

# **Spindelschwingungen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen**

Unter besonderer Berücksichtigung der  
Lagerbeanspruchung

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

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dietmar Schall  
aus Waiblingen

|                             |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr.-Ing. Herbert Schulz  |
| Mitberichterstatter:        | Prof. Dr.-Ing. Horst P. Wölfel |
| Tag der Einreichung:        | 03.03.2006                     |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 12.07.2006                     |



Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung

**Dietmar Schall**

**Spindelschwingungen beim  
Hochgeschwindigkeitsfräsen**

Unter besonderer Berücksichtigung  
der Lagerbeanspruchung

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2006

**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., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5384-X

ISBN-13: 978-3-8322-5384-4

ISSN 1430-7901

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)

## Kurzübersicht

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Spindelschwingungen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen untersucht. Charakteristisch ist dabei, dass die biegekritische Eigenfrequenz der eingesetzten Motorspindeln durch die Zahneingriffsfrequenz direkt angeregt werden kann. Für diese Untersuchungen wurde ein Messverfahren zur Ermittlung der Relativbewegung zwischen Spindelwelle und -gehäuse entwickelt. Des Weiteren wurde ein Programm zur numerischen Simulation des Schwingungsverhaltens von Motorspindeln beim Hochgeschwindigkeitsfräsen erstellt.

Es konnten drei Betriebszustände identifiziert werden, bei denen es zu übermäßig starken Schwingungen kommt: im Fall der direkten Anregung der biegekritischen Eigenfrequenz durch die Zahneingriffsfrequenz, bei Auftreten selbsterregter, radialer Schwingungen und insbesondere bei Auftreten selbsterregter, axialer Schwingungen. Die Schwingungsamplituden der Werkzeugspitze überschreiten in diesen Fällen die Spanndicke bzw. den Zahnvorschub. Die *Hertz*sche Flächenpressung im Kugelkontakt des höchstbelasteten Lagers übersteigt dabei den der statischen Tragfähigkeit zu Grunde gelegten Wert.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die auftretenden Schwingungen wesentlich größer sind, als allgemein angenommen wurde. Diese führen aber nicht unmittelbar zu einer Schädigung der Spindellager. Des Weiteren wurde gezeigt, dass den axialen (selbsterregten) Schwingungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Aufbauend auf den Erkenntnissen über das reale Schwingungsverhalten von Motorspindeln beim Hochgeschwindigkeitsfräsen werden Ansatzpunkte aufgezeigt, wie die Spindelkonstruktion bzw. der Bearbeitungsprozess angepasst werden müssen, um die Lebensdauer der Spindel und das Bearbeitungsergebnis zu verbessern.

## Abstract

In this thesis, spindle vibrations at High-Speed Milling were analysed. In this case, the natural frequency (bending mode) of the used motor spindles may be excited by the tooth passing frequency. To do this analysis, a method for measuring the relative movement between spindle shaft and housing was developed. Furthermore a program for the numeric simulation of spindle vibrations at High-Speed Milling was written.

Three working conditions could be detected, at which immoderate vibrations occur: In case of direct excitation of the bending mode by the tooth passing frequency, in case of self excited radial vibrations and particularly in case of self excited axial vibrations. In this cases, the amplitude of the vibration at the tool tip exceeds the chip thickness and the feed per tooth respectively. The Hertzian stress at the balls and rings of the most highly stressed bearing rises above the value used for calculating the static bearing capacity.

Overall it could be shown, that the appearing vibrations exceed the generally agreed values. But they do not cause damage to the spindle bearings directly. Furthermore it was shown, that it has to be taken more care about the axial vibrations.

Based on the knowledge of the real dynamic behaviour of motor spindles at High-Speed Milling, possibilities were shown to modify the spindle design and the cutting process respectively to increase the lifetime of the spindle and the quality of the workpiece.

## Vorwort des Herausgebers

Für die Praxis der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist die weitere Erhöhung der Lebensdauer von Hochfrequenzmotorspindeln eine besonders wichtige Zielsetzung. Das Schwingungsverhalten schnelldrehender Motorspindeln ist dabei eine natürliche Grenze.

Im vorliegenden Buch werden geeignete Berechnungsverfahren hierfür beschrieben, wobei das Gesamtsystem Motorspindel/Werkzeugmaschine sowie die spezifische Konstruktion von Spindel, Lagerung, verschiedene Betriebszustände sowie die Eingriffsverhältnisse beim Fräsen von Aluminiumlegierungen Berücksichtigung finden.

Die Messergebnisse und die Resultate der Simulationsrechnungen geben dem Konstrukteur viele wertvolle Hinweise zur Verbesserung des Lebensdauerverhaltens von Hochgeschwindigkeitsmotorspindeln für Werkzeugmaschinen.

Darmstadt, Juli 2006

H. Schulz



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank gebührt Prof. Dr.-Ing. Herbert Schulz, der diese Arbeit ermöglicht und betreut hat. Ebenso danken möchte ich Prof. Dr.-Ing. Horst P. Wölfel für die bereitwillige Übernahme des Korreferates.

Den Kollegen am PTW möchte ich für die anregenden Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima danken. Besonders zu erwähnen ist hierunter Dipl.-Ing. Ingo Rehnert, dessen durchweg gegensätzliche Sicht der Dinge mir sowohl Probleme als auch Lösungswege aufzeigte.

Nicht unerwähnt bleiben sollen auch die industriellen Partner in den Forschungsprojekten Motorspindeln III und IV, die meine Arbeit am PTW begleitet und letztendlich auch finanziert haben.

Für die eingehende Durchsicht der Arbeit danke ich Frau Dipl.-Ing. Astrid Schall.

Schließlich möchte ich den Herren Dipl.-Ing. Klaus Nakonzer und Dr.-Ing. Olaf Niermeyer danken, die mich dabei unterstützten, diese Arbeit zu vollenden.

Waiblingen, im Februar 2006



# Inhalt

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| Kurzübersicht . . . . .                       | V         |
| Abstract . . . . .                            | VI        |
| Vorwort des Herausgebers . . . . .            | VII       |
| Vorwort . . . . .                             | IX        |
| Inhalt . . . . .                              | XI        |
| Formelzeichen und Abkürzungen . . . . .       | XIV       |
| <b>1 Einleitung</b>                           | <b>1</b>  |
| <b>2 Ausgangssituation</b>                    | <b>5</b>  |
| 2.1 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung . . . . . | 6         |
| 2.2 Motorspindeln . . . . .                   | 11        |
| 2.3 Schwingungen beim Fräsen . . . . .        | 19        |
| <b>3 Aufgabenstellung</b>                     | <b>27</b> |
| 3.1 Defizit . . . . .                         | 28        |
| 3.2 Zielsetzung . . . . .                     | 31        |
| 3.3 Lösungsansatz . . . . .                   | 32        |
| <b>4 Versuchsaufbau</b>                       | <b>33</b> |
| 4.1 Sensorik . . . . .                        | 34        |
| 4.2 Motorspindeln . . . . .                   | 36        |
| 4.3 Werkzeugmaschinen . . . . .               | 38        |
| 4.4 Fräsprozess . . . . .                     | 39        |
| 4.5 Versuchsprogramm . . . . .                | 40        |
| <b>5 Modellbildung</b>                        | <b>41</b> |
| 5.1 Spindelwelle . . . . .                    | 42        |
| 5.2 Lager und Vorspannung . . . . .           | 45        |
| 5.3 Werkzeugmaschine und Werkstück . . . . .  | 48        |
| 5.4 Fräsprozess . . . . .                     | 49        |

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.5      | Gesamtsystem . . . . .                                                  | 52        |
| 5.6      | Anwendung des Simulationsmodells . . . . .                              | 54        |
| <b>6</b> | <b>Schwingungen beim Fräsen</b>                                         | <b>57</b> |
| 6.1      | Das Eigenverhalten der untersuchten Motorspindel . . . . .              | 58        |
| 6.2      | Einfluss von Drehzahl und Zustellung . . . . .                          | 60        |
| 6.2.1    | Überblick . . . . .                                                     | 60        |
| 6.2.2    | Maximaldrehzahl . . . . .                                               | 62        |
| 6.2.3    | Betriebspunkt $n = 15.000/\text{min}$ , $a_p = 10 \text{ mm}$ . . . . . | 64        |
| 6.3      | Einfluss des Werkzeuges . . . . .                                       | 66        |
| 6.3.1    | Zähnezahl . . . . .                                                     | 66        |
| 6.3.2    | Drallwinkel . . . . .                                                   | 70        |
| 6.4      | Einfluss der Technologie . . . . .                                      | 72        |
| 6.4.1    | Eingriffsbreite . . . . .                                               | 72        |
| 6.4.2    | Gleich- und Gegenlaufräsen . . . . .                                    | 75        |
| 6.5      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                                     | 80        |
| <b>7</b> | <b>Verhalten unterschiedlicher Spindeln</b>                             | <b>81</b> |
| 7.1      | Lageranordnung . . . . .                                                | 82        |
| 7.1.1    | Tandem-X-Anordnung . . . . .                                            | 83        |
| 7.1.2    | Starre Anordnung . . . . .                                              | 86        |
| 7.2      | Spindelgröße . . . . .                                                  | 90        |
| 7.3      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                                     | 96        |
| <b>8</b> | <b>Werkzeugbewegung und Schwingungserregung</b>                         | <b>97</b> |
| 8.1      | Normalbetrieb . . . . .                                                 | 98        |
| 8.2      | Anregung der Eigenfrequenz . . . . .                                    | 100       |
| 8.3      | Selbsterregte, radiale Schwingungen . . . . .                           | 103       |
| 8.4      | Selbsterregte, axiale Schwingungen . . . . .                            | 107       |
| 8.5      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                                     | 111       |

|           |                                                    |            |
|-----------|----------------------------------------------------|------------|
| <b>9</b>  | <b>Lagerbeanspruchung</b>                          | <b>113</b> |
| 9.1       | Ableitung der Lagerbeanspruchung . . . . .         | 114        |
| 9.1.1     | Wellenschwingung im Lager . . . . .                | 114        |
| 9.1.2     | Maximale Flächenpressung im Kugelkontakt . . . . . | 115        |
| 9.1.3     | Entlastung einzelner Kugeln . . . . .              | 116        |
| 9.2       | Bewertung der Spindelschwingungen . . . . .        | 117        |
| 9.2.1     | Normalbetrieb . . . . .                            | 117        |
| 9.2.2     | Anregung der Eigenfrequenz . . . . .               | 120        |
| 9.2.3     | Selbsterregte, radiale Schwingungen . . . . .      | 122        |
| 9.2.4     | Selbsterregte, axiale Schwingungen . . . . .       | 124        |
| 9.3       | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                | 127        |
| <b>10</b> | <b>Ausblick</b>                                    | <b>129</b> |
| 10.1      | Ansatzpunkte für Verbesserungen . . . . .          | 130        |
| 10.1.1    | Bearbeitungstechnologie . . . . .                  | 130        |
| 10.1.2    | Spindelkonstruktion . . . . .                      | 131        |
| 10.1.3    | „Intelligente“ Motorspindeln . . . . .             | 132        |
| 10.2      | Weiterer Forschungsbedarf . . . . .                | 133        |
| <b>11</b> | <b>Zusammenfassung</b>                             | <b>135</b> |
| <b>12</b> | <b>Quellen</b>                                     | <b>139</b> |
|           | <b>Anhang</b>                                      | <b>151</b> |
| A.1       | Eingesetzte Messgeräte . . . . .                   | 152        |
| A.2       | Untersuchte Motorspindeln . . . . .                | 153        |
| A.3       | Simulationsprogramm . . . . .                      | 154        |
| A.4       | Berechnung der Lagerbeanspruchung . . . . .        | 167        |