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

Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 263

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

Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 263

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

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. Tobias Schlagenhauf

Tag der mündlichen Prüfung:	07.11.2022
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Benjamin Noack

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 978-3-8440-8875-5
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

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferates. Ganz besonders möchte ich Prof. Fleischer für die wertvollen fachlichen Diskussionen, den überfachlichen Austausch sowie seine ständige Förderung bedanken. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Benjamin Noack für die Übernahme des Koreferates und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Danken möchte ich ihm speziell für den stets angenehmen fachlichen Austausch sowie seinem Engagement zur Verzahnung der (produktions-)technischen, informationstechnischen und mathematischen Domänen. Weiterhin danken möchte ich Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Mein besonderer Dank gilt allen Studierenden sowie Kolleginnen und Kollegen des wbk, welche mit mir stets in gutem fachlichem Austausch standen und ohne diese die erfolgreiche Durchführung dieser Dissertation ungleich schwerer gewesen wäre. Hier gilt mein besonderer Dank den Kollegen Jonas Hillenbrand, Malte Hansjosten, David Barton und Benedikt Klee. Für die technische Unterstützung in IT und Werkstatt gilt mein Dank allen Mitarbeitenden der Service-Center IT und Technik. Hierbei seien vor allem Aaron Schmidt und Friedbert Mathes betont, welchen ich für die Unterstützung beim Aufbau und Betrieb meines Versuchsstandes danken möchte. Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie und vor allem bei meinen Eltern Eckhard und Andrea Schlagenhauf sowie meinen Schwiegereltern Stefan und Dietlinde Schick für deren fortwährende Unterstützung während des Verfassens der Dissertation bedanken. Meiner Frau Rebecca Leonie danke ich von ganzem Herzen, dass sie mir stets Stütze und Gesprächspartnerin war. Ganz besonders danke ich ihr für unsere beiden Kinder Leni Frieda und Leonard Theo, die für mich stets Leuchttürme während des Verfassens dieser Dissertation waren.

Karlsruhe, 15.07.2022

Tobias Schlagenhauf

Abstract

For the realization of autonomous production machines, it is necessary to enable them to independently assess the condition of their components and, in a medium-term step, inform the maintenance department about it. This requires methods that allow the reliable estimation of the condition of machine components. For the realization of a predictive maintenance strategy, it is also necessary to analyze and understand the wear progression of machine tool components in order to develop prognosis models on that basis.

As a commonly used and highly stressed machine tool component, the ball screw drive (BSD) plays a central role for the reliable operation of autonomous production machines. Previous work on condition monitoring of BSDs has been based on the indirect interpretation of the wear characteristics. In addition, the development of surface defects on the BSD has not been documented and investigated in image data yet, which has prevented the reliable implementation of a prognosis model based on direct wear signals.

The approach presented in this work documents the entire wear development on the surface of the BSD up to the mechanical failure of the component for the first time in image data. On this basis, the classification of the damage is investigated using machine learning methods for the first time, thus creating the basis for a reliable condition monitoring system. Based on this, a wear forecasting system is investigated. The functionality of the forecasting system could be demonstrated for the first time on image data of the BSD. The investigations are extended by experiments on data efficient classification by investigating a novel approach for data efficient classification of image data. The so called SBF-Net approach is validated on images of ball screw drives as well as on image data of other technical and non-technical domains. The superiority of the approach compared to state of the art models could be demonstrated.

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Formelzeichen & Abkürzungen IV

Begriffsklärungen & Vorbemerkungen V

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung 3

1.3 Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen 7

2.1 Tribologie 7

2.1.1 Reibung und Verschleiß 7

2.1.2 Verschleißmechanismen 9

2.2 Tribologisches System Kugelgewindetrieb 13

2.2.1 Verschleißmechanismen am Kugel-Laufbahn-Kontakt 15

2.2.2 Ausfallmechanismen am Kugelgewindetrieb 20

2.2.3 Lebensdauer des Kugelgewindetriebs 22

2.3 Condition Monitoring und Predictive Maintenance 29

2.3.1 Bedeutung von Condition Monitoring und Predictive Maintenance für den Maschinenbau 30

2.3.2 Ziele und Unterschiede der Ansätze 31

2.3.3 Implementierung von Condition Monitoring und Predictive Maintenance 32

2.4 Bildverarbeitung zur Klassifikation 33

2.4.1 Sensierung und Merkmalsextraktion 34

2.4.2 Bildmerkmale 35

2.4.3 Mustererkennung und Merkmalsgenerierung 38

2.4.4 Neuronale Netzwerke zur Klassifikation 40

2.4.5 Convolutional Neural Networks zur Klassifikation 46

3 Stand der Forschung und Technik 56

3.1 Bildbasierte Defekterkennung auf metallischen Oberflächen 56

3.2 Verschleißüberwachung an Maschinenelementen 61
3.2.1 Körperschall 62
3.2.2 Luftschall 63
3.2.3 Motorstrom 64
3.2.4 Temperatur 65
3.3 Relevante Arbeiten zur Verschleißüberwachung am Kugelgewindetrieb 66
3.4 Bewertung des Standes der Forschung und Technik 74
3.4.1 Fazit zum Stand der Forschung und Technik 74
3.4.2 Aktuelle Defizite im Stand der Forschung und Technik 75
4 Zielsetzung und Lösungsansatz 77
4.1 Konkretisierung der Zielsetzung 77
4.2 Übersicht zum Lösungsansatz 78
5 Experimentelle Datengenerierung 81
5.1 Lebensdauerversuchsstand 81
5.2 Versuchsdurchführung 82
5.3 Sensorsystem zur Bilddatengenerierung 84
5.3.1 Einflussgrößen und Anforderungen an das Sensorsystem 85
5.3.2 Konzeption des Sensorsystems 87
5.3.3 Aufnahme von Bilddaten 92
5.4 Bilddatensatz 94
6 Datenanalyse und Modellbildung 97
6.1 Analyse der Entwicklung von Pittings 97
6.1.1 Verschleißerscheinungsformen auf der Laufbahn des Kugelgewindetriebes 98
6.1.2 Verschleißpartikel im Schmierstoff 99
6.1.3 Die Entstehung von Pittings 102
6.1.4 Empirische Analyse der Entwicklung von Pittings 108
6.1.5 Normbasierte Präzisierung der Verschleißquantifizierung 120
6.1.6 Diskussion der Erkenntnisse im Kontext bestehender Arbeiten 122
6.1.7 Visuelle Charakteristika der Verschleißerscheinungsform Pitting 128

6.2 Klassifikation von Oberflächenzerrüttung in den Bilddaten des Kugelgewindetriebes 132
6.2.1 Grundüberlegungen zur Auswahl von Klassifikationsansätzen 133
6.2.2 Klassifikation mittels extrahierter Merkmale 136
6.2.3 Klassifikation mittels Convolutional-Neural-Network-Architekturen 151
6.2.4 Dateneffiziente Klassifikation in technischen Domänen 165
6.2.5 Fazit zu der Klassifikation von Oberflächenzerrüttung 187
7 Verschleißprognose 191
7.1 Grundüberlegungen 191
7.2 Positionsbestimmung und Quantifizierung 193
7.3 Integration von Domänenwissen 197
7.4 Prognose 200
7.4.1 Auswahl der Prognosefunktion 200
7.4.2 Validierung des Prognosesystems 204
7.5 Fazit zu der Verschleißprognose im Kontext bestehender Arbeiten 210
7.6 Erweiterung der Zustandsüberwachung am KGT 213
8 Bewertung 215
8.1 Zusammenfassung 215
8.2 Ausblick 218
Publikationsliste des Autors I
Literaturverzeichnis III
Abbildungsverzeichnis XXXVI
Tabellenverzeichnis XLV
Anhang XLVI
A1 Backpropagation im Neuronalen Netzwerk XLVI
A2 Backpropagation in der Convolutional Base XLVII
A3 Ergänzende Materialien XLIX