

**Steigerung der Genauigkeit
von HSC–Fräsmaschinen
durch Kompensation axialer Verlagerungen
bei Hochfrequenzspindeln**

Vom Promotionsausschuß der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor–Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl. –Ing. Joachim Findelee

aus Hamburg

2000

1. Gutachter: Prof. Dr. -Ing. Klaus Rall
2. Gutachter: Prof. Dr. -Ing. Otto von Estorff

Tag der mündlichen Prüfung: 02.11.2000

Schriftenreihe des Arbeitsbereichs
Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 13

Joachim Findeklee

**Steigerung der Genauigkeit von
HSC-Fräsmaschinen durch Kompensation axialer
Verlagerungen bei Hochfrequenzspindeln**

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Findekle, Joachim:

Steigerung der Genauigkeit von HSC-Fräsmaschinen durch
Kompensation axialer Verlagerungen bei Hochfrequenzspindeln/
Joachim Findekle. Aachen : Shaker, 2000

(Schriftenreihe des Arbeitsbereichs Werkzeugmaschinen
und Automatisierungstechnik der Technischen Universität
Hamburg-Harburg; Bd. 13)

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8220-9

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8220-9

ISSN 1438-8529

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg–Harburg.

Dem Leiter des Arbeitsbereiches, Herrn Prof. Dr. –Ing. Klaus Rall, danke ich für die Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr. –Ing. Otto von Estorff danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Außerdem gilt mein Dank Herrn Dipl. –Ing. Jürgen Röders und der Albrecht Röders GmbH & Co. KG für die Unterstützung und Förderung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Kollegen am Arbeitsbereich. Einzeln erwähnt seien hier Herr Dr. –Ing. Jörg Wollnack, der unter anderem einen Entwurf dieser Arbeit durchgesehen hat, und Herr Dr. –Ing. Andreas Bregas, denn mit dem von ihm entwickelten Grafikprogramm „Fastdraw“ sind alle Bilder dieser Arbeit erstellt worden.

In Dankbarkeit möchte ich auch meine Eltern erwähnen, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, und die durch die mir gewährte Unterstützung einen maßgeblichen Anteil auch an dieser Arbeit haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Stand der Technik und Vorgehen	3
2.1	Thermisch bedingte Fehler bei Werkzeugmaschinen	3
2.2	Kompensation	6
2.3	Hochfrequenzspindeln	8
2.3.1	Aufbau	8
2.3.2	Axiale Verlagerungen	9
2.3.3	Maßnahmen zur Verringerung axialer Verlagerungen	10
2.4	Vorgehen	12
2.4.1	Thermisches Verhalten	13
2.4.2	Kinetische Verlagerung	14
2.4.3	Zusammenführung der Modelle	14
2.4.4	Verifikation des Gesamtmodells	14
2.4.5	Kompensation	14
3	Modell für das thermische Verhalten	16
3.1	Grundlagen der Wärmeübertragung	16
3.1.1	Wärmeleitung	17
3.1.2	Konvektion	19

3.1.3	Strahlung	20
3.2	Räumliche Diskretisierung	20
3.3	Modellgeometrie	22
3.4	Anfangsbedingungen	24
3.5	Randbedingungen	25
3.5.1	Wärmeleitung	26
3.5.2	Fugen	27
3.5.3	Konvektion am ruhenden Zylinder	28
3.5.4	Konvektion am rotierenden Zylinder	29
3.5.5	Konvektion bei ineinander rotierenden Zylindern	30
3.5.6	Konvektion an einer ruhenden Scheibe	31
3.5.7	Konvektion an einer rotierenden Scheibe	32
3.5.8	Strahlung	32
3.5.9	Wärmeübertragung im Kugellager	33
3.5.10	Wärmeübergang in das Kühlwasser	37
3.6	Wärmequellen	38
3.6.1	Lager	39
3.6.2	Motor	40
3.7	Modellgleichung	41
3.8	Instationäre Lösung	42
3.9	Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit	43
4	Modellierung der kinetischen Verlagerung	45
4.1	Geometrie im Spindellager	45
4.2	Kinematik im Spindellager	46
4.3	Berechnung der kinetischen Verlagerung	48
4.3.1	Äußere Belastung	49
4.3.2	Kräftegleichgewicht am Wälzkörper	49
4.3.3	Kräftegleichgewicht am Innenring	51

5 Zusammenführung der Modelle	53
5.1 Thermoelastisches Verhalten der Welle	54
5.2 Verlagerungen im Spindellager	55
5.3 Gesamtmodell	56
6 Verifikation des Gesamtmodells	58
6.1 Versuchsstand	58
6.1.1 Aufbau	58
6.1.2 Hochfrequenzspindel	59
6.1.3 Aufbringen einer Last	59
6.1.4 Kompensation der Tischdehnung	61
6.1.5 Sensorik	62
6.1.6 Fehlerbetrachtung	65
6.2 Kinetische Verlagerung	68
6.2.1 Versuchsdurchführung	68
6.2.2 Auswertung	69
6.2.3 Modellrechnung	72
6.2.4 Vergleich	74
6.3 Thermische Verlagerung im Spindellager	76
6.3.1 Versuchsdurchführung	76
6.3.2 Auswertung	77
6.3.3 Modellrechnung	79
6.3.4 Vergleich	80
6.4 Thermische Verlagerung des Gesamtsystems	81
6.4.1 Versuchsdurchführung	81
6.4.2 Auswertung	85
6.4.3 Modellrechnung	89
6.4.4 Vergleich	92
6.4.5 Weitere Modellrechnungen	97
6.5 Verlagerung unter Last	102
6.6 Gesamte Verlagerung	103

7 Kompensation	106
7.1 Vorbemerkung	106
7.2 Modellierung	108
7.3 Thermische Verlagerung	112
7.3.1 Identifikation	112
7.3.2 Fehlerabschätzung	113
7.4 Thermische Verlagerung — Abkühlvorgang	115
7.4.1 Identifikation	115
7.4.2 Fehlerabschätzung	116
7.5 Kinetische Verlagerung	116
7.5.1 Identifikation	116
7.5.2 Fehlerabschätzung	117
7.6 Erreichbare Kompensationsgüte	118
8 Zusammenfassung	122
Literatur	125
Verzeichnis der Symbole	134