

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen
durch einstellbare Werkstückdirektspannung
mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 256

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

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

Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen
durch einstellbare Werkstückdirektspannung
mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 256

**Dämpfung von Bauteilschwingungen
durch einstellbare Werkstückdirektspannung
mit Hydrodehnspanntechnik**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Bastian Rothaupt

Tag der mündlichen Prüfung:	13.06.2022
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Univ.-Prof. Friedrich Bleicher

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8735-2

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

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, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Für die sehr guten Rahmenbedingungen des wissenschaftlichen Arbeitens am Institut, den fachlichen Austausch und die persönliche Förderung gilt mein Dank Prof. Jürgen Fleischer. Herrn Prof. Friedrich Bleicher danke ich für den wissenschaftlichen Austausch zum Thema und die Übernahme des Korreferats, sowie Prof. Albert Albers für die Übernahme des Prüfungsvorsitz.

Eine wissenschaftliche Arbeit entsteht immer im Austausch und der Diskussion mit Wegbegleitern. Danken möchte ich insbesondere meinen ehemaligen Kollegen und Studenten Quirin Spiller, Andreas Spohrer, Benedikt Klee, Markus Netzer, Philipp Gönnheimer, Markus Schäfer, Simon Merz, David Barton, Jonas Hillenbrand, Tobias Storz, Sven Roth, Marco Friedmann, Sven Coutandin, Patrick Rottmann sowie Jan Corduan. Allen Mitarbeitern des Instituts aus Werkstatt, Verwaltung und IT danke ich für ihre Unterstützung. Für den fachlichen Austausch danke ich Philipp Schröder, Sebastian Scharinger sowie Thomas Retzbach.

Für ihre große Unterstützung während meines Studiums danke ich meinen Eltern. Für ihren Rückhalt, ihre Ermutigung und ihre Geduld auf dem Weg zur Promotion danke ich meiner Frau Pamela und meinen beiden Kindern Fabian und Kira.

Aalen, 13.06.2022

Bastian Rothaupt

Abstract

During the machining of thin-walled parts, solid body vibrations are induced in the workpiece by the tooth meshing during the milling process, which occur as bending and torsional vibrations. These can have a negative effect on the machining result in terms of dimensional accuracy and surface quality and therefore have to be reduced, particularly in finishing processes, in order to avoid expensive and time-consuming rework. Due to its position in the force flow, workpiece clamping technology offers potential for the damping of workpiece vibrations. Previous work focused on complex actively controlled systems or passive damping clamping technology, which does not allow the damping effect to be adjusted.

On the contrary, the present work investigates a semi-passive approach to damp and influence workpiece vibrations of thin-walled parts by means of direct workpiece clamping. The vibration properties of the workpiece in terms of natural frequency, damping and dynamic compliance are influenced by the adjustability of the axial pull-in force and the radial hydraulic expansion clamping technology acting on a clamping bolt connected to the workpiece. Using a functional prototype with a demonstrator part, it can be shown that the hydraulic expansion technology achieves a three times higher damping of the bending mode. By additionally optimizing the joint between the workpiece and the clamping device, a damping ratio of up to 6% is achieved. A prediction model is used to investigate the extent to which a component-independent prediction of the damping ratio as a function of the clamping forces is possible. Finally, the findings are used to derive design guidelines for the application-oriented implementation of workpiece direct clamping systems with hydraulic expansion technology.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik und Forschung	7
2.1 Stationäre Werkstückspanntechnik in Werkzeugmaschinen	7
2.2 Hydrodehnspanntechnik	13
2.2.1 Funktionsweise und Aufbau	13
2.2.2 Anwendungsbeispiele und Einsatzgebiete	14
2.2.3 Modellierungsansätze und simulative Untersuchungsergebnisse	17
2.3 Modellierung, Simulation und Messung der Dämpfung von Bauteilschwingungen	19
2.3.1 Definition des Dämpfungsbegriffs	20
2.3.2 Beschreibung schwach gedämpfter Schwingungen	21
2.3.3 Experimentelle Bestimmung von Bauteilschwingungen und modaler Dämpfung	22
2.3.4 Modellierung von Dämpfungseffekten	26
2.4 Ansätze zur Schwingungsdämpfung in Werkzeugmaschinen	29
2.4.1 Erhöhung der dynamischen Steifigkeit	30
2.4.2 Passiv dämpfende Zusatzsysteme	31
2.4.3 Aktiv dämpfende Zusatzsysteme	32
2.4.4 Semi-passiv und semi-aktiv dämpfende Zusatzsysteme	33
2.5 Schwingungsdämpfung in der Spanntechnik	34
2.5.1 Passiv dämpfende Spannsysteme	34
2.5.2 Aktiv dämpfende Spannsysteme	38

2.6	Bewertung des Stands der Technik und Forschung	41
2.6.1	Fazit zum Stand der Technik und Forschung	41
2.6.2	Forschungsdefizit und Handlungsbedarf	43
3	Konkrete Zielsetzung und Vorgehensweise	46
3.1	Konkrete Zielsetzung	46
3.2	Vorgehensweise zur Zielerreichung	46
4	Funktionsprinzip eines Werkstückdirektspannungssystems mit Hydrodehnspanntechnik	49
4.1	Funktionsprinzip und Wirkungsweise	49
4.2	Geometrische Systembeschreibung der Hydrodehnspanntechnik	50
4.3	Einflussfaktoren auf die Hydrodehnspannkraft	52
5	Entwurf und Umsetzung des Spannsystems	55
5.1	Anforderungs- und Funktionsanalyse	55
5.2	Prinziplösungen und Konzeptentwicklung	57
5.3	Konstruktive und fertigungstechnische Umsetzung	64
5.4	Montage, Kalibrierung und Inbetriebnahme	68
6	Einfluss des Spannsystems auf statische Bauteileigenschaften	70
6.1	Auswahl eines Demonstratorbauteils	70
6.2	Modellbildung	71
6.2.1	Strukturmodellierung	71
6.2.2	Modellierung der Lastschritte und Randbedingungen	79
6.3	Verschiebung der Dehnkammerwand	82
6.4	Axialverschiebung des Spannbolzens	84
6.5	Analyse des Spannungszustands der Spannfläche	85
6.6	Statische Bauteilnachgiebigkeit	85
7	Einflussanalyse auf schwingungsdynamische Bauteil-eigenschaften	88
7.1	Experimentelle Modalanalyse	88
7.1.1	Versuchsaufbau und Messmittel	88
7.1.2	Versuchsdurchführung	89

7.1.3	Versuchsauswertung	92
7.2	Einfluss der Spannkkräfte	93
7.2.1	Untersuchung der Eigenfrequenzen	94
7.2.2	Untersuchung modaler Dämpfungsgrade	96
7.2.3	Messung der dynamischen Nachgiebigkeiten	98
7.2.4	Erprobung des Spannsystems im Zerspanungsversuch	100
7.2.5	Zwischenfazit	102
7.3	Einfluss der Spannfläche	103
7.3.1	Umsetzung dämpfender Spannflächen	103
7.3.2	Untersuchung der Eigenfrequenzen	104
7.3.3	Vergleich modaler Dämpfungsgrade	107
7.3.4	Vergleich dynamischer Nachgiebigkeiten	109
7.3.5	Fazit zur Untersuchung des Einflusses der Spannfläche	110
8	Identifikation und Vorhersage modaler Dämpfungsparameter	111
8.1	Experimentelle Bestimmung der modalen Dämpfung	111
8.1.1	Versuchsplanung	112
8.1.2	Experimentelle Bestimmung der modalen Dämpfung	113
8.2	Bestimmung lokaler Dämpfungswerte	115
8.3	Vorhersagemodell modaler Dämpfungsparameter	119
9	Gestaltungsrichtlinien zur Umsetzung schwingungsdämpfender Spannsysteme mit Hydrodehnspanntechnik	124
10	Zusammenfassung und Ausblick	128
10.1	Zusammenfassung	128
10.2	Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	VIII
	Abbildungsverzeichnis	XIV
	Tabellenverzeichnis	XVII
	Wissenschaftlicher und beruflicher Werdegang	XIX