



Forschungsberichte · Band 11

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

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



Herbert Diess

**Rechnerunterstützte Entwicklung
flexibel automatisierter
Montageprozesse**

Mit 56 Abbildungen

**Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH 1988**

Dipl.-Ing. Herbert Diess

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 978-3-540-18799-8

ISBN 978-3-662-09700-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-09700-7

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funk-
sendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Ver-
wendung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch
die „Verwertungsgesellschaft Wort“, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag 1988

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- oder Markenschutz-Gesetzgebung als
frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gesamtherstellung: Hieronymus Buchreproduktions GmbH, München
2362/3020-543210

Geleitwort des Herausgebers

Die Verbesserung der Fertigungsmaschinen, der Fertigungsverfahren und der Fertigungsorganisation zur Steigerung der Produktivität und 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 der Mengenleistung und der Arbeitsgenauigkeit gewinnt die Steigerung der Flexibilität von Fertigungs-maschinen 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, Fertigungsautomatisierung und Montageautomatisierung. 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 Professor Dr.-Ing. J. Milberg, dem Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die Anregungen sowie für seine wohlwollende Unterstützung und großzügige Förderung, die zum Gelingen dieser Arbeit entscheidend beigetragen haben.

Ebenso möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Drs. h. c. G. Spur, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Berlin (IWF) und des Fraunhoferinstituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) für die aufmerksame Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Anregungen danken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts und den Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, bedanken.

München, im Oktober 1987

Herbert Diess

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	7
1. Einleitung, Situationsanalyse und Zielsetzung	7
1.1 Einleitung	7
1.2 Stand der Forschung	8
1.3 Ziel der Arbeit	11
1.4 Gang der Untersuchungen	12
2. Analyse der Automatisierungsaufgabe	13
2.1 Begriffe	13
2.2 Strukturierung der Automatisierungsaufgabe	14
2.3 Aufgabenbeispiel Profildichtungsmontage	17
2.3.1 Aufgabenstellung	17
2.3.2 Vorgehen	18
2.3.3 Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	19
2.3.4 Layoutplanung	23
2.4 Erkenntnisse aus der Aufgabenanalyse	25
2.5 Anforderungen an eine verbesserte Prozeßentwicklung, Voraussetzungen für eine verbesserte Prozeßentwicklung	26
2.6 Ansatz für eine verbesserte Prozeßentwicklung	27
3. Modellbildung für den Fügeprozeß	29
3.1 Zielsetzung	29
3.2 Begriffe	29
3.3 Der Fügeprozeß	30
3.3.1 Definition	30

3.3.2	Einflußgrößen	32
3.3.3	Zielgrößen	32
3.4	Modellbildungen	33
3.4.1	Möglichkeiten der Modellbildung	33
3.4.2	Simulationsmodell	35
3.4.3	Experimentelles Modell	37
3.5	Parametrisierung der Modelle	37
3.5.1	Anforderungen	37
3.5.2	Parametrisierung des Simulationsmodells	37
3.5.3	Parametrisierung des experimentellen Modells	39
3.6	Zusammenfassung zur Modellbildung	39
4.	Optimierungsverfahren	41
4.1	Zielsetzung	41
4.2	Beschreibung der Optimierungsaufgabe	41
4.3	Klassifizierung numerischer Optimierungsverfahren	42
4.4	Formulierung der Optimierungsaufgabe als Vektoroptimierungsproblem	43
4.4.1	Definition des Optimums	43
4.4.2	Randbedingungen	45
4.4.3	Gewinnung der Zielfunktion	45
4.5	Anforderungen an numerische Optimierungsverfahren für allgemeine nichtlineare Optimierungsprobleme	47
4.6	Vorgehensweise bei der Verfahrensauswahl	48
4.7	Verfahren mit zufälliger Suche	49
4.8	Verfahren der eindimensionalen Optimierung	50
4.8.1	Bedeutung und Einteilung univarianter Methoden	50
4.8.2	Verfahren der schrittweisen Reduzierung des Intervalls, das ein Minimum enthält	51
4.8.3	Verfahren der schrittweise verbesserten Annäherung an den Ort des Minimums	52

4.8.4	Auswahl univarianter Verfahren	54
4.9	Direkte Suchverfahren	54
4.9.1	Sukzessive Optimierung der einzelnen Variablen	54
4.9.2	Simplex-Methode	55
4.9.3	Rosenbrock-Verfahren der rotierenden Koordinaten	57
4.9.4	Verfahren der konjugierten Richtungen von Powell	59
4.9.5	Auswahl direkter Suchverfahren	61
4.10	Gradienten-Methoden	61
4.11	Berücksichtigung von Randbedingungen	64
4.11.1	Auftretende Randbedingungen	64
4.11.2	Direkte Methoden	65
4.11.3	Indirekte Methoden	66
4.11.4	Auswahl von Verfahren zur Berücksichtigung von Randbedingungen	64
4.12	Fehlertolerante Suchstrategien	68
4.13	Suche des globalen Minimums	71
4.14	Verfahrensauswahl	72
5.	Konzept einer Entwicklungsumgebung für automatische Montageprozesse	75
5.1	Zielsetzung	75
5.2	Rechnerstruktur	75
5.3	Entwicklungsmethoden	77
5.3.1	Anforderungen	77
5.3.2	Berücksichtigung der Grenzen	78
5.3.3	Implementierte Algorithmen	78
5.4	Entwicklungsmodelle	82
5.4.1	Anforderungen	82
5.4.2	Finite-Elemente-Modell	83
5.4.3	Experimentelles Modell	84

6. Entwicklung von optimalen Montageprozessen am Beispiel einer Schlauchverbindung	88
6.1 Situationsanalyse	88
6.2 Optimierung der Fügebewegung	89
6.2.1 Zielsetzung	89
6.2.2 Experimenteller Aufbau	92
6.2.3 Parametrisierung der Fügebewegung	93
6.2.4 Aufgaben des Steuerungsrechners	98
6.2.5 Aufgaben des externen Prozeßrechners	99
6.2.6 Vorversuche	101
6.2.7 Experimentelle Optimierungszyklen	105
6.3 Entwicklung einer montagegerechten Verbindung	115
6.3.1 Zielsetzung	115
6.3.2 Finite-Elemente-Modell	115
6.3.3 Parametrisierung der Gestalt	121
6.3.4 Finite-Elemente-Optimierung	123
7. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse, weitere Entwicklungsziele	126
7.1 Diskussion der Modelle	126
7.2 Diskussion der Optimierungsverfahren	127
7.3 Diskussion der Entwicklungsumgebung	129
7.4 Diskussion des methodischen Ansatzes	130
8. Zusammenfassung	130
Literatur	132

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Dimension	Bedeutung
\underline{b}		Gradientenvektor
$c_1, c_2,$	$[N/mm^2]$	Mooney–Rivlin–Konstanten
\underline{d}		Verschiebungsvektor
$dz_1/dx_1, dz_1/dy_1$		Anfangssteigungen einer räumlichen Spline–Funktion
D		Suchraum des Optimierungsproblems
eps		Konvergenzschranken
E	$[N/mm^2]$	Elastizitätsmodul
$F_x, F_y, F_z,$	$[N]$	Zeitabhängige Komponenten der Fügekraft
$F_{xmax}, F_{ymax}, F_{zmax}$	$[Nmm]$	Maximalwerte der Kraftkomponenten eines Fügeversuches
$F_{xmit}, F_{ymit}, F_{zmit}$	$[Nmm]$	Mittelwerte der Kraftkomponenten eines Fügeversuches
$\underline{F}(\underline{x})$		Zielfunktion
$G_i(\underline{x})$		Grenzfunktionen
\underline{H}		Hesse–Matrix
I_1, I_2		Invarianten des Verzerrungstensors
\underline{K}		Gesamtsteifigkeitsmatrix eines Systems
\underline{m}		Punkt im Parameterraum
$M_x, M_y, M_z,$	$[Nmm]$	Zeitabhängige Komponenten des Fügemomentes
$M_{xmax}, M_{ymax}, M_{zmax}$	$[Nmm]$	Maximalwerte der Momentenkomponenten eines Fügeversuches
$M_{xmit}, M_{ymit}, M_{zmit}$	$[Nmm]$	Mittelwerte der Momentenkomponenten eines Fügeversuches
n		Laufvariable des Experiments

O, A, T	[Grad]	Winkel der Werkzeugorientierung des Industrieroboters
P_1, \dots, P_4		Raumpunkte, die eine Spline-Funktion festlegen
P	[Grad]	Winkel zur Berechnung von Interpolationspunkten einer Kreisbahn
p	[mm]	Positionierfehler zu Beginn des Fügevorganges
R	[Grad]	Rotationswinkel, der einer Bewegungsbahn überlagert ist
\underline{R}		Äußerer Lastvektor
\underline{s}		Suchrichtungsvektor
t	[s]	Fügezeit
U		Begrenztes Gebiet im Suchraum D, Umgebung eines lokalen Minimums
v	[mm/s]	Bahngeschwindigkeit
w_i		Wichtungsfaktoren
W		Formänderungsenergie
x_2, x_3	[mm]	Ordinaten definierender Punkte einer räumlichen Spline-Funktion
\underline{x}		Vektor der Einflußparameter
y_2, y_3	[mm]	Abszissen definierender Punkte einer räumlichen Spline-Funktion
Z		Zielgröße
z_i		Teilziele
v		Querkontraktionszahl
δ	[N/mm ²]	Normalspannung