



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)

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

Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung  
eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur  
produktflexiblen Bearbeitung räumlich  
gekrümmter Strangpressprofile**

Band 149



Universität Karlsruhe (TH)  
Forschungsuniversität • gegründet 1825

### **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 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8278-3

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# **Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig  
aus Essen

Tag der mündlichen Prüfung:  
Hauptreferent:  
Korreferent:

03. April 2009  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Albert Albers





## **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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats, die Förderung meiner wissenschaftlichen Vorhaben und für das Vertrauen in meine Arbeit am wbk. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Albers für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld für den Prüfungsvorsitz und die spontane Terminzusage. Der aktuellen Leitung des Instituts, Herrn Dr.-Ing. Christian Munzinger, Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze möchte ich für die fachliche und persönliche Unterstützung meinen Dank aussprechen.

Meine Zeit am wbk war durch eine diskussionsfreudige und anregende aber auch sehr freundschaftliche Arbeitsatmosphäre geprägt. Hierfür möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts herzlich danken. Ich freue mich über die Freundschaften, die während meiner Zeit am wbk entstanden sind und sicherlich auch zukünftig bestehen bleiben werden. Besonderes danke ich meinen Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich SFB/TR10 sowie meinen studentischen Hilfskräften und Diplomanden für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

Mein größter Dank geht an meine Familie, insbesondere an meine Eltern, die während Promotionszeit und Studium große seelische und finanzielle Unterstützung geleistet haben. Nicht zuletzt danke ich Katharina für ihren Rückhalt und ihre Geduld mit einem manchmal auch weniger gut gelaunten Freund sowie erholsame forschungsfreie Wochenenden.

Essen, im April 2009

Jan Philipp Schmidt-Ewig





## **Abstract**

The importance of rigid and self supporting space frame structures for the automotive and aerospace industry continually increases. To meet the market requirements for a flexible and competitive small batch production, innovative machine concepts must be investigated.

In order to reach this aim, a methodical approach is presented which helps to identify an adequate kinematic structure for a given specification. On this basis, an innovative machine concept for the machining of curved extrusions is developed. A prototype of the machine is described which combines a four-axes parallel kinematics with an articulated robot. The two kinematic structures collaborate and allow the processing of the work pieces with a reduced technical effort.

The function of the prototype is proven in machining experiments. The comparison with current machines shows that the new concept has a high potential for an economic production of space frame structures.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Produktion von Rahmenstrukturen	4
2.1.1 Herstellung gekrümmter Profilbauteile	5
2.1.2 Bearbeitung gekrümmter Profilbauteile	6
2.2 Kinematische Systeme	9
2.2.1 Kinematik eines Körpers	10
2.2.2 Kinematische Ketten	12
2.2.3 Direkte Kinematik	15
2.2.4 Inverse Kinematik	17
2.2.5 Bewertung von Maschinenkinematiken	18
2.3 Entwicklungsmethoden für Maschinenkinematiken	20
2.3.1 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung	20
2.3.2 Entwicklung spanender Werkzeugmaschinen	26
2.3.3 Entwicklung von Roboterkinematiken	28
2.3.4 Zusammenfassung der Entwicklungsmethoden	30
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>32</b>
3.1 Zielsetzung	32
3.2 Vorgehensweise	32
<b>4 Methode zur Konzeption von Maschinenkinematiken</b>	<b>34</b>
4.1 Analyse des Werkstückspektrums	37
4.2 Identifikation und Modellierung prinzipieller Lösungsmöglichkeiten	41
4.2.1 Herleiten geeigneter kinematischer Ketten	42
4.2.2 Auswahl einer Berechnungsmethode	43
4.2.3 Einfluss der berechenbaren Größen auf die Bewertungskriterien	47
4.2.4 Modellierung der Kinematiken	54
4.3 Berechnung und Anpassung der Konzepte	57
4.3.1 Vorgabe der Bewegungsbahn	58
4.3.2 Berechnung und Auswertung der Achsbewegungen	62
4.3.3 Zielfunktion für die Optimierung	64

4.3.4	Umsetzung der Optimierung	66
4.4	Gegenüberstellung und Bewertung der Konzepte	68
<b>5</b>	<b>Maschinenkonzept zur Bearbeitung gerundeter Strangpressprofile</b>	<b>71</b>
5.1	Analyse des Werkstückspektrums	71
5.1.1	Anforderungen an die Maschinenkinematik	76
5.1.2	Bewegungsaufteilung	80
5.2	Kinematik zur Umpositionierung der Werkstücke	82
5.2.1	Berechnung der Bewegungsbahnen	83
5.2.2	Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten	90
5.2.3	Kinematik 1 (RRR)	92
5.2.4	Kinematik 2 (TRR)	103
5.2.5	Kinematik 3 (RTR)	107
5.2.6	Kinematik 4 (RRT)	109
5.2.7	Kinematik 5 (TTR)	112
5.2.8	Kinematik 6 (TRT)	115
5.2.9	Kinematik 7 (RTT)	118
5.2.10	Kinematik 8 (TTT)	120
5.2.11	Gegenüberstellung der Konzepte	122
5.3	Einsatz einer Standardkinematik	126
5.4	Bearbeitungskinematik	129
5.5	Gesamtkonzept	130
<b>6</b>	<b>Umsetzung und Test</b>	<b>133</b>
6.1	Positioniergenauigkeit	135
6.1.1	Positioniergenauigkeit bei geraden Profilen	135
6.1.2	Positioniergenauigkeit bei gekrümmten Profilen	138
6.1.3	Winkelgenauigkeit	141
6.1.4	Möglichkeit zur weiteren Genauigkeitssteigerung	144
6.2	Bearbeitungsversuche	145
6.3	Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	149
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
7.1	Zusammenfassung	153
7.2	Ausblick	154
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>

## Abkürzungen

Formelzeichen	Größe
$\Delta$	Filterweite
$\Theta, \Phi, \Psi$	Eulerwinkel
$\Theta, \alpha, d, a$	Denavit-Hartenberg-Parameter
$\omega$	Winkelgeschwindigkeitsvektor
$\nabla$	Gradient
$a$	Beschleunigung
$\mathbf{a}$	Beschleunigungsvektor
$\mathbf{a}_u$	Gelenkbeschleunigungsvektor
$A, B, C$	Orientierungswinkel
$c$	Steifigkeit
$c_T$	Torsionssteifigkeit
$dL$	Verschiebung
$E$	E-Modul
$f$	Fehlerfunktion
$F$	Zahl der Freiheitsgrade, Kraft
FEM	Finite Elemente Methode
$I$	Axiales Flächenmoment
$\mathbf{J}$	Jakobimatrix
$k^i$	Körper
KS	Koordinatensystem
$L$	Länge
$\mathbf{M}$	Homogene Matrix
MKS	Mehrkörpersimulation
$n_G$	Gelenkzahl

$n_K$	Körperzahl
$n_s$	Schleifenzahl
$p^i$	Punkt
$\mathbf{p}$	Positionsvektor
$P_L, P_w, P_v, P_a$	prozentuale Vergleichswerte
$\mathbf{q}$	Vektor mit geschätzten Gelenkwerten
$Q_L$	Verhältnis Bauraum zu Arbeitsraum
$\mathbf{r}^i$	Positionsvektor im Körper-KS
$R$	Rotationsgelenk
$\mathbf{R}$	Rotationsmatrix
$s$	Schrittweite
$S$	Fehlerwert
SFB/TR10	Sonderforschungsbereich Transregio 10
$T$	Translationsgelenk
$\mathbf{u}$	Gelenkkoordinaten
$v$	Geschwindigkeit
$V_L, V_w, V_v, V_a$	Vergleichswerte
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeitsvektor
$\mathbf{v}_u$	Gelenkgeschwindigkeitsvektor
$w$	Gewichtungsfaktor
$W$	Arbeitsraumvolumen
$\mathbf{x}$	Vektor mit Endeffektorkoordinaten
$\mathbf{x}^i$	Positionsvektor im globalen KS
$Z$	Zielfunktion

Hinweis: Aufgrund der verwendeten Softwaresysteme wird im Rahmen der Arbeit ein Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet.