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

Andreas Spohrer

# Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 225

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

Andreas Spohrer

# Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 225

# Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Andreas Spohrer

aus Eberbach

| | |
|---|---|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 02.05.2019 |
| Hauptreferent: | Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer |
| Korreferent: | Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring |

**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 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6798-9
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

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 inspirierenden fachlichen Diskussionen und die persönliche Förderung, welche ich insbesondere im Rahmen zahlreicher nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten genießen durfte. Herrn Prof.-Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring danke ich für den wissenschaftlichen Austausch und die Übernahme des Korreferats, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk in Karlsruhe, Shanghai und Suzhou danke ich für die fortwährende Unterstützung in den vergangenen Jahren und den erlebten Zusammenhalt, der sicher auch über die gemeinsame Zeit am Institut hinaus bestehen bleiben wird. Ebenso zum Dank verpflichtet bin ich den technischen Mitarbeitern des wbk sowie allen studentischen Mitarbeitern, die wesentlich zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben. Insbesondere danken möchte ich Jacques Burtscher, Quirin Spiller, Simon Koch, Urs Leberle, Friedbert Mathes, Manuel Baumeister, Manuel Peter, Florian Sell-Le Blanc, Benedikt Klee, Bastian Rothaupt, Ramona Singer, Janna Hofmann, Simon Merz, Jonas Hillenbrand, Christopher Ehrmann, Marius Dackweiler, Paul Ruhland, Sven Coutandin, Robin Kopf, Stefan Treber, Christoph Liebrecht, Jan Schwennen, Philipp Gönnheimer, Dominik Mayer, David Barton und László Leitold.

Für die persönliche Förderung und seine fortwährende Unterstützung in akademischen und persönlichen Belangen danke ich Dr.-Ing. Thomas Herlan.

Meinen besonderen Dank möchte ich abschließend meiner Familie zukommen lassen, die mir in den zurückliegenden Jahren jederzeit den notwendigen Rückhalt gegeben und mir dadurch mein Studium und die daran anschließende Promotion erst ermöglicht hat. Ich danke daher allen voran meinen Eltern Christa und Ralf Spohrer, meiner Frau Kathrin, Kai mit Simone, Nicolai mit Sophie sowie Sabine und Gerd Wagner.

Karlsruhe, 02.05.2019 Andreas Spohrer

## Abstract

Ball screws are the most commonly used design elements in modern machine tools for converting the motion of rotatory electric drives into precise feed movements. At the same time, ball screws are currently the main cause of unforeseen machine failures in industrial applications, which significantly reduce the technical availability and productivity of machine tools.

While former research on increasing the technical availability of ball screws has focused in particular on the development of condition monitoring systems for wear detection, the present dissertation aims at actively reducing wear by means of adaptive lubrication.

The dissertation starts with a presentation and evaluation of the current state of research and technology in the subject area. It then describes the design of an innovative adaptive lubrication method based on the identified deficits in the state of research and technology. As a first step, an analysis of the influences on the lubricant requirements of ball screws is carried out. Based on the prevailing interrelationships of axial load, speed, temperature and friction torque, a friction model suitable for ball screws is then developed and validated. The concept of adaptive lubrication is to compare the actual lubrication condition of ball screws with their ideal condition during operation in order to make the necessary decisions for re-lubrication. For this purpose, a suitable sensor system is developed.

The methodology and the sensor system developed for adaptive lubrication of ball screws are finally validated in laboratory tests. This proves its ability to increase resource efficiency and technical availability compared to conventional lubrication methods.

# Inhaltsverzeichnis

**Inhaltsverzeichnis** **I**

**Formelzeichen** **IV**

**Abkürzungsverzeichnis** **VIII**

**1 Einleitung** **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 2

**2 Stand der Technik und Forschung** **5**

2.1 Einsatz von KGT in Werkzeugmaschinen 5

2.2 Normgerechte Lebensdauerberechnung von KGT 7

2.3 Verschleiß- und Ausfallverhalten von KGT 9

2.3.1 Vorspannung und axiale Steifigkeit 10

2.3.2 Reibung in Wälzkontakten 12

2.3.3 Relevante Schadensmechanismen und Ausfallformen 14

2.4 Modellbasierte Diagnose und Prognose von KGT 19

2.4.1 Belastungsorientierte Ansätze 19

2.4.2 Zustandsorientierte Ansätze 20

2.5 Schmierung von KGT 25

2.5.1 Schmierung nach Herstellerempfehlung 27

2.5.2 Ansätze zur bedarfsgerechten Schmierung 30

2.6 Predictive Maintenance im Kontext von Industrie 4.0 31

2.7 Bewertung des Stands der Technik und Forschung 34

2.7.1 Fazit zum Stand der Technik und Forschung 34

2.7.2 Aktuelle Defizite in Technik und Forschung 35

**3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise** **39**

3.1 Präzisierung der Zielsetzung 39

3.2 Vorgehensweise zur Zielerfüllung 39

**4 Einflussanalyse auf den Schmierstoffbedarf von KGT** **42**

4.1 Handlungsfeld zur Steigerung der Lebensdauer und Verfügbarkeit von KGT 42
4.2 Wirkzusammenhänge von Betriebslasten und KGT-Eigenschaften 45
4.2.1 Betrachtung des Reibmoments aus irreversibler Verformungsarbeit 47
4.2.2 Betrachtung der hydrodynamischen Rollreibung 49
4.2.3 Betrachtung der Bohrreibung 50
4.2.4 Erarbeitung eines Reibmodells für KGT 56
4.2.5 Berücksichtigung des Temperaturverhaltens im Reibmodell für KGT 58
4.2.6 Validierung des Reibmodells für KGT 60
4.3 Ableitung von Indikatoren zur Schmierstoffbedarfsdetektion 66
**5 Konzeption der adaptiven Schmierung von KGT 71**
5.1 Verfahren zur adaptiven Schmierung von KGT 71
5.2 Sensorische Detektion des KGT-IST-Schmierzustands 74
5.2.1 Systemanforderungen und Sensorauswahl 74
5.2.2 Konstruktive Gestaltung des Sensorträgers 77
5.2.3 Topographieoptimierung und Skalierungsmethodik zur Anpassung für gängige Baugrößen 81
5.2.4 Inbetriebnahme und Kalibrierung der Sensoreinheit 94
5.2.5 Beurteilung der Messqualität 100
5.3 Modellierung des KGT-SOLL-Schmierzustands 103
5.3.1 Modellierungskonzept 103
5.3.2 Berücksichtigung der Schmierhistorie 107
5.3.3 Berücksichtigung verschleißbedingter Änderungen über den Lebenszyklus 108
**6 Technischer Aufbau & Validierung des adaptiven Schmiersystems für KGT 113**
6.1 Technischer Aufbau der adaptiven Schmiereinheit 114
6.1.1 Auswahl der Auswerteelektronik 114
6.1.2 Auswahl des Schmierstoffgebers 117
6.2 Validierung unter statischen Lastbedingungen 119
6.2.1 Versuchsaufbau für statische Lebensdauerversuche 120
6.2.2 Versuchsdurchführung statischer Lebensdauerversuche 122

6.2.3 Ergebnisse der statischen Lebensdauerversuche 125
6.3 Validierung unter dynamisch veränderlichen Lastbedingungen 136
6.3.1 Versuchsaufbau für dynamisch veränderliche Lastbedingungen 136
6.3.2 Versuchsdurchführung unter dynamisch veränderlichen Lastbedingungen 137
6.3.3 Ergebnisse der dynamischen Versuche 138
6.4 Zusammenfassende Bewertung der Validierung 143
**7 Zusammenfassung und Ausblick 146**
7.1 Zusammenfassung 146
7.2 Ausblick 149
**Literaturverzeichnis IX**
**Abbildungsverzeichnis XXIII**
**Tabellenverzeichnis XXIX**
**Anhang XXX**
**Lebenslauf XLIV**

# Formelzeichen

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|---|---|---|
| $\mu_B$ | Bohrreibungskoeffizient | [-] |
| $\mu_{EHD}$ | Elastohydrodynamischer Reibungskoeffizient | [-] |
| a | Kontaktlänge | [m] |
| $A_{ax}$ | Summe der axialen Schnittflächen des Sensorträgers zur Axialkraftmessung | [mm²] |
| $A_d$ | Summe der diagonalen Schnittflächen des Sensorträgers zur Momentenmessung | [mm²] |
| $A_{ges}$ | Summe der axialen und diagonalen Schnittflächen des Sensorträgers | [mm²] |
| $A_R$ | Reibungsarbeit | [J] |
| $A_{RB}$ | Bohrarbeit | [J] |
| $A_{RG}$ | Gleitarbeit | [J] |
| $A_{Ring}$ | Schnittfläche Sensorträgerring | [mm²] |
| $A_{RR}$ | Rollarbeit | [J] |
| b | Kontaktbreite in Rollrichtung | [m] |
| $C_a$ | Dynamische axiale Tragzahl | [N] |
| $C_{dyn}$ | Zulässige dynamische axiale Tragzahl | [N] |
| $d_0$ | Nenndurchmesser Spindel | [mm] |
| $D_1$ | Außendurchmesser der KGT-Mutter | [mm] |
| $D_w$ | Nenndurchmesser der Kugeln | [mm] |
| E | E-Modul | [GPa] |
| f | Reibungszahl | [-] |
| $F_a$ | Axialkraft | [N] |
| $F_e$ | Extern eingebrachte Axialkraft | [N] |
| $F_m$ | Äquivalente dynamische axiale Belastung | [N] |

| | | |
|---|---|---|
| $F_R$ | Reibungskraft | [N] |
| $f_{rn}$ | Schmiegung KGT-Mutter zu Kugeln | [-] |
| $f_{rs}$ | Schmiegung KGT-Spindel zu Kugeln | [-] |
| $h$ | Schmierfilmhöhe | [m] |
| $i$ | Anzahl der Umläufe in der Mutter | [-] |
| $L_{10}$ | Nominelle Lebensdauer | [Umdrehungen] |
| $l_m$ | Mutterlänge | [mm] |
| $M_{B,K}$ | Reibmoment aus Bohrreibung pro Kontaktstelle | [Nm] |
| $M_R$ | Reibmoment | [Nm] |
| $M_{R,BR}$ | Reibmoment aus Bohrreibung | [Nm] |
| $M_{R,HR}$ | Reibmoment aus hydrodynamischer Rollreibung | [Nm] |
| $M_{R,IV}$ | Reibmoment aus irrevers. Verformungsarbeit | [Nm] |
| $n$ | Drehzahl | [$min^{-1}$] |
| $n_K$ | Drehzahl der Wälzkörpermittelpunkte | [$min^{-1}$] |
| $n_m$ | Äquivalente Drehzahl | [$min^{-1}$] |
| $n_S$ | Spindeldrehzahl | [$min^{-1}$] |
| $p_0$ | Kontaktflächenpressung | [N/mm²] |
| $P_R$ | Reibungsleistung | [W] |
| $P_w$ | Steigung | [mm] |
| $q$ | Zeitanteil | [%] |
| $Q$ | Flächenkraft | [N/mm²] |
| $Q_i$ | Normalkraft an Wälzkörper | [N] |
| $r_0$ | Nennradius | [m] |
| $r_a$ | Radius der äußeren Kontaktstelle | [m] |
| $r_{aS}$ | Ringaußenradius des Sensorträgers | [mm] |

| | | |
|---|---|---|
| $r_{eff}$ | Effektiver Wälzkörperradius | [m] |
| $r_i$ | Radius der inneren Kontaktstelle | [m] |
| $r_{iS}$ | Ringinnenradius des Sensorträgers | [mm] |
| $R_{p\,0,2}$ | Dehngrenze 0,2% | [N/mm²] |
| $r_{WK}$ | Wälzkörperradius | [m] |
| $s_R$ | Gleitweg | [m] |
| $S_{Ring}$ | Stegbreite des Sensorträgers | [mm] |
| $T_{Mutter}$ | Temperatur der KGT-Mutter | [°C] |
| $v_{axial}$ | Axiale Verfahrgeschwindigkeit | [m/s] |
| $v_{hd,M}$ | Hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit an mutternseitiger Kontaktfläche | [m/s] |
| $v_{hd,S}$ | Hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit an spindelseitiger Kontaktfläche | [m/s] |
| $v_K$ | Umfangsgeschwindigkeit des Wälzkörpermittelpunkts | [m/s] |
| $v_{Spindel}$ | Geschwindigkeit in Spindelgewinde | [m/s] |
| Z | Anzahl der Wälzkörper im Kraftfluss | [-] |
| $\alpha$ | KGT-Nenndruckwinkel an Wälzkörpern | [rad] |
| $\beta$ | KGT-Steigungswinkel an Spindel | [rad] |
| $\eta$ | Hertz´scher Koeffizient | [-] |
| $\eta(T,p)$ | Dynamische Viskosität | [Ns/mm²] |
| $\kappa$ | Dämpfungskonstante Wälzkörpermaterial | [-] |
| $\nu$ | Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl | [-] |
| $\xi$ | Hertz´scher Koeffizient | [-] |
| $\pi_B$ | Bohrwinkel | [°] |
| $\pi_R$ | Rollwinkel | [°] |
| $\rho$ | Dichte | [kg/m³] |

| | | |
|---|---|---|
| $\varphi$ | Reibungswinkel | [°] |
| $\Phi_{FS}$ | Korrekturfaktor nach (Baly 2005) | [-] |
| $\omega'_{GM}$ | Winkelgeschwindigkeit der Gewindemutter | [rad/s] |
| $\omega'_{GS}$ | Winkelgeschwindigkeit der Gewindespindel | [rad/s] |
| $\omega_B$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit der Wälzkörper | [rad/s] |
| $\omega_{B,\ außen}$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit an der äußeren Kontaktstelle | [rad/s] |
| $\omega_{B,\ GM}$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit an der Gewindemutter | [rad/s] |
| $\omega_{B,\ GS}$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit an der Gewindespindel | [rad/s] |
| $\omega_{B,\ innen}$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit an der inneren Kontaktstelle | [rad/s] |
| $\omega_{B,\ WK}$ | Bohrwinkelgeschwindigkeit am Wälzkörper | [rad/s] |
| $\omega_{GM}$ | Winkelgeschwindigkeit der Gewindemutter | [rad/s] |
| $\omega_{GS}$ | Winkelgeschwindigkeit der Gewindespindel | [rad/s] |
| $\omega_i$ | Winkelgeschwindigkeit des bewegten KGT-Teils (Spindel oder Mutter) | [rad/s] |
| $\omega_K$ | Winkelgeschwindigkeit der Kugelmittelpunkte | [rad/s] |
| $\omega_S$ | Winkelgeschwindigkeit der Spindel | [rad/s] |
| $\omega_{WK}$ | Wälzkörperwinkelgeschwindigkeit | [rad/s] |

# Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|---|---|
| CAD | Computer-Aided Design |
| CAE | Computer-Aided Engineering |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing |
| CMMS | Computerized Maintenance Management System |
| DMS | Dehnungsmessstreifen |
| ERP | Enterprise-Resource-Planning |
| FA | Fluidische(r) Antrieb(e) |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| ff. | Die Folgenden (lat. folio) |
| KGT | Kugelgewindetrieb(e/en/es) |
| LDA | Lineardirektantrieb(e) |
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical Systems |
| MES | Manufacturing Execution System |
| MKS | Mehrkörper-Simulation |
| RZA | Ritzel-Zahnstangen-Antrieb(e) |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung(en) |
| z.B. | zum Beispiel |