



Forschungsberichte · Band 67

**Berichte aus dem
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg



Franz Kugelmann

**Einsatz nachgiebiger Elemente
zur wirtschaftlichen Automatisierung
von Produktionssystemen**

Mit 76 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1993

Dipl.-Ing. Franz Kugelman
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), München

Dr.-Ing. J. Milberg
o. Professor an der Technischen Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), München

D 91

ISBN 978-3-540-57549-8 ISBN 978-3-662-06930-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-06930-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen der Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993.

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1993.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Hieronymus Buchreproduktions GmbH, München.

62/3020-543210

Geleitwort des Herausgebers

Die Verbesserung der Fertigungsmaschinen, der Fertigungsverfahren und der Fertigungsorganisation im Hinblick auf die Steigerung der Produktivität und die Verringerung der Fertigungskosten ist eine ständige Aufgabe der Produktionstechnik. Die Situation in der Produktionstechnik ist durch abnehmende Fertigungslosgrößen und zunehmende Personalkosten sowie durch eine unzureichende Nutzung der Produktionsanlagen geprägt. Neben den Forderungen nach einer Verbesserung von Mengenleistung und Arbeitsgenauigkeit gewinnt die Steigerung der Flexibilität von Fertigungsmaschinen und Fertigungsabläufen immer mehr an Bedeutung. In zunehmendem Maße werden Programme, Einrichtungen und Anlagen für rechnergestützte und flexibel automatisierte Produktionsabläufe entwickelt.

Ziel der Forschungsarbeiten am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München (iwb) ist die weitere Verbesserung der Fertigungsmittel und Fertigungsverfahren im Hinblick auf eine Optimierung der Arbeitsgenauigkeit und Mengenleistung der Fertigungssysteme. Dabei stehen Fragen der anforderungsgerechten Maschinenauslegung sowie der optimalen Prozeßführung im Vordergrund. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung fortgeschrittener Produktionsstrukturen und die Erarbeitung von Konzepten für die Automatisierung des Auftragsdurchlaufs. Das Ziel ist eine Integration der technischen Auftragsabwicklung von der Konstruktion bis zur Montage.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwb: Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen, Fertigungs- und Montageautomatisierung, Betriebsplanung sowie Steuerungstechnik und Informationsverarbeitung. In ihnen 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.

Joachim Milberg

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Milberg, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für seine wohlwollende Förderung und Unterstützung sowie für die wertvollen Hinweise zu dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die aufmerksame Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Anregungen.

Schließlich möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben, recht herzlich bedanken.

München, im August 1993

Franz Kugelmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Problemfelder beim Einsatz von Industrierobotern, Automatisierungshemmnisse	2
1.2.1	Technische Hemmnisse	2
1.2.2	Wirtschaftliche Hemmnisse	4
1.2.3	Resümee	6
1.3	Lösungsansätze: aktiver und passiver Toleranzausgleich	6
1.4	Stand der Technik	7
1.5	Ziele der Arbeit und Vorgehensweise	13
2	Grundlagen und Strukturierung komplienter Systeme	14
2.1	Einleitung	14
2.2	Grundlagen komplienter Systeme	14
2.2.1	Definition und Funktionsweise	14
2.2.2	Voraussetzungen für den Einsatz komplienter Systeme	15
2.2.3	Kräfte beim Bauteilkontakt	18
2.2.3.1	Einpunktkontakt	18
2.2.3.2	Zweipunktkontakt	19
2.2.3.3	Zusammenhang zwischen den Kräften am Bauteil und den Kräften im Toleranzausgleichssystem am Beispiel des RCC-Systems	20
2.2.4	Fasencharakteristik	21
2.2.5	Toleranzausgleichsgröße	22
2.3	Aufbau komplienter Systeme (Komponenten)	23

2.4	Strukturierung der Einsatzbereiche komplierter Systeme	25
2.4.1	Einfache Bewegungen	26
2.4.2	Komplexe Bewegungen	27
2.4.3	Ermittlung der Füge- und Führungsbewegung	27
2.5	Zielgrößen für den Einsatz komplierter Systeme	29
2.5.1	Passiver Toleranzausgleich bei einfachen Bewegungen	29
2.5.2	Bewegungsvereinfachung bei komplexen Bewegungen	30
2.5.2.1	Vergrößerung des Toleranzbereichs	31
2.5.2.2	Reduzierung von NC-Achsen	32
2.5.2.3	Rückführung komplexer Bewegungen auf elementare Grundbewegungen	32
2.6	Zusammenfassung	33
3	Konzeption komplierter Systeme	34
3.1	Einführung	34
3.2	Vorgehensweise bei der Konzeption komplierter Systeme	34
3.3	Analyse der Wirkflächen zwischen zwei Bauteilen	35
3.3.1	Bauteilspezifische Einflußgrößen	37
3.3.2	Werkzeugspezifische Einflußgrößen	38
3.4	Konzeption der Nachgiebigkeit	38
3.4.1	Nachgiebigkeit der Bauteilwirkflächen	39
3.4.2	Nachgiebigkeit der Werkzeugwirkflächen	39
3.4.3	Nachgiebigkeit in der Werkzeugaufhängung	39
3.4.4	Zielgrößen bei der Konzeption der Nachgiebigkeit	40
3.4.4.1	Ansprechverhalten	40
3.4.4.2	Berechenbarkeit, Vorspannung	40
3.4.4.3	Gewicht, Baugröße	41

3.4.5	Konstruktionskataloge	41
3.4.5.1	Kinematik	41
3.4.5.2	Nachgiebigkeitselemente	44
3.5	Vorgehensweise bei der Konstruktion eines kompletten Systems	47
3.5.1	Einführung	47
3.5.2	Lösungskatalog am Beispiel der Dichtschnurmontage	47
3.6	Zusammenfassung	49
4	Passiver Toleranzausgleich bei Bauteilen mit mehreren Fügstellen	51
4.1	Einführung	51
4.2	Analyse der Fehler bei Bauteilen mit mehreren Fügstellen	51
4.2.1	Analyse möglicher Fehlerlagen	51
4.2.2	Fehlergröße	53
4.2.3	Anforderung an den passiven Toleranzausgleich	54
4.3	Konzeption des Toleranzausgleichs bei Bauteilen mit mehreren Fügstellen	55
4.3.1	Zentrale und dezentrale Toleranzausgleichsstrategie	55
4.3.2	Ermittlung der Ausgleichsbewegungen	56
4.3.3	Toleranzausgleichsmodule für translatorische Ausgleichsbewegungen	58
4.3.3.1	Konzeption des Toleranzausgleichs am Festlager (Scherenmodul 2 D)	58
4.3.3.2	Konzeption des Toleranzausgleichs am Loslager (Scherenmodul 1 D und Translationsmodul)	61
4.3.3.3	Überblick der unterschiedlichen Toleranzausgleichsmodule	62
4.3.3.4	Konzeption des Toleranzausgleichs am Beispiel eines Bauteils mit 3 Fügstellen	63
4.3.4	Berechnung, Kennlinie	64

4.3.4.1	Scherenmodul	64
4.3.4.2	Vergleich zwischen RCC-System und Scherensystem	68
4.3.5	Toleranzausgleich der rotatorischen Fehler	71
4.4	Einsatz von Rechnerhilfsmitteln	72
4.4.1	Parametrierte Variantenkonstruktion mit Hilfe von CAD	72
4.4.1.1	Einführung	72
4.4.1.2	Rechnerunterstützte Konstruktion und Berechnung des Toleranzausgleichssystems	73
4.4.2	Einsatz der FE-Methode als Konstruktionshilfsmittel	74
4.4.2.1	Einführung	74
4.4.2.2	Vorgehensweise	75
4.4.2.3	Ergebnis	76
4.5	Applikationsbeispiel: Fügen von Dornleisten	77
4.5.1	Problemstellung	77
4.5.2	Konzeption des toleranzausgleichenden Greifwerkzeuges	78
4.6	Zusammenfassung	79
5	Einsatz komplierter Systeme bei komplexen Bewegungen	80
5.1	Einleitung	80
5.2	Problemstellung	80
5.3	Vergrößerung des Toleranzbereiches	82
5.3.1	Einführung	82
5.3.2	Einsatzbeispiel: Automatische Dichtschnurmontage	82
5.3.2.1	Problemstellung und Analyse der geometrischen Wirkflächen	82
5.3.2.2	Anforderungen an die kompliante Aufhängung der Einlegedüse	84
5.3.2.3	Konstruktion der kompliante Aufhängung der Einlegedüse	84

5.3.2.4	Zusammenfassung	86
5.4	Reduzierung von NC-Achsen	87
5.4.1	Einführung	87
5.4.2	Einsatzbeispiel: Entgraten von Zinn-Wismut-Kernen	87
5.4.2.1	Problemstellung und Analyse der geometrischen Randbedingungen	87
5.4.2.2	Konzeption des komplienten Entgratwerkzeuges	88
5.4.3	Einsatzbeispiel: Abdornen von Formschläuchen I	90
5.4.3.1	Problemstellung und Analyse der geometrischen Randbedingungen	90
5.4.3.2	Konzeption des komplienten Roboterabdornwerkzeuges	91
5.5	Rückführung komplexer Bewegungen auf elementare Bewegungen	93
5.5.1	Einführung	93
5.5.2	Einsatzbeispiel: Abdornen von Formschläuchen II	93
5.5.3	Einsatzbeispiel: Automatische Montage von Schnellbefestigungselementen mit komplexer Fügebewegung	95
5.5.3.1	Problemstellung und Analyse der Bauteilgeometrie sowie der Fügebewegung	95
5.5.3.2	Konzeption eines komplienten Fügeworkzeuges	97
5.5.3.3	Ergebnis des komplienten Fügeworkzeuges	99
5.6	Zusammenfassung	100
6	Wirtschaftlichkeitsanalyse komplienter Systeme	101
6.1	Einleitung	101
6.2	Analyse des Roboterhaltens	101
6.2.1	Versuchsreihe	102
6.2.2	Programmieraufwand	104
6.2.3	Bahngeschwindigkeit	105
6.2.4	Bahngenauigkeit	106
6.2.5	Resümee	108

6.3	Ermittlung der Kostensenkungspotentiale	108
6.3.1	Reduzierung des Programmieraufwandes	108
6.3.2	Reduzierung der Investitionskosten von Handhabungskomponenten	109
6.3.3	Reduzierung der Taktzeit	110
6.4	Erweiterte Kostenvergleichsrechnung	111
6.4.1	Übersicht über Investitionsrechnungsverfahren	111
6.4.2	Statische Kostenvergleichsrechnung	112
6.4.3	Berücksichtigung der Flexibilität bei flexiblen Montageanlagen	113
6.4.4	Kostenvergleichsrechnung unter Einbeziehung der Effekte komplizierter Systeme	114
6.4.4.1	Kostenrechnung mit EXCEL-Tabellenkalkulation	116
6.4.4.2	Einsatzbeispiel: Abdornen von Formschläuchen	117
6.4.4.3	Einsatzbeispiel: Klipmontage	119
6.4.4.4	Zielkonflikt beim Einsatz komplizierter Systeme	120
6.5	Nutzwertanalyse	120
6.5.1	Vorgehensweise	120
6.5.2	Zielkriterien und deren Gewichtung	121
6.5.3	Bestimmung der Nutzwerte	122
6.6	Zusammenfassung	124
7	Zusammenfassung	125
8	Literaturverzeichnis	127

Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen:	Dimension:	Bedeutung:
F	[N]	Kraft
F_N, F_{N1}, F_{N2}	[N]	Normalkraft
$F_{res}, F_{res1}, F_{res2}$	[N]	resultierende Kraft
F_R	[N]	Reibkraft
F_x	[N]	Kraft in x-Richtung
F_z	[N]	Kraft in z-Richtung
F_p	[N]	Druckkraft
F_{xA}	[N]	Kraft in x-Richtung an der Fügestelle A
F_{xB}	[N]	Kraft in x-Richtung an der Fügestelle B
F_{xges}	[N]	gesamte Kraft in x-Richtung
M	[Nm]	Moment
α	[°]	Fasewinkel
Θ	[°]	Winkelfehler
f	[mm]	Fasengröße
c	[N/mm]	Federkonstante
$\beta, \delta, \varphi, \varphi_0, \nu, \nu_0, \gamma$	[°]	Winkel
m	[kg]	Masse
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung

Zeichen:	Dimension	Bedeutung:
a, a ₁ , a ₂ , k, l, b, m	[mm]	Längen
ρ	[°]	Reibwinkel
μ	[-]	Reibungswert
x, y, z	[-]	Koordinatenrichtungen
E	[J]	Energie
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v _x	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
v _z	[m/s]	Geschwindigkeit in z-Richtung
v _{abs}	[m/s]	Absolutgeschwindigkeit
S		Schwerpunkt
CAD		Computer Aided Design
FEM		Finite Elemente Methode