

Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in Verbrennungs- motoren aus fertigungstechnischer Sicht

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

vom Dipl.-Ing. Florian Welzel,
geboren am 04.09.1982 in Bad Belzig,
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski

Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters

Promotionskolloquium am 23.06.2014

Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung Magdeburg

Band 34

Florian Welzel

**Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in
Verbrennungsmotoren aus fertigungstechnischer Sicht**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2968-0

ISSN 1863-0936

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Mein Dank gilt dem Institutsleiter und Lehrstuhlinhaber Zerspantechnik Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski für die intensive Betreuung und Begutachtung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen des Lehrstuhles Zerspantechnik, der mechanischen Werkstatt und den Mitarbeitern der Fertigungsmesstechnik des Institutes für das konstruktive Arbeitsumfeld. Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pieper danke ich sehr für die Motivation und Wegbereitung im Zuge der Themenfindung und -realisierung. Herrn Dr.-Ing. Richard Münder, Herrn Konstantin Risse und Herrn Joachim Döring danke ich für die fachlichen Unterredungen zu dieser Arbeit.

Nur durch zahlreiche Kooperationen innerhalb der Universität und mit externen Instituten und Firmen konnte die vorliegende Arbeit erfolgreich durchgeführt werden. Daher danke ich primär dem Lehrstuhl für Tribologie des Institutes für Maschinenkonstruktion, Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters und Herrn Matthias Schorgel, für die Unterstützung auf Seiten tribologischer Fragestellungen. Weiterhin gilt mein Dank dem Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, im Speziellen Frau Jun.-Prof. Dr.-Ing. Manja Krüger. Für die durchgeführten Analysen danke ich dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover und dem Institut für Oberflächen- und Schichtanalytik GmbH (IFOS) Kaiserslautern. Auf Seiten der industriellen Forschungspartner gilt mein Dank der Daimler AG in Person Dr. Stefan Schweickert für die interessanten Diskussionen.

Magdeburg, 01. Juli 2014

Florian Welzel

Kurzfassung

Eine Vielzahl aktueller wissenschaftlicher Arbeiten zeigt die Bedeutung und Möglichkeiten einer effektiven Konditionierung tribologischer Kontakte zur Minimierung von Reibung und Verschleiß respektive einer Leistungssteigerung tribologisch hochbelasteter Bauteile auf. Durch geringe Modifikationen der Endbearbeitung können daher positive Effekte zur Lebensdauersteigerung bzw. Verlustleistungsreduzierung generiert werden. Aus diesem Ansatz heraus wird exemplarisch am tribotechnischen System Kolbenring/Zylinderlauffläche von Verbrennungsmotoren das Optimierungspotential aus fertigungstechnischer Sicht beleuchtet. Neben effektiven Verfahren zur Applizierung definierter Strukturen zur Schmierstoffspeicherung und somit zur Steigerung der hydrodynamischen Tragfähigkeit der Lauffläche in Kombination mit erhöhter Fresssicherheit werden alternative Fertigungs- und Konditionierverfahren vorgestellt und näher untersucht. Ein spezieller Aspekt gilt der Bewertung von mechanischen und chemischen Modifikationen oberflächennaher Schichten, welche neben der Topografie als repräsentativer Indikator zur Beschreibung der Funktionalitäten produzierter Oberflächen dienen. Als probates Mittel zur Bewertung und Beschreibung von Fertigungsprozessen wurde eine Prozesskraftmessung für das vertikale Langhubhonen entwickelt. Die vorliegende Arbeit verbindet Betrachtungen zur Fertigungstechnik mit tribologischen Prüfungen und zeigt somit Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Prozesscharakteristiken der Produktion und dem Einsatzverhalten der untersuchten Bauteile auf.

Abstract

A variety of current scientific work shows the importance and possibilities of an effective conditioning of tribological loaded contacts to minimize friction and wear or to increase the performance of these tribological highly stressed components. By slight modifications of the finishing process positive effects resulting in an increase of technical lifetime or a decrease of power dissipation can therefore be generated. Based on this approach the tribological contact piston ring/cylinder liner running surface of internal combustion engines is examined to realise an efficient production. Therefore, alternative production and conditioning processes are introduced and investigated. Furthermore, various methods for the generation of defined structures for lubrication storage and thus to increase the hydrodynamic bearing capacity in combination with an increased scuff resistance are presented. A special aspect is considered in the evaluation of mechanical and chemical modifications of near-surface or boundary layers, which are used in addition to the topography as a representative indicator for the description of the functionalities of manufactured surfaces. As an effective tool for the evaluation and description of manufacturing processes, a process force measurement for the vertical long-stroke honing was developed. The present work combines considerations on production engineering and tribological tests, thus showing the relationships and dependencies between the process characteristics of the production and the tribological behavior of components.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Formelzeichen	XI
Abkürzungen	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
2 Vorbetrachtungen und Stand des Wissens	5
2.1 Das tribologische System der Kolbengruppe	5
2.1.1 Reibung	6
2.1.2 Verschleiß	9
2.1.3 Prozesse in der Ausprägung von Grenzschichten	10
2.2 Oberflächennahe Gefügeeigenschaften im Kontext von Reibung und Verschleiß	12
2.2.1 Modelle zum Aufbau oberflächennaher Schichten	12
2.3 Einlauf und Tribomutation	17
2.3.1 Einfluss der Laufflächentopografie auf die tribologischen Eigenschaften	22
2.4 Industrielle Endbearbeitung von Zylinderlaufflächen	23
2.4.1 Grundlagen zum Zerspanverhalten beim Honen	27
2.4.2 Der Einfluss des Kühlschmierstoffes beim Honen	30
2.4.3 Oberflächencharakterisierung	30
2.4.4 Spezielle technologische Entwicklungen beim Honen von Zylinderlaufflächen	32

3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	39
4	Versuchsplan und -durchführung	41
4.1	Definition geeigneter Endbearbeitungs- bzw. Konditionierungsprozesse	44
4.1.1	Ermittlung der während des optimalen Einlaufs umgesetzten Leistung	44
4.1.2	Langhubhonen	46
4.1.3	Bürsten	47
4.1.4	Glattwalzen	51
4.1.5	Konditionierung mittels modifiziertem Honprozess	55
4.2	Tribologische Prüfung	57
4.2.1	Probenpräparation	59
4.2.2	Durchführung der SRV-Versuche	60
4.3	Kraftmessung	63
4.3.1	Analyse des Zerspanprozesses beim Langhubhonen am tribologischen Modellversuch	63
4.3.2	In-Prozess-Kraftmessung beim Langhubhonen	64
4.4	Validierung der Charakterisierungsmöglichkeiten der Grenzschicht	72
4.4.1	Röntgendiffraktometrie und Streuvektormessungen	73
4.4.2	Makrohärte und Nanoindentation	77
4.4.3	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)	81
4.4.4	Elektronenspektroskopie (AES und XPS)	82
4.4.5	Massenspektroskopie (SIMS und SNMS)	85
5	Darstellung der Ergebnisse	87
5.1	Entwicklung alternativer Prozesse zur Strukturierung von Laufflächen	87
5.2	Mechanische Grenzschichteigenschaften und tribologisches Verhalten in Modellversuchen	93
5.3	Modifikationen der Endbearbeitung und das tribologische Verhalten (Versuchsgruppe 1)	97
5.3.1	Tribologische Bewertung	100
5.3.2	Bewertung der mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht	101
5.4	Erweiterung der fertigungstechnischen Variationen (Versuchsgruppe 2)	104
5.4.1	Oberflächenstrukturanalyse	107
5.4.2	Chemische Analyse der Grenzschicht	111

6 Zusammenfassung	117
7 Ausblick	119
Literaturverzeichnis	XV
Studentische Arbeiten mit Betreuung durch den Autor	XXIX
A Anhang	XXXI
A.1 Ermittlung der realen Kontaktfläche	XXXI
A.2 Vergleich der Reibarbeiten und Reibleistungen von Schneidleiste bzw. Honwerkzeug und Kolbenring	XXXIII
A.3 Vergleich des Analogieversuches zum Honen im SRV	XXXIV
A.4 Streuvektormessungen	XXXV