionsfreier Greifoperationen: Analyse der Objektgeometrie. *Robotersysteme* 6 (1990) 1, S. 39-50.

HUISOON & CACAMBOURAS 1993

Huissoon, J. P.; Cacambouras, M.: Feature model-based grasp formulation. *International Journal of Production Research* 31 (1993) 2, S. 351-364.

HUTTEN 2007

Hutten, I. M.: Handbook of nonwoven filter media. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann 2007. ISBN: 978-1-85617-441-1.

IFR STATISTICAL DEPARTMENT 2016

World Robotics Industrial Robots Report 2016. IFR Statistical Department. 2016. ISBN: 978-3-8163-0693-1.

JOHNS ET AL. 2016

Johns, E.; Leutenegger, S.; Davison, A. J.: Deep Learning a Grasp Function for Grasping under Gripper Pose Uncertainty. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, South Korea, 2016, S. 4461-4468.

KAISER 2009

Kaiser, B.: Bildverarbeitung für ein generisches Entladesystem. (Dissertation) Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe (2009).

KARANDE & CHAKRABORTY 2013

Karande, P.; Chakraborty, S.: Material Handling Equipment Selection Using Weighted Utility Additive Theory. Journal of Industrial Engineering 2013.

KARPFINGER 2015

Karpfinger, C.: Höhere Mathematik in Rezepten. Begriffe, Sätze und zahlreiche Beispiele in kurzen Lerneinheiten. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-642-37866-9.

KAULINJA 1979

Kaulinja, Z.: Opredelenie konstruktivnykh parametrov vakuumnnykh schatov promyslennykh robotov (Bestimmung der Konstruktionsparameter von Vakuumm-greifern für Industrieroboter). Avtomatizacija sborocnykh provessov (1979), S. 47-54.

KOLLER 1998

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Berlin, Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 978-3-642-80418-2.

KÖHLER 2004

Köhler, M.: Beitrag zur Bestimmung des Coulomb'schen Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei metallischen Festkörpern. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (2004).

KRAFT ET AL. 2014

Kraft, D.; Ellekilde, L.-P.; Jørgensen, J. A.: Automatic Grasp Generation and Improvement for Industrial Bin-Picking. Springer Tracts in Advanced Robotics 94 (2014), S. 155-176.

KRENICH 2004

Krenich, S.: Multicriteria Design Optimization of Robot Gripper Mechanisms. In: Burczyński, T. et al. (Hrsg.): IUTAM Symposium on Evolutionary Methods in Mechanics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2004, S. 207-218. ISBN: 1-4020-2266-2. (Solid Mechanics and Its Applications).

KRISTENSEN ET AL. 2001

Kristensen, S.; Estable, S.; Kossow, M.; Brösel, R.: Bin-picking with a solid state range camera. *Robotics and Autonomous Systems* 35 (2001) 3-4, S. 143-151.

KUGELMANN 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. (Dissertation) Technische Universität München (TUM). München (1999).

KUMICÁKOVÁ 2009

Kumicáková, D.: Automation of the robot gripper choice on the base of the similarity principles. *Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology* 23 (2009), S. 105.

LANNI & CECCARELLI 2009

Lanni, C.; Ceccarelli, M.: An Optimization Problem Algorithm for Kinematic Design of Mechanisms for Two-Finger Grippers. *The Open Mechanical Engineering Journal* 3 (2009) 1, S. 49-62.

LAPERRIÈRE & REINHART 2014

Laperrière, L.; Reinhart, G.: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-642-20616-0.

LAUGIER & PERTIN 1983

Laugier, C.; Pertin, J.: Automatic Grasping: A case study in accessibility analysis. (Forschungsbericht). Institut National Polytechnique de Grenoble, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Grenoble (Januar 1983).

LAUGIER 1981

Laugier, C.: A program for automatic grasping of objects with a robot arm. In: Japan Industrial Robot Association (JIRA) (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Industrial Robots*. Tokyo 1981, S. 287-294.

LIU & HAMMELE 2002

Liu, X.; Hammele, W.: Die Entwicklung von Sauggreifern mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. *KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe* 55 (2002) 10, S. 529-534.

LIU ET AL. 2006

Liu, J.; Tanaka, K.; Bao, L. M.; Yamaura, I.: Analytical modelling of suction cups used for window-cleaning robots. *Vacuum* 80 (2006) 6, S. 593-598.

LÖFFLER 1984

Löffler, L.: *Der Ersatz für die obere Extremität. Die Entwicklung von den ersten Zeugnissen bis heute*. Stuttgart: Enke 1984. ISBN: 3432945914.

LOTTER & WIENDAHL 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-642-29060-2.

LUTZ 2012

Lutz, C.: Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte. (Dissertation) Technische Universität Wien. Wien (2012).

MADWED 1985

Madwed, A.: A New Gripper System to Handle Many Different Parts for Assembly by Robots. Conference Proceedings Robots 9. Detroit, USA, 1985, S. 83-96.

MANTRIOTA & MESSINA 2011

Mantriota, G.; Messina, A.: Theoretical and experimental study of the performance of flat suction cups in the presence of tangential loads. Mechanism and Machine Theory 46 (2011) 5, S. 607-617.

MANTRIOTA 2007A

Mantriota, G.: Optimal grasp of vacuum grippers with multiple suction cups. Mechanism and Machine Theory 42 (2007) 1, S. 18-33.

MANTRIOTA 2007B

Mantriota, G.: Theoretical model of the grasp with vacuum gripper. Mechanism and Machine Theory 42 (2007) 1, S. 2-17.

MATTHECK 2010

Mattheck, G. C.: Denkwerkzeuge nach der Natur. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie 2010. ISBN: 978-3-923704-73-6.

MEHLHORN ET AL. 2010

Mehlhorn, K.; Dietzfelbinger, M.; Sanders, P.: Algorithmen und Datenstrukturen. The Basic Toolbox. 1. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05471-6.

MICHAELIS 1982

Michaelis, D.: Rechnerunterstützte Konstruktion von Funktionssystemen zur flexiblen Handhabung rotationssymmetrischer Werkstücke. (Dissertation) Technische Universität Berlin. Berlin (1982).

MILLER & ALLEN 2004

Miller, A. T.; Allen, P. K.: GraspIt! A Versatile Simulator for Robotic Grasping. IEEE Robotics & Automation Magazine 11 (2004) 4, S. 110-122.

MIRHOSSEYNI & WEBB 2009

Mirhosseyni, S. H.; Webb, P.: A Hybrid Fuzzy Knowledge-Based Expert System and Genetic Algorithm for efficient selection and assignment of Material Handling Equipment. Expert Systems with Applications 36 (2009) 9, S. 11875-11887.

MONKMAN ET AL. 2007

Monkman, G. J.; Hesse, S.; Steinmann, R.; Schunk, H.: Robot grippers. Wiley InterScience (Online service). Weinheim, Chichester: Wiley-VCH 2007. ISBN: 978-3-527-40619-7.

MOULIANITIS ET AL. 1999

Moulianitis, V. C.; Dentsoras, A. J.; Aspragathos, N. A.: A knowledge-based system for the conceptual design of grippers for handling fabrics. *AI EDAM (Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing)* 13 (1999) 1, S. 13-25.

MOULIANITITS ET AL. 2000

Moulianitits, V. C.; Zoller, Z.; Zentay, P.; Aspragathos, N. A.; Arz, G.; Toth, A.: Knowledge-Aided Conceptual Design of Grippers for Handling Polyurethane Foam Parts. *Proceedings of the 9th International Conference on Machine Design and Production*. Ankara, Turkey, 2000.

MÜLLER 1997

Müller, J.: Entwicklung eines Expertensystems zur Auswahl von Greifern für Handhabungsaufgaben. (Dissertation). Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen (1997).

MÜLLER 2001

Müller, M.: Entnahmestrategien zur Objektvereinzelung mittels Industrierobotern. (Dissertation) Universität Karlsruhe. Karlsruhe (2001).

NAGEL ET AL. 2016

Nagel, M.; Giese, F.; Becker, R.: Flexible Gripper Design Through Additive Manufacturing. In: Reinhardt, D. et al. (Hrsg.): *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Cham: Springer International Publishing 2016, S. 455-459. ISBN: 978-3-319-26376-2.

NIEMANN ET AL. 2001

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: *Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. 3. Aufl.: Springer 2001. ISBN: 978-3-662-08521-9.

NOVOTNY & HORAK 2009

Novotny, F.; Horak, M.: Computer Modelling of Suction Cups Used for Window Cleaning Robot and Automatic Handling of Glass Sheets. *MM Science Journal* (2009) 463-464, S. 113-116.

NOVOTNÝ & HORÁK 2012

Novotný, F.; Horák, M.: Problems of Loading Capacity of Suction Cups in the Radial Direction. *Advanced Materials Research* 463-464 (2012), S. 1291-1294.

PARYANTO ET AL. 2015

Paryanto, P., Brossog, M., Bornschlegl, M., Franke, J.: Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 78 (2015) 5-8, S. 1315–1328.

PEDRAZZOLI ET AL. 2001

Pedrazzoli, P.; Rinaldi, R.; Boer, C. R.: A rule based approach to the gripper selection issue for the assembly process. *Proceedings of the 4th International Symposium on Assembly and Task Planning*. Fukuoka, Japan, 2001, S. 202-207.

PERTIN-TROCCAZ 1988

Pertin-Troccaz, J.: Geometric reasoning for grasping: a computational point of view. CAD based programming for sensory robots. Springer 1988, S. 397-423. ISBN: 3642836275.

PHAM & TACGIN 1991A

Pham, D. T.; Tacgin, E.: An expert system for generating contact configurations for robot gripper jaws. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Cardiff 1991, S. 239-244.

PHAM & TACGIN 1991B

Pham, D. T.; Tacgin, E.: DBGRIP: A learning expert system for detailed selection of robot grippers. The International Journal of Production Research 29 (1991) 8, S. 1549-1563.

PHAM & TACGIN 1992A

Pham, D. T.; Tacgin, E.: An expert system for selection of robot grippers. Expert Systems with Applications 5 (1992) 3, S. 289-300.

PHAM & TACGIN 1992B

Pham, D. T.; Tacgin, E.: Grippex: A hybrid expert system for selecting robot gripper types. International Journal of Machine Tools and Manufacture 32 (1992) 3, S. 349-360.

PHAM & YEO 1985

Pham, D. T.; Yeo, S. H.: Quasi-parallel grippers for the concentric handling of cylindrical workpieces. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1 (1985) 1, S. 95-120.

PHAM & YEO 1988A

Pham, D. T.; Yeo, S. H.: A knowledge-based system for robot gripper selection: criteria for choosing grippers and surfaces for gripping. International Journal of Machine Tools and Manufacture 28 (1988) 4, S. 301-313.

PHAM & YEO 1988B

Pham, D. T.; Yeo, S. H.: An Adaptive Knowledge-Based System for Selecting Robot Grippers. In: Pham, D. T. (Hrsg.): Expert systems in engineering. Kempston, Bedford, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: IFS Publ.; Springer 1988, S. 408-424. ISBN: 0-948507-77-2. (Artificial intelligence in industry).

PHAM & YEO 1991

Pham, D. T.; Yeo, S. H.: Strategies for gripper design and selection in robotic assembly. International Journal of Production Research 29 (1991) 2, S. 303-316.

PHAM ET AL. 2007

Pham, D. T.; Gourashi, N. S.; Eldukhri, E. E.: Automated configuration of gripper systems for assembly tasks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 221 (2007) 11, S. 1643-1649.

PINTO & GUPTA 2016

Pinto, L.; Gupta, A.: Supersizing self-supervision: Learning to grasp from 50K tries and 700 robot hours. Proceedings 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden, 2016, S. 3406-3413.

POPOV 2010

Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. 2. Aufl. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-13301-5.

PRESS & VETTERLING 1999

Press, W. H.; Vetterling, W. T.: Numerical recipes. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1999. ISBN: 0521431085.

PRZYBYLSKI 2013

Przybylski, M.: Greifplanung basierend auf Objektsymmetrieeigenschaften. (Dissertation) Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe (2013).

RADTKE 1991

Radtke, M.: Untersuchungen zur Dimensionierung von Sauggreifern. (Dissertation) Technische Universität Dresden. Dresden (1991).

REINHART & KURFER 2011

Reinhart, G.; Kurfer, J.: Handhaben in der Batteriefertigung. wt Werkstattstechnik Online 101 (2011) 9, S. 545-550.

REINHART 2009

Reinhart, G.: Innovative Handhabungstechnik – Trends und zukünftige Entwicklungen. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): Handhabungstechnik. Augsburg, 15. Juli.2009. München: Utz 2009, S. 1-18. ISBN: 978-3-89675-093-8. (Seminarberichte / iw, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften 93).

REINHART 2017

Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser Verlag 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

RIEDEL ET AL. 2008

Riedel, M.; Nefzi, M.; Hüsing, M.; Corves, B.: An adjustable gripper as a reconfigurable robot with a parallel structure. Proceedings of the Second International Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Montpellier, France, 2008.

ROBOMOTION GMBH 2017

Bildquelle robomotion GmbH 2017.

RÖHRDANZ 1997

Röhrdanz, F.: Modellbasierte automatisierte Greifplanung. (Dissertation) Technische Universität Braunschweig. Braunschweig (1997).

RUS & TOLLEY 2015

Rus, D.; Tolley, M. T.: Design, fabrication and control of soft robots. Nature 521 (2015) 7553, S. 467-475.

SAHBANI ET AL. 2012

Sahbani, A.; El-Khoury, S.; Bidaud, P.: An overview of 3D object grasp synthesis algorithms. *Robotics and Autonomous Systems* 60 (2012) 3, S. 326-336.

SARAVANAN ET AL. 2009

Saravanan, R.; Ramabalan, S.; Ebenezer, N.; Godwin, R.; Dharmaraja, C.: Evolutionary multi criteria design optimization of robot grippers. *Applied Soft Computing* 9 (2009) 1, S. 159-172.

SAYLER 2011

Sayler, S.: *Universelle Manipulationsstrategien für die industrielle Montage.* (Dissertation) Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe (2011).

SCHAAF & CHISU 2010

Schaaf, W.; Chisu, R.: Hochflexible, RFID-gesteuerte Handhabung von Stückgut. In: Günthner, W. A., ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intra-logistik.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, S. 319-333. ISBN: 978-3-642-04895-1..

SCHMALZ & REINHART 2014

Schmalz, J.; Reinhart, G.: Automated Selection and Dimensioning of Gripper Systems. *Procedia CIRP* 23 (2014), S. 212-216.

SCHMALZ 2017

Schmalz GmbH: Schmalz Auswahlhilfen.

<<https://www.schmalz.com/de/services/schmalzcom-tools-services/auswahlhilfen/>> - 07.06.2017.

SCHMALZ ET AL. 2015

Schmalz, J.; Kiefer, L.; Behncke, F.: Analysis of the System Handling using Methods of Structural Complexity Management. *Applied Mechanics & Materials* 794 (2015).

SCHMALZ ET AL. 2016

Schmalz, J.; Giering, L.; Hölzle, M.; Huber, N.; Reinhart, G.: Method for the Automated Dimensioning of Gripper Systems. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 239-244.

SCHMITT 2015

Schmitt, J.: *Untersuchungen zum Herstellungsprozess des Elektrode-Separator-Verbunds für Lithium-Ionen Batteriezellen.* (Dissertation) Technische Universität Braunschweig. Braunschweig (2015).

SCHOLZ-REITER ET AL. 2008

Scholz-Reiter, B.; Echelmeyer, W.; Wellbrock, E.: Development of a robot-based system for automated unloading of variable packages out of transport units and containers. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics.* Qingdao, China, 2008.

SCHRAFT & LEDERMANN 2003

Schraft, R. D.; Ledermann, T.: Intelligent picking of chaotically stored objects. *Assembly automation* 23 (2003) 1, S. 38-42.

SCHUH 2014

Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsmanagement*. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-54287-9. (Handbuch Produktion und Management 5).

SCHUNK 2017

Schunk GmbH: *Komponenten- und Ausstattungsfinder Greiftechnik*. <[http://de.schunk.com/de\\_de/startseite/equipped-by-schunk/#c24232](http://de.schunk.com/de_de/startseite/equipped-by-schunk/#c24232)> - 07.06.2017.

SCHWEIGERT 1992

Schweigert, U.: Noch nicht praxiserprobt. Greiferkonzepte für die automatisierte Montage. *Schweizer Maschinenmarkt* 17 (1992), S. 20.

SCHYJA & KUHNENKÖTTER 2015

Schyja, A.; Kuhnenkötter, B.: Realistic Simulation of Industrial Bin-Picking Systems. *Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*. Queenstown, New Zealand, 2015.

SCOTT 1985

Scott, P. B.: The 'Omnigripper'. A form of robot universal gripper. *Robotica* 3 (1985) 3, S. 153.

SDAHL 2006

Sdahl, M.: *Beitrag zum autonomen Dreipunkt-Sauggreifen*. (Dissertation) Universität Dortmund. Dortmund (2006).

SEEGRÄBER 1993

Seegräber, L.: *Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter. Grundlagen, Erfahrungen, Einsatzbeispiele*. Ehningen: Expert Verlag 1993. ISBN: 3-8169-0943-4. (Kontakt und Studium, Automatisierung 416).

SEVERIN 1987

Severin, F.: *Planung der Flexibilität von roboterintegrierten Bearbeitungs- und Montagezellen*. (Dissertation) Technische Universität Berlin. Berlin (1987).

SHILANE ET AL 2004.

Shilane, P.; Min, P.; Kazhdan, M.; Funkhouser, T.: The princeton shape benchmark. *Proceedings Shape Modeling Applications*, 2004. Genova, Italy, 2004, S. 167-388.

SHIN ET AL. 2012

Shin, D. H.; Jeong, C. P.; Park, T. S.; Kim, Y. G.; An, J. N.: Algorithm for the Extraction of Optimal Gripping Force Range with the Robot Gripper. *Applied Mechanics and Materials* 251 (2012), S. 164-168.

SIEMENS 1983

Siemens, K.-J.: Konstruktive Lösungswege zur Erhöhung der Flexibilität von Werkzeugen für Handhabungsgeräte. (Dissertation) Universität Hannover. Hannover (1983).

SINTOV & SHAPIRO 2015

Sintov, A.; Shapiro, A.: Automatic design algorithm of a robotic end-effector for a set of sheet-metal parts. Proceedings IEEE Conference of Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). Angkor Wat, 2015, S. 19-24.

SINTOV ET AL. 2016

Sintov, A.; Menassa, R. J.; Shapiro, A.: A gripper design algorithm for grasping a set of parts in manufacturing lines. Mechanism and Machine Theory 105 (2016), S. 1-30.

SMITH ET AL. 1999

Smith, G.; Lee, E.; Goldberg, K.; Bohringer, K.; Craig, J.: Computing parallel-jaw grips. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, USA, 1999, S. 1897-1903.

SPENRATH ET AL. 2012

Spenrath, F.; Spiller, A.; Verl, A.: Gripping Point Determination and Collision Prevention in a Bin-Picking application. Proceedings of the 7th German conference on robotics (Robotik 2012). Munich, Germany, 2012, S. 205-210.

STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) 2016

Statistisches Bundesamt (Destatis): Verdienste und Arbeitskosten. Arbeitnehmerverdienste – 1. Vierteljahr 2016. Fachserie 16 Reihe 2.1 - 1.

STEPHAN & SELIGER 1999

Stephan, J.; Seliger, G.: Handling with ice – the cryo-gripper, a new approach. Assembly automation 19 (1999) 4, S. 332-337.

STEPHAN 2001

Stephan, J.: Beitrag zum Greifen von Textilien. (Dissertation) Technische Universität Berlin. Berlin (2001).

STETTER 1994

Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobotereinsatzes. (Dissertation) Technische Universität München (TUM). München (1994).

STRASSER 2012

Strasser, G.: Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung. (Dissertation) Technische Universität München (TUM). München (2012).

TELLA ET AL. 1982

Tella, R.; Birk, J. R.; Kelley, R. B.: General Purpose Hands for Bin-Picking Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 12 (1982) 6, S. 828-837.

TIAN ET AL. 2017

Tian, N.; Matl, M.; Mahler, J.; Zhou, Y. X.; Staszak, S.; Correa, C.; Zheng, S.; Li, Q.; Zhang, R.; Goldberg, K.: A Cloud Robot System Accessing Learned Grasps from Dexterity Network 1.0 and Berkeley Robotics and Automation as a Service (Brass). Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, 2017.

TOMPKINS ET AL. 2010

Tompkins, J. A.; White, J. A.; Bozer, Y. A.; Tanchoco, J. M. A.: Facilities planning: John Wiley & Sons 2010. ISBN: 0470444045.

TRACHT ET AL. 2013

Tracht, K.; Hogreve, S.; Milczarek, A. M.; Skotartzak, T.; Eilts, T.: Mehrachsige Kraftsensorik in Greiffingern. Vergleich von Gestaltungsansätzen und Konzept zur Kraftregelung mit Standardgreifern. wt Werkstattstechnik online 9 (2013), S. 712-716.

VDI 2740

VDI 2740, 25.040.30: Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter. Berlin: Beuth Verlag 1995.

VDI 2860

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag 1995.

VDI 2861 Blatt 2

VDI 2861 Blatt 2: Montage- und Handhabungstechnik – Kenngrößen für Industrieroboter, Einsatzspezifische Kenngrößen. Berlin: Beuth Verlag 1995.

VDI 3405

VDI 3405, 25.020: Additive Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag 2014.

VELASCO 1997

Velasco, V. B.: A methodology for computer-assisted gripper customization using rapid prototyping technology. (Dissertation) Case Western University (1997).

VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU 2016

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Patrick Schwarzkopf): Deutsche Robotik und Automation erreicht Rekord-Umsatzvolumen von 12,2 Milliarden Euro. VDMA 2016.

VOLLMUTH 2016

Vollmuth, J.: Individuell anpassbarer MRK-Greifer aus generativer Fertigung. <<http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/individuell-anpassbarer-mrk-greifer-aus-generativer-fertigung-a-550891/>> - 07.06.2017.

VOSSEN ET AL. 2012

Vossen, G.; Haselmann, T.; Hoeren, T.: Cloud-Computing für Unternehmen. Technische wirtschaftliche rechtliche und organisatorische Aspekte. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag 2012. ISBN: 978-3-89864-808-0.

WALSH 1984

Walsh, S.: Gripper Design: Guidelines for Effective Results. Manufacturing Engineering 93 (1984) 5, S. 53-55.

WARNECKE & SCHMIDT 1980

Warnecke, H. J.; Schmidt, I.: Flexible grippers for handling systems design possibilities and experiences. International Journal of Production Research 18 (1980) 5, S. 525-537.

WARNECKE & SCHRAFT 1984

Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik. Mit ausführlichen Hersteller-Katalogen. Landsberg am Lech: Verl. Moderne Industrie 1984. ISBN: 3-478-41130-0.

WEBER 2009

Weber, W.: Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. 2. Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-41031-2.

WEEKS 1997

Weeks, J.: Entwicklung eines aufgabenorientierten Greif- und Bahnplanungssystems für die automatisierte Montage mit SCARA-Robotern. (Dissertation) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen (1997).

WEISS 1983

Weiss, K.: Entwicklung flexibler Ordnungssysteme für die Automatisierung der Werkstückhandhabung in der Klein- und Mittelserienfertigung. (Dissertation) Universität Stuttgart. Stuttgart (1983).

WEISSER 1979

Weisser, W.: Beitrag zur Steigerung der Flexibilität von Greif- und Spanneinrichtungen für rotationssymmetrische Werkstücke. Technische Universität Berlin. Berlin (1979).

WESTKÄMPER ET AL. 2013

Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-20258-2.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl. München, Wien: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43892-7.

WINGHAM 1977

Wingham, M. P.: Planning How to Grasp Objects in a Cluttered Environment. (Dissertation) University of Edinburgh. Edinburgh (1977).

WOLF & STEINMANN 2004

Wolf, A.; Steinmann, R.: Greifer in Bewegung. Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben. München: Hanser 2004. ISBN: 3-446-22932-9.

WOLF ET AL. 2016

Wolf, A.; Schunk, H. A.; Becker, R.: Greifer in Bewegung. Faszination der Automatisierung von Handhabungsprozessen. 2. Aufl. München: Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-44241-2.

WOLNIAKOWSKI ET AL. 2014

Wolniakowski, A.; Miatliuk, K.; Krüger, N.; Rytz, J. A.: Automatic Evaluation of Task-Focused Parallel Jaw Gripper Design. In: Brugali, D. et al. (Hrsg.): Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Cham: Springer International Publishing 2014, S. 450-461. ISBN: 978-3-319-11899-4. (Lecture Notes in Computer Science).

WOLNIAKOWSKI ET AL. 2015

Wolniakowski, A.; Jorgensen, J. A.; Miatliuk, K.; Petersen, H. G.; Kruger, N.: Task and context sensitive optimization of gripper design using dynamic grasp simulation. Proceedings 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Miedzyzdroje, Poland, 2015, S. 29-34.

WOLNIAKOWSKI ET AL. 2017

Wolniakowski, A.; Miatliuk, K.; Gosiewski, Z.; Bodenhagen, L.; Petersen, H. G.; Schwartz, L. C. M. W.; Jørgensen, J. A.; Ellekilde, L.-P.; Krüger, N.: Task and Context Sensitive Gripper Design Learning Using Dynamic Grasp Simulation. Journal of Intelligent & Robotic Systems 7 (2017) 4, S. 308-336.

WOLTER ET AL. 1985

Wolter, J. D.; Volz, R. A.; Woo, A. C.: Automatic generation of gripping positions. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) 15 (1985) 2, S. 204-213.

ZAKI ET AL. 2010

Zaki, A.; Soliman, A.; Mohgoub, O.; El-Safei, A.: Design and Implementation of Efficient Intelligent Robotic Gripper. Proceedings International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). Okayama, Japan, 2010, S. 710-716.

ZUMBRÄGEL 1990

Zumbrägel, J.: Flexible servopneumatische Greifersysteme für die Handhabungstechnik. (Dissertation) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen (1990).



## 12 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2012 bis 2017 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zur rechnergestützten Auslegung und Auswahl von Greifersystemen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r	Studienarbeit
Immler, Tobias	Konzeption und Aufbau einer Roboterzelle sowie eines Greifersystems zur Mischung von Flüssigkeiten und zur Handhabung von Lebensmitteln (iwb-Nr.: 2012/069-BT, Abgabe: 30.05.2013)
Kiefer, Lucas	Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifern – Systemerfassung & Verfahrensentwicklung (iwb-Nr.: 2013/014-MSA, Abgabe: 01.02.2014)
Wulf, Leonie	Analyse, Evaluation und modellbasierte Anwendung entscheidungsunterstützender Algorithmen auf den Auswahlprozess eines Greifsystems unter dem Fokus der Steigerung seiner Flexibilität. (iwb-Nr.: 2014/043-BT, Abgabe: 01.09.2014)
Hölzle, Matthias	Entwicklung und Implementierung einer Software zur Bestimmung von Greifpositionen (iwb-Nr.: 2014/034-MT, Abgabe: 01.10.2014)
Puccetti, Erika	Development of a method for the description of gripping processes (iwb-Nr.: 2014/22960-MT, Abgabe 31.03.2015)

<b>Studierende/r</b>	<b>Studienarbeit</b>
Huber, Niklas	Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Greiferauslegung sowie Optimierung unter Berücksichtigung formvarianter Bauteile (iwb-Nr.: 2014/23793, Abgabe: 04.05.2015)
Steinert, Johann	Flexibilisierung von Greifersystemen durch genetische Algorithmen (iwb-Nr.: 2015/28715, Abgabe 18.03.2016)
Giering, Lucas	Entwicklung und Implementierung einer Methode zur Greifkraftberechnung (iwb-Nr.: 2015/30483, Abgabe: 31.03.2016)
Ross, Vincent	Experimentelle Validierung einer Methode zur Auswahl und Auslegung von Greifersystemen unter Verwendung eines Bauteilreferenzspektrums (iwb-Nr.: 2015/29265, Abgabe: 31.03.2016)
Wokusch, Lorenz	Experimentelle Validierung einer computergestützten Methode zur Auswahl und Dimensionierung von Robotergreifern (iwb-Nr.: 2015/29614, Abgabe: 31.03.2016)
Nitzsche, Patrick	Entwicklung und Implementierung einer Software zur Optimierung der Zuordnung von Greifpositionen und Greiferarten hinsichtlich mehrerer Zielfunktionen (iwb-Nr.: 2015/30630, Abgabe: 29.04.2016)
Hastreiter, Jeremias	Entwicklung einer Methode zur Parametrisierung von Trägerstrukturen für Vakuumgreifer (iwb-Nr.: 2016/30622, Abgabe: 30.09.2016)
Schiele, Elena	Methode zur wirtschaftlichen Bewertung der automatisierten Auswahl und Auslegung von Robotergreifern (iwb-Nr.: 2016/35067, Abgabe: 15.01.2017)

---

<b>Studierende/r</b>	<b>Studienarbeit</b>
Gerhard, Nadine	Validierung und Optimierung eines Algorithmus zur Flexibilisierung von Greifersystemen (iwb-Nr.: 2016/33492, Abgabe: 30.03.2017)
Lechner, David	Experimentelle Validierung einer Methode zur automatischen Auswahl und Auslegung von Greifsystemen (iwb-Nr.: 2016/33493, Abgabe: 31.03.2017)
Giering, Lucas	Forschungspraktikum Munich School of Engineering
Walther, Paul	Forschungspraktikum Munich School of Engineering
Härtinger, Philipp	Interdisziplinäres Projekt im Masterstudiengang Informatik
Wandinger, Andreas	Interdisziplinäres Projekt im Masterstudiengang Informatik



## A Anhang

### A.1 Liste aller notwendigen Nutzereingaben

Für die Greifpositionsbestimmung

<b>Eingabeparameter</b>
Basisfläche
Sperrflächen
Tolerierte Krümmung zwischen Oberflächen
Tolerierte Krümmung für Kontaktflächen von Vakuumgreifern
Tolerierte Krümmung für Kontaktflächen mechanischer Greifer
Tolerierung der Abweichung der Parallelität von Kontaktflächen mechanischer Greifer
Art der Greifer, welche für die jeweilige Positionen generiert werden sollen
Position des Massenschwerpunkts des Handhabungsobjekts

Für die Auslegung

<b>Eingabeparameter</b>
Diskretisierung Größen Greifposition
Diskretisierung Winkel prismatischer Greifer
Masse des Handhabungsobjekts
Material des Handhabungsobjekts
Verschmutzung des Handhabungsobjekts (ja/nein)
Einsatzumgebung explosiv (ja/nein)
Einsatzumgebung Lebensmittel (ja/nein)
Einsatzumgebung korrosiv (ja/nein)
Temperatur der Einsatzumgebung
Temperatur des Handhabungsobjekts
Position des Massenschwerpunkts des HH-Objekts

E-Modul Handhabungsobjekt
Maximal zulässiger Kontaktdruck des HH-Objekts
Material der Greiferbacken
Externe Kräfte welche auf das Handhabungsobjekt wirken
Beschleunigungen des Handhabungsobjekts
Sicherheitsfaktor Hub
Absolute Ungenauigkeit des Handhabungsgerätes
Maximal verfügbare Druckdifferenz
Sicherheitsfaktor Greifkraftberechnung Vakuumgreifer
Sicherheitsfaktor Greifkraftberechnung mechanische Greifer
Flankenbreite prismatischer Greiferbacken
Zulässiges Biegemoment des Materials der Greiferbacken
Einsatzhöhe des Greifer über N.N.

Für die automatisierte Konstruktion von Vakuumgreifer-Grundkörpern

<b>Eingabeparameter</b>
Allgemeintoleranz
Maximale Krümmung der Vakuumleitungen
Innerer Radius der Vakuumleitungen
Äußerer Radius der Vakuumleitungen
Maximaler Strebenradius
Radius aller Streben, die innen im Trägersystem konstruiert sind
Radius aller Streben, die außen am Trägersystem liegen und keine Kreuzstreben sind
Radius aller Kreuzstreben, die außen am Trägersystem konstruiert sind

## A.2 Ausgabedaten der Greifpositionsbestimmung

Ausgabeparameter
Nummer der Greifposition
Greifpunkt
Art der Greifposition (Punkt-, Flächen oder Linienkontakt)
Normalenvektor der Greifposition im Greifpunkt
Länge und Breite der Greifposition
Maximale Krümmung der Greifposition
Radius für prismatische Greiferbacken
Winkel $\alpha$ für prismatische Greiferbacken
Wert des minimalen freien Volumens

## A.3 Liste Daten aus industrieller Datenbank

Für Auslegung

Benötigte Daten aus industrieller Datenbank
Verformungskoeffizient Vakuumsauger
Wirkungsgrad Vakuumsauger
E-Modul Vakuumsauger
Maximal zulässiger Kontaktdruck Vakuumsauger
Haftreibungskoeffizient Vakuumsauger
Zulässiger Temperaturbereich
Lebensmitteltauglichkeit
Breite der Dichtlippe
Geometrie der Backenschnittstelle
Greifkraft
Öffnungsweite
Öffnungswinkel
Flanschschnittstelle

Für automatisierte Konstruktion Vakuumsaugergrundkörper

<b>Eingabeparameter Vakuumsauger</b>
Anzahl der Schrauben der Flanschplatte
Radius des Lochkreises der Flanschplatte
Abstand zwischen den Schraubenpositionen der Flanschplatte und den Andockpunkten für die Streben
Höhe des Gewindeeinsatzes für die Schraubenaufnahmen unter der Flanschplatte
Radius des Gewindeeinsatzes für die Schraubenaufnahmen unter der Flanschplatte
Gesamthöhe des Saugers
Gewindelänge des Saugers
Hub des Saugers
Höhe des Gewindeeinsatzes für den Sauger
Radius des Gewindeeinsatzes für den Sauger
Höhe des Gewindeeinsatzes der Vakuumeinleitung
Radius des Gewindeeinsatzes der Vakuumeinleitung

## A.4 Dimensionsmatrizen

Runde Vakuumsauger

$D_{smax}$	$\Delta p_{min}$
$D_{s2}$	$\Delta p_2$
$D_{s3}$	$\Delta p_3$
$D_{smin}$	$\Delta p_{max}$

Ovale Vakuumsauger

	$L_{OSmax}$	$L_{OS2}$	$L_{OS3}$	$L_{OSmin}$
$B_{OSmax}$	$\Delta p_{min}$	$\Delta p_{12}$	$\Delta p_{13}$	$\Delta p_{14}$
$B_{OS2}$	$\Delta p_{21}$	$\Delta p_{22}$	x	x
$B_{OS3}$	$\Delta p_{31}$	x	x	x
$B_{OSmin}$	x	x	x	x

Prismatische Backen mechanischer Greifer

	$\beta_{max}$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{min}$
$B_{Bmax}$	$F_{G11}$	$F_{G12}$	$F_{G13}$	$F_{G14}$
$B_{B2}$	$F_{G21}$	$F_{G22}$	$F_{G23}$	x
$B_{B3}$	$F_{G31}$	x	x	x
$B_{Bmin}$	$F_{G41}$	x	x	x

	$\beta_{max}$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_{min}$
$B_{Bmax}$	$D_{V11}$	$D_{V12}$	$D_{V13}$	$D_{V14}$
$B_{B2}$	$D_{V21}$	$D_{V22}$	$D_{V23}$	x
$B_{B3}$	$D_{V31}$	x	x	x
$B_{Bmin}$	$D_{V41}$	x	x	x

**A.5 Berechnung Dichtkraft Vakuumbreifer**Rechteckige Sauger

$$F_D = - \int_{-B_S/2}^{B_S/2} q(x, y) dx \Big|_{y=-B_S/2} - \int_{-B_S/2}^{B_S/2} q(x, y) dx \Big|_{y=B_S/2} \\ - \int_{-L_S/2}^{L_S/2} q(x, y) dy \Big|_{x=-B_S/2} - \int_{-L_S/2}^{L_S/2} q(x, y) dy \Big|_{x=B_S/2}$$

### Runde Sauger

$$F_D = - \int_0^{2*\pi} q(r * \cos(\theta), r * \sin(\theta)) * rd\theta \Big|_{r=D_S}$$

### Ovale Sauger

$$\begin{aligned} F_D = & - \int_{-L_{OS}/2}^{L_{OS}/2} q(x, y) dy \Big|_{x=-\frac{B_{OS}}{2}} - \int_{-L_{OS}/2}^{L_{OS}/2} q(x, y) dy \Big|_{x=\frac{B_{OS}}{2}} \\ & - \int_0^{\pi} q(r * \cos(\theta), r * \sin(\theta) + L_{OS}/2) * rd\theta \Big|_{r=\frac{B_{OS}}{2}} \\ & - \int_{\pi}^{2*\pi} q(r * \cos(\theta), r * \sin(\theta) - L_{OS}/2) * rd\theta \Big|_{r=\frac{B_{OS}}{2}} \end{aligned}$$

## **A.6 Berechnung der Konstanten der Kontaktdruckverteilung**

### Rechteckige Sauger

$$a_{KS} = \frac{-6M_y^{(e)}}{B_S^2(3L_S + B_S)}$$

$$b_{KS} = \frac{6M_x^{(e)}}{L_S^2(L_S + 3B_S)}$$

Runde Sauger

$$a_{KS} = -\frac{M_y^{(e)}}{\pi * \left(\frac{D_S}{2}\right)^3}$$

$$b_{KS} = \frac{M_x^{(e)}}{\pi * \left(\frac{D_S}{2}\right)^3}$$

Ovale Sauger

$$a_{KS} = -\frac{M_y^{(e)}}{\left(\frac{B_{OS}}{2}\right)^2 * (2 * L_{OS} + \pi * \left(\frac{B_{OS}}{2}\right))}$$

$$b_{KS} = \frac{6 * M_x^{(e)}}{(6 * \pi * \left(\frac{B_{OS}}{2}\right)^3 + 24 * \left(\frac{B_{OS}}{2}\right)^2 * L_{OS} + 3 * \pi * \left(\frac{B_{OS}}{2}\right) * (L_{OS})^2 + L_{OS}^3)}$$

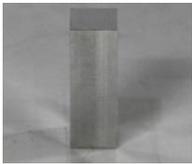
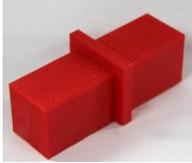
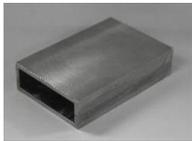
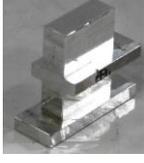
**A.7 Ausgabedaten der Auslegung**

Vakuumbreifer
Name des Handhabungsobjekts
ID der Greifposition
Position der Greifposition
Greifpunktnormale der Greifposition
Geometrische Größen des Vakuumsaugers (vgl. <i>Abschnitt 6.2</i> )
Benötigte Greifkraft
Benötigte Druckdifferenz
Lokale Kräfte
Lokale Momente

<b>Mechanische Greifer mit planen Backen</b>
Name des Handhabungsobjekts
ID der Greifposition
Position der Kontaktfläche 1
Greifpunktnormale der Kontaktfläche 1
Position der Kontaktfläche 2
Greifpunktnormale der Kontaktfläche 1
Geometrische Größen der Backen (vgl. <i>Abschnitt 6.2</i> )
Benötigte Greifkraft
Lokale Kräfte
Lokale Momente
Hub/Öffnungswinkel
Öffnungsweite

<b>Mechanische Greifer mit prismatischen Backen</b>
Name des Handhabungsobjekts
ID der Greifposition
Position der Kontaktlinie 1
Greifpunktnormale der Kontaktlinie 1
Position der Kontaktlinie 2
Greifpunktnormale der Kontaktlinie 2
Geometrische Größen der Backen (vgl. <i>Abschnitt 6.2</i> )
Benötigte Greifkraft
Lokale Kräfte
Lokale Momente
Hub/Öffnungswinkel
Öffnungsweite

## A.8 Für Erprobung verwendetes Handhabungsobjekt-Spektrum

Bezeichnung	Bild	Hauptabmessung	Material	Gewicht
Quaderteil 1		30 mm	Aluminium	0,007 kg
Quaderteil 2		100 mm	ABS	0,112 kg
Quaderteil 3		100 mm	ABS	0,203 kg
Quaderteil 4		30 mm	ABS	0,004 kg
Quaderteil 5		100 mm	Aluminium	0,154 kg
Quaderteil 6		100 mm	Aluminium	0,181 kg
Quaderteil 7		30 mm	ABS	0,003 kg
Quaderteil 8		30 mm	Aluminium	0,017 kg

Bezeichnung	Bild	Hauptabmessung	Material	Gewicht
Zylinderteil 1		30 mm	ABS	0,003 kg
Zylinderteil 2		100 mm	ABS	0,142 kg
Zylinderteil 3		100 mm	Aluminium	0,253 kg
Zylinderteil 4		30 mm	Aluminium	0,027 kg
Zylinderteil 5		30 mm	ABS	0,004 kg
Zylinderteil 6		30 mm	Aluminium	0,009 kg
Zylinderteil 7		100 mm	ABS	0,365 kg
Zylinderteil 8		100 mm	Aluminium	0,162 kg

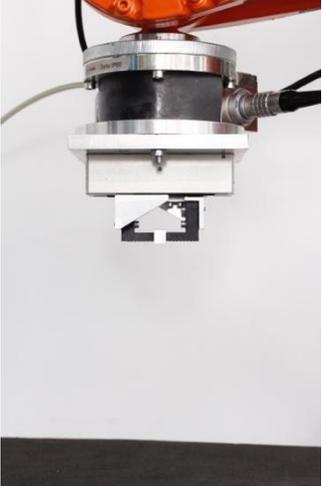
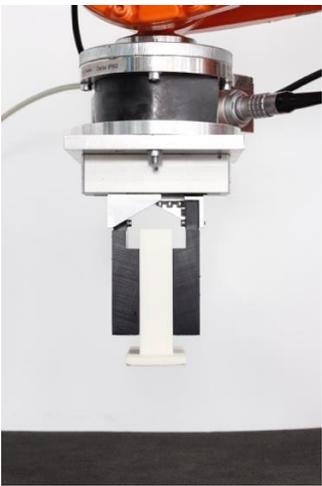
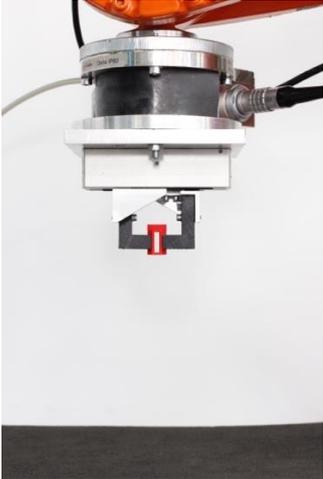
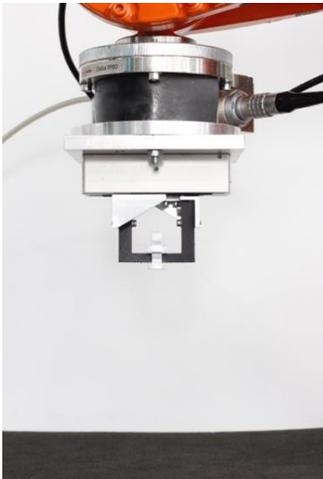
## A.9 Für Erprobung verwendete Komponenten

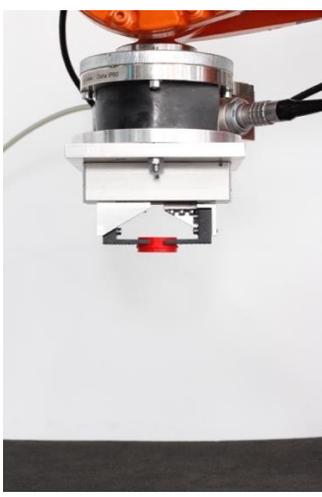
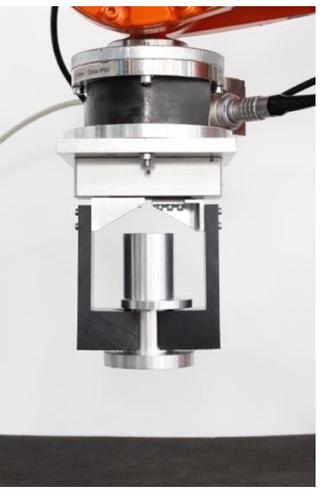
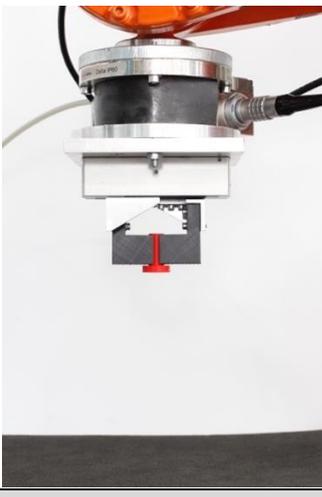
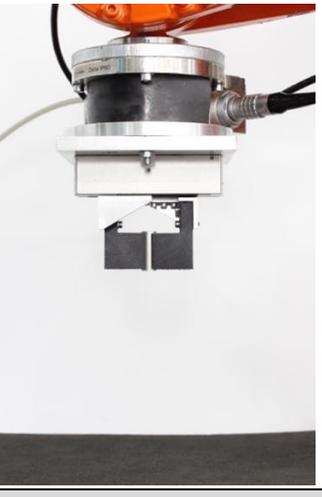
Komponente
Filterregelventil (Festo LFR-D)
Druckluftleitungen Durchmesser 6mm
Digitales Druckluft Messgerät CS Instruments DS300
Drucksensor Hydac HDA 4745-A-010-000
Unterdrucksensor Sensortechncs CTE7N01GY0
Venturi-Düse Schmalz SEG 07
Winkelgreifer Schunk SGB 50
Parallelgreifer Festo HGPL 14-40
Vakuumsauger Schmalz PFYN Serie und SGON Serie (NBR)
Vakuumsauger FEZER EP Serie (NBR)

**A.10 Für Erprobung verwendete Dateneingaben**

<b>Greifobjekt</b>	<b>Reibungskoeffizient Sauggreifer</b>	<b>Reibungskoeffizient mechanische Greifer</b>
Quaderteil 1	0,5	0,33
Quaderteil 2	0,5	0,25
Quaderteil 3	0,5	0,25
Quaderteil 4	0,5	0,25
Quaderteil 5	0,5	0,33
Quaderteil 6	0,5	0,33
Quaderteil 7	0,5	0,25
Quaderteil 8	0,5	0,33
Zylinderteil 1	0,5	0,25
Zylinderteil 2	0,5	0,25
Zylinderteil 3	0,5	0,33
Zylinderteil 4	0,5	0,33
Zylinderteil 5	0,5	0,25
Zylinderteil 6	0,5	0,33
Zylinderteil 7	0,5	0,25
Zylinderteil 8	0,5	0,33

**A.11 Versuche Handhabungsobjekt-Spektrum**

Quader 1	Quader 2	Quader 3
		
Quader 4	Quader 5	Quader 6
		
Quader 7	Quader 8	
		

<b>Zylinder 1</b>	<b>Zylinder 2</b>	<b>Zylinder 3</b>
		
<b>Zylinder 4</b>	<b>Zylinder 5</b>	<b>Zylinder 6</b>
		
<b>Zylinder 7</b>	<b>Zylinder 8</b>	
	