



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Dr.-Ing. Christian Munzinger
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 153

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Martin Kipfmüller

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:
Hauptreferent:
Korreferent:

12. November 2009
Prof. Jürgen Fleischer
Prof. Christian Brecher

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.

Zagl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8764-1

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Dr.-Ing. Christian Munzinger
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe (TH).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer danke ich für die Übernahme des Hauptreferates und die Möglichkeiten der beruflichen und persönlichen Weiterentwicklung, die mir er durch die Mitarbeit am Institut gegeben hat.

Herrn Prof. Dr. Christian Brecher für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferates.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Kollegen, die diese Arbeit nicht nur in zahlreichen fachlichen Diskussionen und durch wertvolle Hinweise beim Korrekturlesen bereichert haben, sondern auch dadurch, dass stets eine angenehme Arbeitsatmosphäre am Institut geherrscht hat.

Außerdem bin ich meinen Hiwis, Studien- und Diplomarbeitern zu großem Dank verpflichtet. Ihre teilweise jahrelange Unterstützung hat ganz wesentlich zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt aber auch meinen Freunden, dem Club und meiner Familie. Sie haben mir während meiner Zeit am Institut den nötigen Rückhalt geboten, um auch die anstrengenden Zeiten auf dem Weg zur Promotion zu überstehen.

Karlsruhe, 29. November 2009

Martin Kipfmüller

Abstract

The number of machine tool manufacturers making active use of simulation is yet limited, as only few of them expect the benefit of simulation tools to outweigh cost and time required for their introduction. As a consequence, the potentials offered by parallel machine kinematics, whose properties can hardly be assessed without the use of calculation tools, are only rarely exploited.

This thesis focuses on the development of a method meant to provide efficient support for the machine tool engineering processes by simulation. The method is specifically geared to the requirements of parallel kinematics, as the use of simulation in this particular field is especially promising in terms of impact and benefit.

First of all, the requirements of the development process for parallel machine tools are analyzed to set up target parameters for simulation in each individual development stage. In the next step, a value benefit analysis is performed to identify those simulation approaches which are most suitable to reach the targets previously defined in the most efficient way possible. In addition, requirements for a continuously applied modeling environment are discussed. The method is rendered efficient because the simulation models used for each stage of the development process are only modeled and simulated with the minimum extent of time and effort required to turn them into a useful tool to support the decision-making process in construction-related matters. Besides, redundant modeling with differing degrees of detail or for different software systems and the extra work it implies is avoided by the continuous use of an adaptable simulation model.

Finally, the implementation of the simulation techniques required is described, and the resulting strategies for the systematic identification of related model parameters are defined.

The descriptive summary of the method is followed by validation performed at two sample machines.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Simulation	4
2.2 Simulation mechanischer Systeme	5
2.2.1 Finite Elemente Methode (FEM)	6
2.2.2 Mehrkörpersimulation (MKS)	7
2.3 Simulation mechatronischer Systeme	9
3 Stand der Forschung und Technik	11
3.1 Simulation von Werkzeugmaschinen	11
3.2 Bestimmung der Modellparameter	13
3.3 Arbeiten zur Beurteilung von Simulation	16
3.4 Vorgehensmodelle und Entwicklungsmethoden	19
3.4.1 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung	19
3.4.2 Entwicklung parallelkinematischer Werkzeugmaschinen	23
3.5 Handlungsbedarf	27
4 Zielsetzung und Vorgehensweise	28
4.1 Zielsetzung	28
4.2 Vorgehensweise	29
5 Konzeption der aufwandsoptimierten Simulationsmethode	31
5.1 Analyse des Entwicklungsprozesses von Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik	31
5.2 Vergleich verschiedener Simulationsansätze	36
5.3 Bewertung der Simulationsansätze	38
5.3.1 Konzeptphase	38
5.3.2 Entwurfsphase	39
5.3.3 Ausarbeitung Mechanik	40
5.3.4 Ausarbeitung Mechatronik	42
5.3.5 Versuch und Erprobung	43
5.3.6 Nutzwertanalyse	43

5.4	Geeignete Kombination der Simulationsansätze	47
5.5	Struktur des Simulationsmodells	51
5.6	Eingangsparameter in die Simulation	53
6	Ausarbeitung der Methode der aufwandsoptimierten Simulation	57
6.1	Kinematiksimulation	57
6.1.1	Inverse Kinematik, Jacobimatrix	57
6.1.2	Direkte Kinematik	60
6.1.3	Simulation der Geometrie der Struktur	64
6.2	Dynamische Simulation	68
6.2.1	Grundsätzliches Vorgehen	68
6.2.2	Rheologische Modelle zur Gelenkmodellierung	73
6.2.3	Modellerstellung	75
6.3	Integration flexibler Körper	76
6.3.1	Grundsätzliche Idee der modalen Reduktion	77
6.3.2	Analytischer Ansatz zur modalen Reduktion der Streben	78
6.3.3	Die Craig-Bampton Methode	83
6.4	Vorschubachsen und Regelungsimulation	85
6.4.1	Elektromotor mit Kugelgewindetrieb	85
6.4.2	Lineardirektantrieb	87
6.5	Bestimmung von Parametern	88
6.5.1	Parameter der Körper	89
6.5.2	Modellierungstechniken für Lager- und Fügestellen	89
6.5.3	Aufstellelemente	97
6.5.4	Parameter der Vorschubachsen	98
6.5.5	Einsetzen der Parameter in das Modell	99
6.5.6	Einfluss der Parameter auf die Ergebnisgenauigkeit	102
7	Zusammenfassende Darstellung der entwickelten Methode	106
8	Anwendung und Bewertung der Simulationsmethode	111
8.1	Beispielmaschinen	111
8.2	Konzeptphase	112
8.3	Entwurfsphase	115
8.3.1	Auslegungsrechnungen	115
8.3.2	Korrelationsanalyse	118
8.3.3	Parameterstudien	121

8.4	Ausarbeitung Mechanik	124
8.5	Ausarbeitung Mechatronik	131
8.6	Versuch und Erprobung	135
8.7	Abschließende Bewertung	137
9	Zusammenfassung und Ausblick	140
9.1	Zusammenfassung	140
9.2	Ausblick	142
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	XVI
	Anhang A – Grundlagen aus der Mathematik und Mechanik	XVIII
	Anhang B – Ergänzende Betrachtungen	XXVI

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Fläche	[m ²]
\underline{A}	Rotationsmatrix	-
c	Dämpfungsfaktor	[Ns/m]
D	Durchmesser	m
D _(Lehr)	Lehrsches Dämpfungsmaß	-
e	Euler-Zahl	-
\vec{e}	Einheitsvektor	[m]
E	Elastizitätsmodul	[N/m ²]
f	Frequenz	[Hz]
f(..)	Funktion	-
F, \vec{F}	Kraft	[N]
G	Übertragungsfunktion	-
I	Flächenträgheitsmoment	[m ⁴]
i	Strom	[A]
\underline{I}	Massenträgheitsmoment	[kg*m ²]
\underline{J}	Jacobimatrix	[m/s]
K _V	Verstärkungsfaktor Lageregler	[1/s]
\underline{K}	Steifigkeitsmatrix	[N/m]
k	Steifigkeit	[N/m]
l	Länge	[m]
m	Masse	[kg]
\underline{M}	Massenmatrix	[kg]
p	zu optimierende Parameter	-
q	Variable bei der Optimierung	-

$q(t)$	Zeitfunktion bei modaler Reduktion	[s]
Q	Quaternion	-
\vec{r}	Ortsvektor	[m]
s	Variable im Laplacebereich	-
S	Kostenfunktion	-
t	Zeit	[s]
\vec{u} bzw. u, v	Gelenkkoordinaten	[m]
w(x,t)	Balkendurchbiegung	[m]
\vec{x} bzw. x, y, z	Endeffektorkoordinaten	[m]
δ	Einfederung	[m]
ε	Maximal zugelassener Fehler, Dehnung	-
λ	Eigenwert	-
$\underline{\lambda}$	Dämpfungsfaktor	-
μ	Massenverteilung	[kg/m]
μ	Mittelwert	-
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ	Korrelationskoeffizient	-
σ	Standardabweichung	-
$\phi(x)$	Eigenformen	-
ω	Eigenkreisfrequenz	[rad/s]
$\dot{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
$\partial(\dots)$	Partielle Ableitung	-
∇	Gradient	-
$\overrightarrow{(\dots)}$	Vektor	-
(\dots)	Matrix	-
(\dots)	Ableitung nach der Zeit	-

$(...)^{\prime}$	Ableitung nach dem Ort	-
$(...)^T$	Transponiert	-

Abkürzungen	Größe
FEM	Finite Elemente Methode
Dgl.	Differentialgleichung
KGT	Kugelgewindetrieb
MKS	Mehrkörpersimulation
PKM	Parallel-Kinematik-Maschine
TCP	Werkzeugmittelpunkt (Tool Center Point)