

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

Jonas Hillenbrand

**Unsupervised Condition Monitoring für
Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission**

Band 276



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
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 276

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

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

angenommene

Dissertation

von

Jonas Hillenbrand

aus **Dielheim**

Tag der mündlichen Prüfung: **05.02.2024**
Hauptreferent: **Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer**
Korreferent: **Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl**

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9485-5
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

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

„Die Wissenschaft ist eine wunderbare Sache, wenn man nicht seinen Lebensunterhalt damit verdienen muss.“ – Albert Einstein

Vorwort des Verfassers

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

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats, die fachliche Betreuung und persönliche Förderung, welche ich in den fünf Jahren am Institut erfahren durfte. Herrn Prof.-Dr.-Ing. Verl danke ich für den wissenschaftlichen Austausch und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Cichon für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Dem gesamten Kollegium des wbk danke ich für die gemeinsam erlebte Zeit, den wissenschaftlichen Austausch und die Erfahrungen, die ich mit jedem am Institut teilen konnte. Insbesondere möchte ich hier vor allem meinen wissenschaftlichen *Mitstreitern* der Gruppe Werkzeugmaschinen und Mechatronik danken. Ebenso zum Dank verpflichtet bin ich den Mitarbeitern in Technik und Administration des wbk. Allen voran danke ich Friedbert Mathes für seine unersetzliche Hilfe im Bereich Kugelgewindtrieb und Anne-Sophie Rossol für ihre tatkräftige Unterstützung in allen Bereichen des Institutslebens und darüber hinaus. Ein Dank gilt auch meinen Studenten, die ich betreuen durfte und die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben: Danke an Zewei Lu, Jan Detroy, Dominique Zipperling, Gregor Osen, Jakob Kretschmer und Patrick Schaible. Ein besonderer Dank gilt ebenso drei Personen, die meine Zeit am Institut maßgeblich geprägt haben: Ich bedanke mich bei Dr.-Ing. Christopher Ehrmann für die Wegbereitung meiner Arbeit und die Inspiration für die Welt der Elektronik, bei Eduard Gerlitz für seine unkonventionelle Art und bei Philipp Gönzheimer in seiner Rolle als Kollege, Freund und Gruppenleiter.

Zu guter Letzt gilt mein größter Dank meiner Familie, ohne die diese Leistung gar nicht möglich gewesen wäre. Ich sage Danke für den jahrelangen Rückhalt und einen Ort der Geborgenheit. Ich danke daher allen voran meinen Eltern Petra und Willi Hillenbrand, meiner Freundin Anita und meiner Schwester Sophia mit Dominic und Tochter Carlotta.

Albstadt, 08. Februar 2024

Jonas Hillenbrand

Abstract

A component of major importance in the context of machine tool maintenance are ball screw drives (BSD). Although, BSD have been present for years in production equipment, they are still in focus for unplanned downtimes or unforeseen machine failures.

There is currently no theoretical calculation basis that describes the failure of the component accurately enough, taking into account all external and internal influences. In order to solve existing obstacles and problems in the monitoring of BSD, an acoustic emission (AE) sensor system is investigated and a suitable condition monitoring (CM) system is conceived and tested within the scope of this work. While current CM approaches are mostly based on supervised learning methods, this work focuses on the use of unsupervised methods. These can be used without a-priori knowledge and costly training.

The dissertation outlines the current state of the art and research in the context of CM systems for BSD. Based on the lack of adequate CM systems, a novel cluster model for detection of unknown or emerging component behavior is introduced. The system is implemented without an offline training phase, but able to learn the system's condition and detect anomalies during operation. In addition to enabling the sensor system, a particular focus is on automatic creation of CM systems without user intervention in order to enable low-effort and transferable systems.

The sensor system is evaluated on a variety of different operation and degradation scenarios. Considered defect mechanisms are fatigue, preload loss, debris and lack of lubrication. AE monitoring shows promising results for the detection for these defects. Combined with the CM system, validation experiments provide significant detection results and the general ability to adapt to a variety of datasets.

Kurzfassung

Ein wichtiges Bauteil im Rahmen der Instandhaltung von Werkzeugmaschinen sind Kugलगewindetribe (KGT). Obwohl KGT seit Jahren in Produktionsanlagen vorhanden sind, stehen sie immer noch im Fokus für ungeplante Stillstände oder unvorhergesehene Maschinenausfälle.

Derzeit gibt es keine theoretische Berechnungsgrundlage, die den Ausfall des Bauteils unter Berücksichtigung aller äußeren und inneren Einflüsse genau genug beschreibt. Um die bestehenden Hindernisse und Probleme bei der Überwachung von KGT zu lösen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Acoustic Emission (AE) Sensorik untersucht und ein geeignetes Condition-Monitoring (CM) System konzipiert und getestet. Während aktuelle CM-Ansätze meist auf überwachten Lernmethoden basieren, liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Einsatz von unüberwachten Methoden. Diese können ohne Vorkenntnisse und aufwändiges Training eingesetzt werden.

Die Dissertation umreißt den aktuellen Stand der Technik und Forschung im Kontext von CM-Systemen für KGT. Basierend auf dem Mangel an adäquaten CM-Systemen wird ein neuartiges Clustermodell zur Erkennung von unbekanntem oder aufkommendem Komponentenverhalten vorgestellt. Das System wird ohne eine Offline-Trainingsphase implementiert, ist aber in der Lage, den Zustand des Systems zu erlernen und Anomalien während des Betriebs zu erkennen. Neben der Befähigung des Sensorsystems liegt ein besonderer Fokus auf der automatischen Erstellung von CM-Systemen ohne Benutzereingriff, um aufwandsarme und übertragbare Systeme zu ermöglichen.

Das Sensorsystem wird in verschiedenen Betriebs- und Defektszenarien evaluiert. Berücksichtigte Defektmechanismen sind Ermüdung, Vorspannungsverlust, Verschmutzung und Mangelschmierung. Die AE-Überwachung zeigt vielversprechende Ergebnisse für die Erkennung dieser Defekte. In Kombination mit dem CM-System liefern Validierungsexperimente signifikante Detektionsergebnisse und die allgemeine Fähigkeit, sich an eine Vielzahl von Datensätzen anzupassen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen	IV
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik und Forschung	7
2.1 Grundlagen zu Kugelgewindetrieben	7
2.1.1 Kinematik des Kugelgewindetriebs	10
2.1.2 Verschleiß- und Schadensmechanismen im Kugelgewindetrieb	17
2.1.3 CM-Anwendungen für Kugelgewindetriebe	21
2.1.4 Schlussfolgerung zu CM-Systemen für Kugelgewindetriebe	24
2.2 Grundlagen zu Acoustic Emission	25
2.2.1 Messung von Acoustic Emission	26
2.2.2 Anwendungen der Acoustic Emission Messung	29
2.2.3 Schlussfolgerung für die Auswertung von AE am KGT	32
2.3 Unsupervised Learning für Condition-Monitoring	36
2.3.1 Unüberwachte Merkmalsextraktion	38
2.3.2 Grundlagen der Clusterbildung	41
2.3.3 Schlussfolgerung zum Einsatz von Unsupervised Learning im CM	46
2.4 Fazit für die Zielsetzung und Vorgehensweise der eigenen Arbeit	48
3 Eigener Ansatz	50
3.1 Vorgehensweise	52
3.2 Systemgrenzen und -definitionen	54
4 Anforderungsanalyse	58
4.1 Anforderungen an die Messkette	58

4.2	Anforderungen an die digitale Signalverarbeitung	59
4.3	Anforderungen an das Condition-Monitoring-System	60
5	Versuchsträger für die Untersuchung mit Acoustic Emission	63
5.1	Verwendete Acoustic Emission Messkette	63
5.2	1-Achs-Axiallager-Prüfstand	66
5.3	2-Achs-KGT-RZA-Prüfstand	67
5.4	5-Achs-Prüfstand	70
5.5	Aufbau und Integration der Messtechnik am Kugelgewindetrieb	71
6	Vorversuche zur Überwachung des Wälzkontakts	77
6.1	Untersuchung von Acoustic Emission Sensorelementen	77
6.2	Untersuchung am Beispiel des Axialwälzlagers	80
7	Entwicklung des Unsupervised Condition-Monitoring-Systems	86
7.1	Teilsystem Sensierung	89
7.2	Teilsystem Vorverarbeitung	90
7.3	Teilsystem Segmentierung	91
7.4	Teilsystem Merkmalsextraktion	96
7.4.1	Gegenüberstellung von Merkmalen einschließlich Rekonstruktionsfehler	97
7.4.2	Auto-Konfiguration von Autoencodern für die Anomaliedetektion	103
7.5	Teilsystem Clusterbildung	115
7.6	Teilsystem Cluster-Tracking	121
8	Validierung des Unsupervised Condition-Monitoring-Systems	132
8.1	Unsupervised Architekturvarianten	134
8.2	Untersuchung des Kugelgewindetriebs mit Acoustic Emission	137
8.3	Unsupervised Condition-Monitoring in den Validierungsexperimenten	149
8.3.1	Visualisierung des Cluster-Tracking-Prozesses im CM-System	151
8.3.2	Szenario 1 – Geschwindigkeitsstufen	155
8.3.3	Szenario 3 – Mangelschmierung	162
8.3.4	Szenario 4 – Partikeleinbringung	167
8.3.5	Szenario 6 – Vorspannungsstufen bei verschiedenen Drehzahlen	172

8.3.6	Detektionsgüte der Architekturvarianten für unterschiedliche Szenarien	179
8.4	Verbesserung der Segmentierung durch domänenbasierte Konfiguration	185
8.5	Übertragbarkeit der Anomalieerkennung auf andere Problemstellungen	188
8.5.1	Übertragbarkeit des CM-Systems am Beispiel Axiallager	189
8.5.2	Übertragbarkeit des CM-Systems am Beispiel Motorstrom und Temperatur	192
9	Bewertung	195
9.1	Bewertung von Acoustic Emission zur Diagnose von Wälzkontakten	195
9.2	Bewertung der Unsupervised Strategie	197
9.2.1	Bewertung der Autoencoder für Anomalie- und Zustandserkennung	201
9.2.2	Bewertung des Cluster-Boundary-Trackings	202
9.3	Beantwortung der Forschungsfragen	203
10	Zusammenfassung	206
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	XXIII
	Tabellenverzeichnis	XXX
	Anhang	XXXI
	Veröffentlichungen des Autors	I