



342

Johannes Karl Bernhard Schmalz

Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen

Johannes Karl Bernhard Schmalz

**Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von
Greifersystemen**

utzverlag · München 2019

Forschungsberichte IWB
Band 342

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7492-3 Version: 1 vom 06.08.2019
Copyright© utzverlag 2019

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4768-2
Copyright© utzverlag 2019

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.

Johannes Karl Bernhard Schmalz

**Rechnergestützte Auslegung und Auswahl
von Greifersystemen**



Forschungsberichte IWB

Band 342

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2018

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2019

ISBN 978-3-8316-4768-2

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

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Vorwort

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

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Betreuung der Arbeit sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Beiden danke ich des Weiteren für die gute Zusammenarbeit am *iwb*. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, dem Institutsleiter des FAPS der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, gilt mein Dank für die Übernahme des Koreferats.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am Institut recht herzlich für die gute, oft humorvolle und kreative Atmosphäre. Besonders bedanke ich mich bei Dr. Julian Backhaus, Dr. Fabian Distel, Manuel Keßler und Matthias Hamann für die fachlichen Anregungen und kritische Durchsicht der Arbeit. Weiterer Dank gilt Dr. Markus Westermeier, Zeyad Mari, Conrad Fischbach, Dr. Philipp Schmidt, Andreas Ganser, André Heckert, Dr. Josef Greitemann, Nicolas Billot, Till Günther, Sebastian Pieczona sowie den Forschungsfeldern Batterieproduktion und Cyber-physische Montagesysteme. Einen herzlichen Dank auch an alle Service Center für die jahrelange Unterstützung. Allen Studierenden, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben, sei für Ihr Engagement gedankt.

Ein großer Dank gilt meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere meinen Eltern. Sie haben meine Ausbildung und somit auch die Erstellung dieser Arbeit immer wohlwollend gefördert und standen mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Der größte Dank geht jedoch an Anja Fischer, die mich insbesondere in den intensiven Phasen der Arbeit motiviert und unterstützt hat.

München, im November 2018

Johannes Schmalz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	VII
Glossar	XVII
1 Einleitung	1
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
2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse	5
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
3	Spezifikation des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs	45
3.1	Bedarfsanalyse	45
3.2	Technische Anforderungen	45
3.3	Methodische Anforderungen	47
4	Methode zur Auslegung und Auswahl von Greifersystemen	49
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
5	Analysephase	57
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

6	Synthesephase.....	69
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
7	Bewertungs- und Realisierungsphase.....	117
7.1	Bewertungsphase	117
7.2	Realisierungsphase	125
8	Erprobung der Vorgehensweisen	127
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
9	Bewertung.....	149
9.1	Technische Bewertung.....	149
9.2	Wirtschaftliche Bewertung	151
9.2.1	Randbedingungen und Szenario.....	152
9.2.2	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbewertung	153
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
10.1	Zusammenfassung	155
10.2	Weitere Forschungs- und Entwicklungspotentiale	156
11	Literaturverzeichnis	159
12	Studienarbeiten	181
A	Anhang.....	185
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.10Für 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 Greifpositionskoordinatensystem
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}_{wppv}	[m]	Öffnungsweite Parallelgreifer prismatische Backen
\ddot{O}_{wwi}	[m]	Öffnungsweite Winkelgreifer
\ddot{O}_{wvp}	[m]	Öffnungsweite Winkelgreifer plane Backen

Variable	Einheit	Bedeutung
\ddot{O}_{wvw}	[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 ³]	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 Vakuumsaugern
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