

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

Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von
Ritzel-Zahnstangen-Trieben
mittels Acoustic Emission**

Band 239

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

Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 239

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der KIT-Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

eingereichte
Dissertation
von

Christopher Ehrmann
aus Bretten

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2019
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Weimin Zhang
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7703-2

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 soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. 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

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferent. Seine konstruktive Kritik und fachlichen Anregungen sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen, nicht nur in meine wissenschaftliche Arbeit und den darin enthaltenen neuen Ansätzen sondern auch in meine Arbeit als Gruppenleiter unserer deutsch-chinesischen Forschungs Kooperation mit der Tongji Universität Shanghai, haben essenziell zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Weimin Zhang von der Tongji Universität für die gute Zusammenarbeit und Gastfreundschaft sowie für die Übernahme des Korreferats. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers gebührt mein Dank für die Übernahme des zweiten Korreferats, Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova für den Prüfungsvorsitz. Meine Forschungsarbeit wäre ohne die Unterstützung durch die Firma Wittenstein SE wahrscheinlich nicht möglich gewesen, insbesondere gilt mein Dank Herrn Dr. Philippe Isabey für die technische und methodische Unterstützung. Den Kolleginnen und Kollegen des wbk sowie den Ehemaligen des wbk danke ich für die stets freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Hervorheben möchte ich meinen ehemaligen Studenten und mittlerweile Kollegen Jonas Hillenbrand, welcher durch die Betreuung der Versuche und der Software eine wichtige Stütze war.

Einen besonderen Dank verdienen meine Eltern, welche mir das Studium ermöglicht und mich auch während meiner Promotion unterstützt haben.

Shanghai, im März 2020

Christopher Ehrmann

Zusammenfassung

Trotz der wirtschaftlichen und technischen Bedeutung von Ritzel-Zahnstangen-Trieben sind keine Verfahren oder Ansätze zu deren Zustandsüberwachung bekannt. Trotzdem treten unerwünschte Ausfälle im Sinne von Spontanausfällen und Frühausfällen auf. Um diese Lücke zu schließen, wird in dieser Arbeit ein Überwachungssystem erarbeitet, welches auf der bereits für andere Antriebskomponenten eingesetzten Zustandsüberwachung mittels Acoustic Emission basiert. Diese wird in dieser Arbeit auf den Ritzel-Zahnstangen-Trieb übertragen, dazu wird zunächst ein für die spezifischen Anforderungen an den Antrieb und die Schadensursachen geeignetes Sensor- und Auswertungssystem entwickelt. Dieses wird schließlich durch ein bezüglich Schadensursachen und Systemaufbau angepasstes Versuchskonzept, bestehend aus Versuchsständen und Versuchsplan, in Laborversuchen validiert. Anschließend erfolgt eine kritische Bewertung sowohl hinsichtlich der Korrelation von Ausfallursachen und den Auswertergebnissen als auch hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen.

Abstract

Despite the economic and technical importance of rack and pinion drives, no methods or approaches for their condition monitoring are known. Nevertheless, unwanted failures occur in the sense of spontaneous failures and early failures. In order to close this gap, a monitoring system is developed in this thesis, which is based on the condition monitoring already used for other drive components by means of acoustic emission. In this work, this is transferred to the rack and pinion drive. To this end, a sensor and evaluation system suitable for the specific requirements of the drive and the causes of damage is first developed. This approach is validated by laboratory tests using a test concept, consisting of test rigs and a design of experiments, adapted to the damage causes and system structure. Subsequently, a critical evaluation is carried out with regard to the correlation of failure causes and the evaluation results as well as with regard to the fulfilment of the requirements.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.2.1 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und Technik	4
2.1 Grundlagen	4
2.1.1 Ritzel-Zahnstangen-Triebe	4
2.1.2 Zustandsüberwachung und Ausfallfrüherkennung	8
2.2 Zustandsüberwachung von Ritzel-Zahnstangen-Trieben	9
2.2.1 Zustandsüberwachung linearer Vorschubantriebe	9
2.2.2 Kritische Komponenten des Ritzel-Zahnstangen-Triebs	11
2.3 Acoustic Emission	16
2.3.1 Grundlagen von Acoustic Emission	17
2.3.2 Einsatz in der Ausfallerkennung von Antriebskomponenten	26
2.4 Zusammenfassende Bewertung	29
3 Zielsetzung, Lösungsansatz und Vorgehensweise	31
3.1 Zielsetzung basierend auf dem Stand der Forschung und Technik	31
3.2 Lösungsansatz und Vorgehensweise	31
3.2.1 Ausfallfrüherkennung mittels Acoustic Emission	31
3.2.2 Vorgehensweise	32
4 Anforderungen	34
4.1 Anwendungsfall	34
4.2 Acoustic Emission Sensorsystem	36
4.2.1 Anbringungsort und Mechanik der Sensorik	36
4.2.2 Sensorelement und Signalverarbeitung	37

4.2.3	Signal- und Energieübertragung	38
4.3	Auswerteverfahren und Software	38
4.3.1	Grundlegende Verfahren	38
4.3.2	Erweiterung um eine positionsabhängige Auswertung	39
4.3.3	Versuchsstandsteuerung	39
4.4	Versuchsstandkonzept	40
5	Herleitung des Versuchsstandaufbaus	41
5.1	Versuchsstand 1	42
5.2	Versuchsstand 2	43
6	Sensorentwicklung zum Einsatz an Ritzel-Zahnstangen-Trieben	46
6.1	Entwicklungsmethodik	46
6.2	Systemaufbau	47
6.3	Ritzel-Sensor	48
6.3.1	Mechanischer Aufbau	50
6.3.2	Analoge Signalverarbeitung	52
6.3.3	Digitale Signalverarbeitung	55
6.3.4	Energieübertragung und Stromversorgung	56
6.4	Datenübertragung	58
6.4.1	Berührungslose Datenübertragung	58
6.4.2	Datenübertragung an das Auswertesystem	59
6.5	Ergebnis	62
7	Auswerteverfahren und Software	66
7.1	Systemaufbau	66
7.2	Steuerungssoftware	67
7.2.1	Ablaufsteuerung	67
7.2.2	Datenübertragung und -speicherung	69
7.3	Auswerteverfahren	70
7.3.1	Effektivwert	71
7.3.2	Welch Leistungsdichtespektrum	73

7.3.3	Positionsabhängige Auswertung	77
8	Validierung	79
8.1	Versuchsplan	79
8.2	Inbetriebnahme und Versuchsdurchführung	79
8.3	Ergebnisse	86
8.3.1	Trockenlauf und Schmierstoffabriss	86
8.3.2	Überlast	95
9	Kritische Bewertung, Zusammenfassung und Ausblick	104
9.1	Bewertung	104
9.1.1	Eignung in der Praxis	104
9.1.2	Korrelation der Schadenursachen und der Merkmale	105
9.2	Ausblick	105
10	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	X
	Tabellenverzeichnis	XIV
	Quelltextverzeichnis	XV
	Anhang	XVI

Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
ADC	Analog/Digital Converter	
AE	Acoustic Emission	
bit	Binärstelle (binary digit)	
CM	Condition Monitoring	
DAC	Digital/Analog Converter	
dB	Dezibel	
DFT	Diskrete Fourier-Transformation	
f	Frequenz	[Hz]
FFT	Fast Fourier Transformation	
FPGA	Field Programmable Gate Array	
I	Strom	[A]
i	Übersetzungsverhältnis	
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell	
k	Steifigkeit	[N] [Nm] ¹
KGT	Kugelgewindetrieb	
LDA	Linear-Direktantrieb	
M	Drehmoment	[Nm]
m	Masse	[kg]
F	Kraft	[N]
NDT	Non-Destructive Testing	
PC	Personal Computer	
PSD	Power Spectral Density	
RZA	Ritzel-Zahnstangen-Antrieb	

¹ [N] für Dehn- und Zugsteifigkeit bzw. [Nm] für Torsions- und Biegesteifigkeit

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
SHM	Structural Health Monitoring	
SPALTEN	Problemlösungsmethode basierend auf Situationsanalyse, Problemeingrenzung, alternative Lösungssuche, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden/Umsetzen und Nacharbeiten/Lernen	
SoC	System on Chip	
STFT	Short-Time Fourier Transform	
t	Zeit	[s]
U	Spannung	[V]
$\Delta\Sigma$	Delta-Sigma(-Modulation)	
λ	Ausfallwahrscheinlichkeit	
