

Steigerung der Prozesssicherheit durch sensorintegrierte Werkzeugaufnahmen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Alexander Versch
aus Aschaffenburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Schulz
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann
Tag der Einreichung: 01. Dezember 2003
Tag der mündlichen Prüfung: 04. Februar 2004

Darmstadt 2004
D 17

Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung

Alexander Versch

**Steigerung der Prozesssicherheit durch
sensorintegrierte Werkzeugaufnahmen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2686-9

ISSN 1430-7901

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Erhöhung der Prozesssicherheit steht heute im Vordergrund der Bemühungen zur Steigerung der Produktivität. Da in der Regel der Prozesszustand direkt an der Zerspanungsstelle während der Bearbeitung nicht genau bekannt ist, werden sehr oft die Bearbeitungsprozesse unterhalb des technisch Möglichen durchgeführt. Um eine wesentliche Verbesserung des Bearbeitungsprozesses zu erreichen, muss daher der Prozessablauf möglichst nahe an der Bearbeitungsstelle erfasst werden können.

Dieses Buch beschreibt, wie beim HSC-Bohren und -Fräsen durch den Einsatz sensorintegrierter Werkzeugaufnahmen und dem Aufbau eines geschlossenen Regelkreises unter Einbeziehung der CNC-Steuerung die Prozesssicherheit der Bearbeitung erheblich gesteigert werden kann. Bereits vorhandenes Prozesswissen wird dabei in Entscheidungslogiken und Handlungsstrategien einbezogen.

Darmstadt, im Februar 2004

Prof. Dr.-Ing. H. Schulz

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen.

Mein herzlicher Dank gilt dem emeritierten Fachgebietsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. Herbert Schulz für die Möglichkeit, diese Arbeit durchführen zu können, sowie für seine hilfreiche Unterstützung bei der Erstellung.

Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Nordmann danke ich sehr für sein fachliches Interesse und die bereitwillige Übernahme des Koreferats.

Dank gilt auch dem derzeitigen Fachgebietsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. Eberhard Abele für die Möglichkeit, diese Arbeit anzufertigen.

Ich danke allen Kollegen am Fachgebiet für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen. Besonders seien hier die Herren Dr.-Ing. Wolfram Huerkamp, Dr.-Ing. Timo Würz, Dipl.-Ing. Naoufel Charrad und Dipl.-Ing. Carsten Stroh genannt. Dank gebührt auch meinen Studenten Dipl.-Ing. Alexander Mann, Dipl.-Ing. Sönke Siebert und Serge Zambou. Insbesondere Frau Anja Schulze und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Weigold danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung. Eine große Hilfe bei dem Aufbau verschiedenster Versuchseinrichtungen waren die Mitarbeiter der mechanischen und elektrotechnischen Werkstätten, stellvertretend sei den Herren Jürgen Geissler, Ingolf Kunz und Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Hemann gedankt.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Udo Fiedler, der mehr als nur ein Kollege am Institut war und mich auch bei unseren gemeinsamen Läufen durch den Darmstädter Wald immer wieder motivierte.

Meinen Eltern Elfriede und Niko Versch danke ich für ihre uneingeschränkte Unterstützung und den familiären Zusammenhalt, der vieles erleichtert und meinen Weg erst möglich gemacht hat. Meinen Bruder Dipl.-Ing. Christian Versch möchte ich ermuntern gleichzuziehen und es wieder einmal ein bisschen besser zu machen.

Silke jetzt ist's geschafft! Vielen Dank für Deine Liebe und für den Rückhalt den Du mir täglich gibst.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik beim HSC-Bohren und -Fräsen	2
2.1	Kenngößen der Zerspanung	2
2.1.1	Eingangsgrößen bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung	4
2.1.1.1	Stellgrößen bei der HSC-Bearbeitung	5
2.1.1.2	Systemgrößen – HSC-Maschine und Komponenten	6
2.1.2	Prozessgrößen	7
2.1.2.1	Zerspankräfte beim HSC-Bohren und -Fräsen	7
2.1.2.2	Schwingungen	10
2.1.3	Prozessstörungen	11
2.1.3.1	Prozessstörungen beim Bohren	11
2.1.3.2	Prozessstörungen beim Fräsen	13
3	Stand der Technik bei der Prozessüberwachung und –regelung	15
3.1	Begriffsbestimmung zur Prozessüberwachung und –diagnose	15
3.2	Prozessüberwachung und -regelung beim Zerspanen	17
3.2.1	Prozessüberwachung	17
3.2.2	Prozessregelung	18
3.2.3	Problemfeld der Integration von AC-Systemen in der Praxis	19
3.3	Aufbau von Prozessüberwachungs- und -regelungssystemen	21
3.3.1	Messsysteme zur Erfassung der Zerspankräfte	21
3.3.1.1	Grundlagen zur Kraftmessung	21
3.3.1.2	Zerspankraftmessung in Werkzeugmaschinen	22
3.3.1.3	Anforderungen an die Erfassung hochdynamischer Zerspankräfte in der HSC-Fräsbearbeitung	24

3.3.1.4	Existierende Lösungen zur Schnittkraftmessung	25
3.3.2	Ablauf der Signalverarbeitung	29
3.3.2.1	Signalauswertung und Merkmalsextraktion	29
3.3.2.2	Fehlererkennung mit signal- und modelgestützten Verfahren	32
3.3.2.3	Strategie	34
4	Motivation und Zielsetzung	35
5	Sensorintegrierte Werkzeugaufnahmen	37
5.1	Modell der Sensorintegration und Analyse der Möglichkeiten zum Prozesseingriff	37
5.1.1	Funktionsstruktur für die Zerspanung mit rotierenden Werkzeugen	37
5.1.2	Aussagekräftige Messgrößen und Möglichkeiten des Prozesseingriffs beim HSC-Bohren und -Fräsen	41
5.1.3	Abschätzung der Höhe der angreifenden Belastungen	44
5.1.4	Anforderungen an die zeitliche Auflösung bei der Messung hochdynamischer Fräskräfte	47
5.1.5	Idealzustand der Sensorintegration in Werkzeugaufnahmen	51
5.2	Anforderungen an die Komponenten und Schnittstellen	53
5.2.1	Anforderungen an die Komponenten	53
5.2.2	Anforderungen an die Schnittstellen	56
5.3	Auslegung der Komponenten	60
5.3.1	Auslegung der Mechanik	60
5.3.2	Auslegung der Messtechnik	62
5.4	Sensorintegration	65
5.4.1	Modulare Telemetrieinheit	65

5.4.2	Integration von piezoresistiven Dehnungsmessstreifen in die Werkzeugaufnahme für das HSC-Bohren	68
5.4.3	Integration von Piezoquarz-Kraftaufnehmern in die Werkzeugaufnahme für das HSC-Fräsen	81
6	Geschlossener Regelkreis von sensorintegrierter Werkzeugaufnahme und Werkzeugmaschine	93
6.1	Modell des geschlossenen Regelkreises	94
6.2	Softwarestruktur und Informationsfluss des Prozessregelkreises	97
6.3	Konzept zum Aufbau der Prozessüberwachung und -regelung	100
6.4	Aufbau des Regelkreises und Software-Implementierung	104
6.4.1	Hardwareaufbau des Prozessregelkreises	104
6.4.2	Implementierung der Software	107
7	Experimentelle Validierung	112
7.1	Bohrerbruchererkennung	112
7.2	Regelung des Bohrmoments	115
7.3	Automatische Ausregelung von Ratterschwingungen bei der HSC-Fräsbearbeitung	120
7.3.1	Identifikation charakteristischer Signalmerkmale	120
7.3.2	Festlegung einer Stabilitätsgrenze	121
7.3.3	Algorithmus zur Echtzeiterkennung von Ratterschwingungen	122
7.3.4	Strategien zur Stabilisierung von Ratterschwingungen	123
7.3.5	Bewertung der Strategien	128
8	Zusammenfassung und Ausblick	130
9	Literatur	133
10	Anhang	146