Schutzmechanismen für Motorspindeln

Ein Beitrag zur Vermeidung kollisionsbedingter Schäden an Werkzeugmaschinen

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dennis Korff

aus Worms

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Tag der Einreichung:	26.01.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	19.04.2016

Darmstadt 2016

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Dennis Korff

Schutzmechanismen für Motorspindeln

Ein Beitrag zur Vermeidung kollisionsbedingter Schäden an Werkzeugmaschinen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4506-2
ISSN 1864-2179

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

Kollisionen stellen aufgrund der meist schwerwiegenden Folgen für die betroffenen Maschinenkomponenten die wohl kritischste Ausfallursache für Werkzeugmaschinen dar. Häufig ist hier die Motorspindel, welche als das Herzstück der Maschine angesehen werden kann, betroffen. Neben den anfallenden Kosten für Austausch oder Reparatur führt insbesondere der resultierende Maschinenausfall zur finanziellen Belastung des Maschinenanwenders. Im Gegensatz zu Ausfällen, die durch eine Überschreitung der Komponentenlebensdauer auftreten, können Kollisionsschäden nicht durch entsprechende präventive Instandhaltungsmaßnahmen verhindert werden. Am Markt vorhandene Lösungen zur Kollisionsvermeidung oder zur Vermeidung eines Kollisionsschadens sind nur begrenzt zuverlässig bzw. wirksam.

Die vorliegende Arbeit greift deshalb den vorliegenden Missstand auf und stellt eine neuartige Lösung zum Schutz von Motorspindeln vor Kollisionsschäden vor. Es handelt sich hierbei um einen passiv wirkenden Schutzmechanismus, welcher in die Schnittstelle zwischen Motorspindel und Werkzeugmaschine integriert wird und eine Spindelüberlastung im Kollisionsfall durch Ermöglichen einer Relativbewegung zur restlichen Maschinenstruktur effektiv verhindert. Nach erfolgter Konzeption und konstruktiver Detaillierung auf Basis einer Referenzspindel zeigen umfangreiche Versuchsreihen am Prototyp dessen Wirksamkeit und das Erreichen eines zuverlässigen Schutzes vor Kollisionsschäden auch bei hohen Kollisionsgeschwindigkeiten.

Darmstadt, im Mai 2016 E. Abele

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, dem Leiter des PTW, für die Möglichkeit der Durchführung der Arbeit und die fachliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Fleischer vom Institut für Produktionstechnik (wbk) des KIT Karlsruhe danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Der Firma Jakob Antriebstechnik GmbH in Kleinwallstadt, danke ich für die umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit. Insbesondere die enge Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Arno Wörn hat entscheidend zur Gestaltung dieser Arbeit beigetragen.

Mein weiterer Dank gilt den ehemaligen Kollegen des PTW, insbesondere den Mitarbeitern der Gruppe Werkzeugmaschinen und Komponenten, die durch ihre kritischen Anmerkungen und fachlichen Diskussionen einen besonderen Teil zur Qualität dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gebührt hier insbesondere den Herren Matthias Berger, Michael Haydn, Behzad Jalizi und Robert Rost.

Ich danke darüber hinaus allen Studenten und Studentinnen, die durch ihr Engagement einen bedeutenden Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Stellvertretend seien hier die Herren Marcel Mahner, Dominik Merz, Stefan Scheidel, Werner Pilger, Erik Nowak, Julian Sinz und Fares Ali genannt.

Der mechanischen Werkstatt unter Leitung von Herrn Mirko Feick danke ich für die hervorragende Unterstützung bei der Durchführung des praktischen Teils der Arbeit. Den Herren Bruno Adams und Hans-Jürgen Hermann sei an dieser Stelle persönlich gedankt.

Meinen Eltern Heidi und Klaus bin ich zu Dank verpflichtet, da diese mir erst durch ihr Vertrauen und ihre Unterstützung den begangenen Ausbildungsweg, der mit dieser Arbeit nun zum Abschluss kommt, ermöglicht haben.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Carina, die mich schon über viele Jahre begleitet und damit alle Höhen und Tiefen bei der Entstehung dieser Arbeit miterlebt hat. Ich danke ihr für die Rückstellung ihrer eigenen Interessen für einen nicht geringen Zeitraum und insbesondere für ihre moralische und auch aktive Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Biebesheim am Rhein, im Mai 2016 Dennis Korff

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen V
1 Einleitung 1
2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse 3
2.1 Kollisionen in Werkzeugmaschinen 3
2.1.1 Kollisionsursache 5
2.1.2 Technischer Prozess 6
2.1.3 Kollision 7
2.1.4 Kollisionsfolge 10
2.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen und deren Folgen 14
2.2.1 Verringerung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Kollisionen (Kollisionsprävention) 16
2.2.2 Verringerung des Kollisionsschadens 25
2.3 Fazit zum Stand der Erkenntnisse 37
3 Zielsetzung und Vorgehensweise 41
3.1 Zielsetzung der Arbeit 41
3.2 Systematisches Vorgehen zur Zielerreichung 42
4 Modell zur Ermittlung der Kollisionskräfte in einem Bearbeitungszentrum 45
4.1 Vorgehen zur Erstellung eines flexiblen Mehrkörpermodells 45
4.1.1 Maschinengeometrie und kinematisches Modell 46
4.1.2 Aufbau des dynamischen MKS-Modells 47
4.1.3 Einbindung flexibler Strukturkomponenten 52
4.1.4 Modellierung des Kollisionskontaktes 56
4.2 Ergebnisse der Kollisionsanalyse 60
4.3 Fazit zur simulativen Untersuchung von Kollisionskräften 61
5 Konzeption des Schutzmechanismus 63
5.1 Informations- und Definitionsphase 63
5.1.1 Maschine und Motorspindel 64
5.1.2 Werkstück, Werkzeug und Bearbeitungsprozess 68

5.1.3 Kollisionssituation 69
5.1.4 Fazit zu den Rahmenbedingungen 70
5.1.5 Anforderungsliste 70
5.2 Kreationsphase 72
5.2.1 Funktionsanalyse und –struktur 72
5.2.2 Entwicklung der Konzeptvarianten 73
5.3 Konzeptbeurteilung 87
5.3.1 Definition der Bewertungskriterien 87
5.3.2 Konzeptbewertung 89
5.4 Entscheidung und Fazit zum Konzeptentwurf 91
6 Auswahl und Untersuchung des Referenzsystems 93
6.1 Referenzspindel 93
6.2 Grenzbelastbarkeit der Referenzspindel 94
6.2.1 Welle-Lagerung-System 95
6.2.2 Grenzbelastbarkeit des Werkzeugspannsystems 101
6.3 Referenzmaschine 104
6.3.1 Konstruktiver Aufbau und Achsanordnung 104
6.3.2 Maschinenreaktion und Achsbremswege 105
6.3.3 Fazit zur Referenzmaschine 106
7 Konstruktive Detaillierung des Schutzmechanismus 107
7.1 Äußere und innere geometrische Gestaltung 107
7.1.1 Äußere geometrische Gestaltung des Schutzmechanismus 107
7.1.2 Innere geometrische Gestaltung des Schutzmechanismus 108
7.2 Auslegung und konstruktive Detaillierung der Haltekrafterzeugung 111
7.2.1 Auslegung und Gestaltung des Magnetsystems 113
7.2.2 Auslegung und Gestaltung der Vorspannung 118
7.3 Konstruktive Details im Überblick 121
8 Messtechnische Untersuchung und Bewertung 125
8.1 Ausrückverhalten des Schutzmechanismus 125

8.1.1 Prüfstandsaufbau und Messtechnik 125
8.1.2 Axiales und radiales Ausrückverhalten des Schutzmechanismus 127
8.1.3 Einfluss der Vorspannung auf das statische Ausrückverhalten 129
8.1.4 Fazit zu den statischen Ausrückversuchen 131
8.2 Einfluss auf die statische Maschinensteifigkeit 131
8.2.1 Versuchsaufbau und Messtechnik 132
8.2.2 Ermittelte Steifigkeiten 132
8.2.3 Fazit zur statischen Steifigkeit 135
8.3 Einfluss auf das dynamische Eigenschwingungsverhalten der Versuchsmaschine 135
8.3.1 Versuchsaufbau und Messtechnik 135
8.3.2 Dynamisches Eigenschwingungsverhalten 137
8.3.3 Fazit zum Einfluss auf das dynamische Eigenschwingungsverhalten 141
8.4 Einfluss auf das Prozessverhalten der Versuchsmaschine 141
8.4.1 Versuchsaufbau und Messtechnik 142
8.4.2 Stufenfrästest 144
8.4.3 Untersuchungsergebnisse bezüglich des Prozessverhalten beim Stufenfrästest 145
8.4.4 Reaktion des Schutzmechanismus auf die Prozesskräfte 148
8.4.5 Werkzeugein- und -austritt 153
8.4.6 Fazit zum Prozessverhalten 155
8.5 Verhalten unter Kollisionsbedingungen 156
8.5.1 Versuchsaufbau 156
8.5.2 Vorgehen 157
8.5.3 Kollisionskräfte in Abhängigkeit der Kollisionssituation 158
8.5.4 Reaktionszeit des Schutzmechanismus 159
8.5.5 Fazit zu den Kollisionsversuchen 161
8.6 Präzision beim Wiedereinrücken 161
8.6.1 Rotatorische Lageabweichung der Spindelachse 162
8.6.2 Translatorische Lageabweichung der Spindelachse 165

8.6.3 Fazit zur Wiedereinrückgenauigkeit 168
8.7 Untersuchung der Spindelfunktionalität nach den Kollisionsversuchen 168
8.7.1 Überprüfung des Spindelrundlaufs 168
8.7.2 Überprüfung der Lagerung auf Kollisionsschäden 169
8.7.3 Fazit zu den Untersuchungen auf Kollisionsschäden 173
8.8 Fazit zur messtechnischen Untersuchung 173
9 Evaluierung an einem industrienahen Anwendungsbeispiel 175
9.1 Einfluss auf die Prozessstabilität 175
9.2 Ermittlung der Kollisionskräfte 176
9.3 Fazit zum industrienahen Anwendungsbeispiel 177
10 Zusammenfassung und Ausblick 179
11 Literaturverzeichnis 181
A Anhang 199
A.1 Ermittlung von Zerspankräften und Drehmomenten 199
A.2 Herleitung der Gestaltänderungsenergiehypothese 199
A.3 Elemente der Jacobi-Matrizen zur Lagerberechnung 201
A.4 Magnetwerkstoff 203
A.5 Autoleistungsspektrum des Impulshammers 203
A.6 Eigenformen 204
A.7 Prozesskraftinduzierte Verschiebung am TCP 206
A.8 Prozesskräfte beim unterbrochenen Schnitt 206
A.9 Kontaktschaltung zur Kollisionserkennung 207