



**Berichte aus dem
Institut für Fertigungstechnik
und Qualitätssicherung
Magdeburg**

**Einfluss des Honens und
spanloser Konditionierprozesse
auf das tribologische Verhalten
der Kolbenring-Zylinder-Paarung**

Konstantin Risse

Einfluss des Honens und spanloser Konditionierprozesse auf das tribologische Verhalten der Kolbenring-Zylinder- Paarung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

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

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Konstantin Risse
geb. am 19.09.1984 in Dessau

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. B. Karpuschewski
Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel

Promotionskolloquium am 21.07.2021

Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung Magdeburg

Band 49

Konstantin Risse

**Einfluss des Honens und spanloser
Konditionierprozesse auf das tribologische Verhalten
der Kolbenring-Zylinder-Paarung**

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2021

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 978-3-8440-8378-1

ISSN 1863-0936

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

Danksagung

Die Promotion entstand im Nachgang an meine von 2012 bis 2019 andauernde Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Instituts für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Professor Karpuschewski für seine Beharrlichkeit, Motivation und fachliche Expertise, die Arbeit zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen. Meinem langjährigen fachlichen Paten und Freund, Dr.-Ing. Florian Welzel, möchte ich für die unzähligen Diskussionen und Hilfestellungen sowie sein Vertrauen herzlich danken. Geprägt, gefördert und unterstützt haben mich die Kolleginnen und Kollegen des IFQ. Hervorzuheben ist die Zeit mit Dr.-Ing. Joachim Döring, die fachlich und freundschaftlich unvergessen bleibt. Ich bin euch allen sehr dankbar.

Einen wesentlichen Beitrag hat die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb der Fakultät für Maschinenbau geleistet. Hier danke ich dem Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie in Person von Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel für den Austausch sowie die Übernahme des Koreferats. Mit dem kreativen Input des Konstruktions- und Motorexperthen Matthias Schorgel wurden viele Fragen beantwortet. Dem Institut für Werkstoff- und Fügetechnik danke ich für die Möglichkeiten der Analysen und die fachlichen Diskussionen mit den Kollegen*innen. Keinen unwesentlichen Beitrag haben die von mir betreuten Studierenden mit deren Abschlussarbeiten geleistet. Es war mir eine Freude euch zu begleiten.

Außerhalb der Universität gilt mein Dank der Daimler AG, DFH Honsysteme GmbH und der Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH für die interessanten Gespräche rund um das Honen. Spezielle Analysen ermöglichte das Institut für Oberflächen- und Schichtanalytik GmbH (IFOS) in Kaiserslautern sowie das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) in Hannover. Bedanken möchte ich mich ebenso bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die durch das SPP 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ die Realisierung meiner Forschungsarbeiten ermöglicht hat.

Für die Zeit der Entbehrung, die Geduld und Rücksicht möchte ich meiner Familie, Freunden und neuen Arbeitskollegen der DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH von Herzen danken. Herauszuheben ist meine Ehefrau Christina - ohne Deine Unterstützung hätte ich es nicht durchgestanden, Du trägst maßgeblichen Anteil am Gelingen der Promotion. Gemeinsam für immer!

Our imagination is stretched to the utmost, not, as in fiction, to imagine things which are not really there, but just to comprehend those things which are there.

- Richard Feynman -

Physiker

(* 11. Mai 1918 in New York; † 15. Februar 1988 in Los Angeles)

Kurzfassung

Die Kolbenring-Zylinder-Paarung trägt im Verbrennungsmotor wesentlich zu den Reibungsverlusten und damit zum Kraftstoffverbrauch bei. Nach dem derzeitigen Stand der Technik wäre es möglich, die Zylinderlauffläche durch einen optimierten Einlauf so zu beeinflussen, dass sich im regulären Betrieb eine sehr kleine Verschleißgeschwindigkeit und geringe Reibung einstellen. Diese Erkenntnis wird in der Praxis jedoch bisher nicht umgesetzt, da ein optimierter Einlauf zeit- und kostenintensiv ist, vom Kunden nicht durchgeführt werden kann und die Gefahr von Spontanausfällen aufgrund erhöhter Bauteilbelastungen besteht. Die beim Einlauf ablaufenden Prozesse auf der Oberfläche und in den oberflächennahen Grenzschichten sind zudem bisher noch nicht vollständig untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Endbearbeitung der Zylinderlauffläche zu analysieren und die Werkstückrandzone so einzustellen, dass diese hinsichtlich Oberflächentopographie, Gefügeausbildung, chemischer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften vergleichbar mit den Verhältnissen nach dem optimierten Einlauf ist und/oder diesen unterstützt, um ähnlich geringe Reibungs- und Verschleißwerte zu erzielen. Dazu sollen die während des Einlaufs ablaufenden Prozesse der Tribomutation untersucht und aus den Erkenntnissen eine optimierte Endbearbeitung abgeleitet werden. Neben der Entwicklung einer vollumfänglichen Messtechnik zur Erfassung aller Prozesskräfte während des Honens wird in experimentellen Analysen bei verschiedenen Parametervariationen der Energieeintrag während der Endbearbeitung mit dem tribologischen Verhalten korreliert. Die tribologische Bewertung erfolgt mittels Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer und befeuerten 1-Zylinder-Floating-Liner-Motor. Darüber hinaus wird ein spezielles Verfahren zur gezielten Vorkonditionierung des Zwickelbereichs entwickelt und getestet. Im Ausblick werden zwei Konzepte zur weiteren Nutzung der Forschungsergebnisse vorgestellt.

Durch die Summe aller Untersuchungen sowie die enge Verzahnung von Forschungstätigkeiten auf den Gebieten der Fertigungstechnik, der Tribologie und der Werkstoffanalytik wird das Verständnis für das komplexe System der Kolbenring-Zylinder-Paarung erweitert.

Abstract

The piston ring / cylinder liner pairing significantly contributes to the friction losses and therefore the fuel consumption of combustion engines. According to the current state of the art, it would be possible to condition the piston ring / cylinder liner pairing by an optimized running-in to set a very small wear rate and low friction during normal operation. However, this fact is not yet been implemented in practice because an optimized running-in is time-consuming and cost-intensive, cannot be carried out by the customer and there is a risk of spontaneous failures due to increased component loads. Furthermore, the processes occurring on the surface and in the boundary layers of the cylinder liner during running-in have not yet been fully investigated.

The aim of this work is to analyze the finish machining of the cylinder running surface and to adjust the workpiece boundary zone in terms of surface topography, microstructure formation, chemical composition and mechanical properties. So, according to the conditions after the optimized running-in, equally low wear rates and comparatively low friction shall be realized. For this purpose, the processes of the tribomutation during the optimized running-in are investigated to derive optimized finish machining processes. Besides the development of a fully comprehensive process force measuring technique during honing, the energy input during finishing is correlated with the tribological behavior in experimental analyses for various parameter variations. The tribological evaluation was realized by means of an oscillating friction-wear tribometer and a fired 1-cylinder floating liner engine. In addition, a special preconditioning process of the top dead center area is developed and tested. In the outlook, two concepts for further utilization of the research results are presented.

The sum of all investigations and the close interlinking of research activities in the fields of production engineering, tribology and materials analysis will expand the understanding of the complex system of piston ring-cylinder pairing.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	XV
Verwendete Abkürzungen	XVII
Verwendete Formelzeichen	XXI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Erkenntnisse	4
2.1 Grundlagen	4
2.1.1 Einordnung der Themenstellung	4
2.1.2 Tribologie und Einlauf	7
2.1.3 Kolbenring-Zylinder-Paarung.....	15
2.1.4 Honen	18
2.2 Endbearbeitungsverfahren im Kontext einer tribologischen Optimierung.....	24
2.3 Zylinderlaufflächenfertigung und tribologisches Verhalten	29
3 Aufgabenstellung und Zielformulierung	35
3.1 Aufgabenstellung	35
3.2 Zielformulierung	37
4 Versuchsplanung und -durchführung	39
4.1 Experimentelle Randbedingungen	39
4.1.1 Versuchswerkstücke	39
4.1.2 Fertigungstechnisches Equipment	44
4.1.3 Tribologische Methoden	50
4.1.4 Messtechnik und Analytik	55
4.2 Entwicklungen und Vorversuche	62

4.2.1	RRV-Analogieversuche	62
4.2.2	Reibleistungsgenerator zur Konditionierung des Zwickelbereichs.....	68
4.2.3	Entwicklung sensorisches Honwerkzeug	74
4.2.4	Vorbereitung Kühlschmierstoffvariation	79
4.2.5	Anpassung des Konditionierwerkzeugs	79
4.2.6	Bestimmung des Anpressdrucks	80
4.3	Versuchsreihen	81
4.3.1	Versuchsreihe 1 – Variation der Eingangsgrößen	82
4.3.2	Versuchsreihe 2 – Messung der Schnittnormalkraft	83
4.3.3	Versuchsreihe 3 – Vorkonditionierung der Zylinderlauffläche	84
4.3.4	Versuchsreihe 4 – Untersuchungen im Floating Liner Motor (FLM) ..	86
5	Ergebnisdarstellung	88
5.1	Variation der Eingangsgrößen.....	88
5.1.1	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	88
5.1.2	Einfluss des Werkstoffs	99
5.1.3	Einfluss des Kühlschmierstoffs.....	102
5.1.4	Zusammenfassung des tribologischen Verhaltens	105
5.2	Messung der Schnittnormalkraft.....	105
5.3	Vorkonditionierung der Zylinderlauffläche.....	109
5.3.1	Vorkonditionierung während des Endbearbeitungsprozesses	109
5.3.2	Vorkonditionierung außerhalb des Endbearbeitungsprozesses.....	114
5.3.3	Zusammenfassung der Vorkonditionierung	128
5.4	Untersuchungen im Floating Liner Motor (FLM)	129
5.4.1	FLM-Versuchsreihe I.....	129
5.4.2	FLM-Versuchsreihe II.....	135
5.4.3	Analytik FLM-Versuchsreihen I+II	140
5.4.4	Zusammenfassung der FLM-Versuchsreihen	144
6	Zusammenfassung	145

6.1	Vorgaben für energetisch optimierte Fertighonprozesse (Teilziel 1).....	146
6.2	Validierung eines sensorischen Honwerkzeugs (Teilziel 2)	147
6.3	Vorkonditionierung von Zylinderlaufflächen (Teilziel 3).....	148
6.4	Bewertung in Floating-Liner-Versuchen (Teilziel 4).....	149
7	Ausblick	152
7.1	DMS zur Bestimmung der Schnittnormalkraft beim Honen	152
7.2	Konzeptentwurf zur Vorkonditionierung im Bearbeitungszentrum	155
	Literaturverzeichnis	157
	Anhangsverzeichnis	180

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Von der Primär- zur Antriebsenergie unter Berücksichtigung der Verluste („well to wheel“) nach [Kirs17]	2
Bild 1.2:	Prognose zum weltweiten Fahrzeugabsatz im Jahr 2030 auf Basis mehrerer Schätzungen nach [PA18b].....	3
Bild 2.1:	Zentrale Entwicklungsziele und mögliche Strategien am Beispiel der Optimierung des tribologischen Systems Kolbenring/Zylinderlauffläche durch Korrelation von Endbearbeitung und Einlauf.....	5
Bild 2.2:	Stribeck-Kurve (links) sowie Reibungs- und Verschleißmechanismen (rechts) nach [CzHa15] und [Saeu18]	8
Bild 2.3:	Aufbau der Randzone einer technischen Oberfläche.....	10
Bild 2.4:	Wechselseitige Beeinflussung und Rückkopplung von Reibung, Verschleiß und Randzonenmaterial aus dem tribologischen System mit den entsprechenden Mechanismen nach [Pöhl09] und [Welz14].....	14
Bild 2.5:	Verschleißkurven der mit RNT untersuchten 4-Zylinder-Dieselmotoren (oben) sowie Verschleißbilder und gemessene Verschleißtiefe (unten) im Zwickelbereich (OT) der Zylinder nach [Riss17].....	17
Bild 2.6:	Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten bei Honen mit typischer Kreuzriefenstruktur der Oberfläche nach [Pauc08]	19
Bild 2.7:	Beispielhafte Zylinderlaufflächen mit unterschiedlicher Oberflächentopografie nach [Karp16a].....	22
Bild 2.8:	Systembetrachtung und Zusammenhänge zwischen Zylinderlaufflächenfertigung (links) und Kolbenring-Zylinder-Paarung (rechts).....	24
Bild 2.9:	Funktionseigenschaften und Einteilung technischer Oberflächen (links, nach [Bruz08] und [Jian12]) sowie Beispiel einer multiskaligen Oberfläche (IFQ, eigene Darstellung).....	25
Bild 2.10:	3D-Rauheitsparameter (oben) sowie Schnittkraft F_c im letzten Bearbeitungsschritt und prozentuale Reibungsreduktion im SRV-Versuch (unten) für die Endbearbeitungsvariationen nach [Riss17].....	33
Bild 3.1:	Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit	36
Bild 3.2:	Definition von Haupt- und Teilzielen sowie Zuordnung zu den experimentellen Versuchsreihen.....	38
Bild 4.1:	Übersicht verwendeter Probenkörper und Präparation der SRV-Proben	40
Bild 4.2:	Mikroskopaufnahmen des lamellaren GJL 250 (links) und vermicularen GJV 400 (rechts) vor und nach Kornflächenätzung mit typischen Gefügebestandteilen	41
Bild 4.3:	Mikroskopaufnahmen des GJL 250 Grundgefüges mit charakteristischen Bestandteilen: a) ternäres und b) pseudobinäres Phosphideutektikum, c) Widmannstättische Graphitlamellen, d) Graphitzentren	42
Bild 4.4:	Mikroskopaufnahmen der beschichteten Zylinderlauffläche aus $FeC0,8\%$ mit verschiedenen Zerstäubergasen und Martenshärte im Vergleich zu GJL 250 und GJV 400.....	43

Bild 4.5:	Vertikalhonmaschine Fa. Nagel „Variophone VSM 8-60 SV-NC“ und integrierte Kraftmessplattform zur Bestimmung von F_{ca} und F_{ct}	45
Bild 4.6:	Fertighonwerkzeug (links) sowie REM- und Topografie-Aufnahmen (rechts) der beiden Schneidstoffe D15/118/X33/75 und SiC400Ke20 vor und nach dem Einsatz.....	46
Bild 4.7:	Aufspannsituation für Zylinderliner-Geometrie 1 und 2.....	47
Bild 4.8:	Beispielhafte Daten der maschinenseitigen Aufzeichnung mittels „ScopeView“	48
Bild 4.9:	Aufbau und beispielhaftes Messergebnis der Kalibrierung der Schnitttangetialkraft F_{ct}	49
Bild 4.10:	Exemplarisches Messergebnis beim Fertighonen mit typischem Kraftverlauf von F_{ca} und F_{ct} (oben) sowie Position des Honwerkzeuges im Zylinderliner über der Hubposition (unten)	50
Bild 4.11:	Aufbau und Parameter des SRV-Tribometers am IMK, Testbedingungen, typischer Kurvenverlauf des Reibungskoeffizienten über der Versuchslaufzeit mit Bereich der Mittelwertbildung und Tragbild bzw. Verschleißspur an einer Probe.....	52
Bild 4.12:	Aufbau und Parameter der RRV-Tests sowie konstruierte Probenaufnahme	53
Bild 4.13:	Aufbau und Parameter des 1-Zylinder Floating Liner Motors (FLM) am IKAM	54
Bild 4.14:	Übersichtsbild zu allen eingesetzten Analysemethoden	55
Bild 4.15:	Probenorientierung im Goniometer Xstress G2R und grundlegende Zusammenhänge der röntgenografischen Eigenspannungsmessung	59
Bild 4.16:	Focused Ion Beam-System 200xP, Fa. FEI (oben), schematischer Aufbau (links unten) und beispielhafte Cross-Section einer gehonten Oberfläche (rechts unten).....	60
Bild 4.17:	Beispielhafte SIMS-Analyse und Vorgehen zur Mittelwertbildung der Elementkonzentration im Randzonenbereich bis $0,2 \mu\text{m}$	62
Bild 4.18:	Rauheitsparameter vor und nach der Endbearbeitung im RRV-Analogieprüfstand für drei Schneidstoffe (I-III) und sechs KSS (A-F)	64
Bild 4.19:	Gegenüberstellung von Schleifkraftverhältnis und Zeitspannungsvolumen während der Bearbeitung für Versuche im RRV-Analogieprüfstand (Referenz siehe Bild 4.18).....	65
Bild 4.20:	Gegenüberstellung von Schleifkraftverhältnis während der Bearbeitung und Reibungskoeffizient im Betrieb für Versuche im RRV-Analogieprüfstand.....	66
Bild 4.21:	Oberflächen nach Endbearbeitung und tribologischer Prüfung im RRV-Analogieprüfstand.....	67
Bild 4.22:	Beispielhafter Verlauf von Zylinderdruck, Reibleistung und Kolbenreibkraft für ein gesamtes Arbeitsspiel bei Volllast im FLM	69
Bild 4.23:	Reibleistungsgenerator und Schnittdarstellung (oben) sowie beispielhafte Oberfläche nach Konditionierung des Zwickelbereichs (unten).....	71
Bild 4.24:	Bestimmung der umgesetzten Reibleistung zur Validierung der analytischen Auslegung des RLG	74

Bild 4.25: Versuchsaufbau und exemplarische Messergebnisse der Analogieversuche zum Honen beim Außenrund-Längsschleifen zur Validierung der sensorischen Honleiste	77
Bild 4.26: Sensorisches Honwerkzeug und mitrotierendes Messequipment	78
Bild 4.27: Konditionierwerkzeug auf Basis eines Honwerkzeuges bestückt mit Hartmetalleisten	80
Bild 4.28: Ablauf bei der Versuchsdurchführung mit Analyse der Zylinderlauffläche nach Endbearbeitung, SRV- und FLM-Test	82
Bild 4.29: Versuchsplan für Versuchsreihe 1 – Variation der Eingangsgrößen	83
Bild 4.30: Versuchsplan für Versuchsreihe 2 – Messung der Schnittnormalkraft	84
Bild 4.31: Versuchsplan für Versuchsreihe 3a – Vorkonditionierung der Zylinderlauffläche während der Endbearbeitung (im Prozess)	85
Bild 4.32: Versuchsplan für Versuchsreihe 3b – Vorkonditionierung der Zylinderlauffläche außerhalb der Endbearbeitung (im RLG)	86
Bild 4.33: Versuchsplan für Versuchsreihe 4 – Untersuchungen im Floating Liner Motor	87
Bild 5.1: Schnittkraft F_c beim Fertighonen mit SiC400, prozentuale Reibungsreduktion und funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter (links) sowie Oberflächentopografie (rechts) bei Variation von v_c und p_n	89
Bild 5.2: REM-Aufnahmen und EDX-Spots vor und nach dem SRV-Test für Honungen mit Siliziumkarbid (SiC400) bei geringem und hohem Anpressdruck p_n	90
Bild 5.3: FIB-Analysen nach der Endbearbeitung mit hohem Anpressdruck p_n (obere Reihe) und nach dem SRV-Test (untere Reihen) bei geringem und hohem Anpressdruck p_n für Honungen mit Siliziumkarbid (SiC400) (Maßstab größer, Legende der REM-Bilder raus)	91
Bild 5.4: Cross-Sections vor und nach SRV-Test bei den SiC-gehonten Proben bei geringem und hohem Anpressdruck p_n	93
Bild 5.5: EDX-Spots in den Cross-Sections vor und nach SRV-Test bei den SiC-gehonten Proben bei geringem und hohem Anpressdruck p_n	95
Bild 5.6: STEM-Lamellen vor und nach SRV-Test für SiC-Honung mit geringem Anpressdruck $p_n = 0,24 \text{ N/mm}^2$	96
Bild 5.7: STEM-Lamelle der SiC-Honung mit geringem Anpressdruck $p_n = 0,24 \text{ N/mm}^2$ nach dem SRV-Test in Dunkelfeld (DF1) und Großwinkel-Dunkelfeld (HAADF) Aufnahme	97
Bild 5.8: STEM-Lamellen vor und nach SRV-Test für SiC-Honung mit hohem Anpressdruck $p_n = 0,85 \text{ N/mm}^2$	98
Bild 5.9: Schnittkraft F_c beim Fertighonen mit SiC400, prozentuale Reibungsreduktion und funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter (links) sowie Oberflächentopografie (rechts) bei Variation von v_c und p_n für den Werkstoff GJV-400	99
Bild 5.10: Schnittkraft F_c beim Fertighonen mit D15, prozentuale Reibungsreduktion und funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter (links) sowie Oberflächentopografie (rechts) bei Variation von v_c und p_n für den Werkstoff GJV-400	100

Bild 5.11: Schnittkraft F_c beim Fertighonen mit SiC400, prozentuale Reibungsreduktion und funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter (links) sowie Oberflächentopografie (rechts) bei Variation von v_c und p_n für die beschichteten Aluminiumliner (FeC-O/FeC-N)	102
Bild 5.12: Schnittkraft F_c beim Fertighonen mit D15, prozentuale Reibungsreduktion und funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter (links) sowie Oberflächentopografie (rechts) bei KSS-Variation	103
Bild 5.13: Druckeigenstressungen nach der Endbearbeitung mit verschiedenen KSS	104
Bild 5.14: Zusammenhang zwischen Schnittkraft F_c beim Fertighonen, Spitzenrauheit Sp_k und Reibkraft F_R im SRV-Betrieb über alle Prozessmodifikationen in Kapitel 5.1	105
Bild 5.15: Vergleich der Schnittkraftkomponenten F_{ca} , F_{ct} und F_{cn} für die Parametervariation von α , v_c sowie p_n beim Fertighonen mit SiC500 und dem Einsatz des sensorischen Honwerkzeuges	106
Bild 5.16: Exemplarische Schnittkraftverläufe für F_{ca} , F_{ct} und F_{cn} für die Variation des Honwinkels beim Fertighonen mit SiC500 und dem Einsatz des sensorischen Honwerkzeuges	107
Bild 5.17: Funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter für die Parametervariation von α , v_c sowie p_n beim Fertighonen mit SiC500 und dem Einsatz des sensorischen Honwerkzeuges	108
Bild 5.18: Oberflächentopografie sowie Zusammenhang zwischen F_{cn} und Sp_k für die Parametervariation von α , v_c sowie p_n beim Fertighonen mit SiC500 und dem Einsatz des sensorischen Honwerkzeuges	109
Bild 5.19: Funktionsorientierte Rauheit und Rauheitsprofil vor und nach Vorkonditionierung mit Honöl sowie exemplarischer Verlauf der tangentialen und axialen Kraft während des Konditionierprozesses (Rauheitsprofile untereinander und kontraststärker)	110
Bild 5.20: Konditionierkraft F_{KO} (links) sowie Rauheitswerte (rechts) in Abhängigkeit der Phosphor- und Schwefel-Konzentration im Esteröl bei zwei Parametereinstellungen	111
Bild 5.21: Gegenüberstellung von Konditionierkraft, tribologischem Verhalten und Rauheitswerten für die im SRV-Test untersuchten vorkonditionierten Proben (links) sowie ausgewählte Oberflächentopografie (rechts)	112
Bild 5.22: Eigenspannungsdaten ausgewählter vorkonditionierter Proben vor und nach dem SRV-Test	113
Bild 5.23: Oberflächen mit Laufspur nach RLG-Vorkonditionierung	115
Bild 5.24: Funktionsorientierte 3D-Rauheitsparameter und Oberflächentopografie nach dem Fertighonen, nach der Vorkonditionierung im RLG und nach der tribologischen Belastung im SRV-Test	116
Bild 5.25: Tribologische Bewertung der RLG-Vorkonditionierung durch 24 h SRV-Test (links) und Verschleißverhalten über Rktot (rechts)	117
Bild 5.26: EDX-Mappings von zwei im RLG konditionierten Proben D2-R5-13 und D2-R5-25 (links) und EDX-spots in unterschiedlichen Bereichen auf der Oberfläche der Probe D2-R2-13 (rechts)	119

Bild 5.27: SIMS-Analysen der mittleren Elementkonzentration und Sauerstoffkonzentration in der Tiefe von der Referenzhonung D2 sowie zwei im RLG konditionierten Proben D2-R5-13 und D2-R5-25 vor und nach dem SRV-Test.....	120
Bild 5.28: SIMS-Analysen der Konzentrations-Sputteriefenverläufe der Additivelemente P, S, Ca und Zn in der Werkstückrandzone von der Referenzhonung D2 sowie zwei im RLG konditionierten Proben D2-R5-13 und D2-R5-25 vor und nach dem SRV-Test.....	121
Bild 5.29: XRD-Eigenspannungsmessungen nach Endbearbeitung, nach RLG-Vorkonditionierung und nach SRV-Test sowie Eigenspannungstiefenverlauf für die Proben D2 (Hon) und D2-R5-25 (RLG)	122
Bild 5.30: Cross-Sections der Proben D2-R5-13 und D2-R5-25 nach RLG-Vorkonditionierung und nach SRV-Test	123
Bild 5.31: FIB-Präparation (oben) und STEM-Lamelle (unten) der diamantgehonten Referenzprobe D2.....	124
Bild 5.32: STEM-Lamellen und vergrößerte Bildausschnitte der mit geringer Kolbenringvorspannkraft im RLG vorkonditionierten Probe D2-R5-13 vor und nach SRV-Test.....	126
Bild 5.33: STEM-Lamellen und vergrößerte Bildausschnitte der mit hoher Kolbenringvorspannkraft im RLG vorkonditionierten Probe D2-R5-25 vor und nach SRV-Test.....	127
Bild 5.34: STEM-Lamelle der mit hoher Kolbenringvorspannkraft im RLG vorkonditionierten Probe D2-R5-25 in Dunkelfeld (DF3) und Großwinkel-Dunkelfeld (HAADF) Aufnahme	128
Bild 5.35: Funktionsorientierte Rauheit, Schnittkraft und Oberflächentopografie nach der Endbearbeitung in der ersten FLM-Versuchsreihe	130
Bild 5.36: Resultierende Reibmitteldrücke über ein gesamtes Arbeitsspiel (oben) und Reibkraftverläufe für ein Vollstarbeitsspiel bei 1500 min ⁻¹ sowie exemplarische Darstellung der Reibleistungsverteilung für ein Arbeitsspiel für Liner S4 (unten) der ersten FLM-Versuchsreihe.....	133
Bild 5.37: Funktionsorientierte Rauheit, Oberflächentopografie und Rauheitsprofile im OT der ersten FLM-Versuchsreihe nach dem Motorlauf.....	134
Bild 5.38: Oberflächentopografie nach FLM-Test im Zwickelbereich mit Verschleißspur im OT des Kolbenrings (unterer Bereich der Bilder).....	135
Bild 5.39: Funktionsorientierte Rauheit, Schnittkraft und Oberflächentopografie nach der Endbearbeitung in der zweiten FLM-Versuchsreihe	136
Bild 5.40: Resultierende Reibmitteldrücke über ein gesamtes Arbeitsspiel (oben) und Reibkraftverläufe für ein Teillastarbeitsspiel bei 1000 min ⁻¹ (unten) der zweiten FLM-Versuchsreihe	137
Bild 5.41: Resultierende Reibmitteldrücke im RLG vorkonditionierten Bereich (oben) und Reibkraftverläufe für ein Vollstarbeitsspiel bei 1500 min ⁻¹ (unten) der zweiten FLM-Versuchsreihe.....	138
Bild 5.42: Funktionsorientierte Rauheit, Oberflächentopografie und Rauheitsprofile im OT der zweiten FLM-Versuchsreihe nach dem Motorlauf.....	139

Bild 5.43: XRD-Eigen Spannungsmessungen nach unterschiedlicher Endbearbeitung und nach dem FLM-Test; gemessen in verschiedenen Bereichen	141
Bild 5.44: SIMS-Analysen der mittleren Elementkonzentration und Sauerstoffkonzentration in der Tiefe von zwei im RLG konditionierten Proben D2-R5-13 und D2-R5-25 vor und nach dem SRV-Test.....	142
Bild 5.45: SIMS-Analysen der Konzentrations-Sputtertiefenverläufe der Additivelemente P, S, Ca und Zn in der Werkstückrandzone nach Honung, nach RLG-Vorkonditionierung (S2-R4-20) und nach FLM-Test	144
Bild 6.1: Einzeleffekte der Variation in der Endbearbeitung auf das Reibungsverhalten ohne Berücksichtigung von Wechselbeziehungen ..	145
Bild 6.2: Abschätzung der prozentualen Kraftstoffeinsparung je Betriebspunkt bei einer Siliziumkarbid-Honung mit und ohne Vorkonditionierung im RLG im Vergleich zu einer Diamanthonung	151
Bild 7.1: Versuchsaufbau zur Kalibrierung und Überprüfung der mathematisch-analytischen Berechnungen für das Konzept mit DMS	153
Bild 7.2: Honleistenträger zur Bestückung mit Dehnungsmessstreifen: Konzept (links), erste Umsetzung (rechts) und simuliertes Verformungsverhalten sowie beispielhafte Testmessung (unten)	154
Bild 7.3: Vereinfachte Schnittdarstellung des Konzeptentwurf eines Werkzeuges zur Vorkonditionierung für BAZ nach [MA19b].....	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung und Elementkonzentration des verwendeten EN-GJL 250	42
Tabelle 2: Kühlschmierstoffe und Schneidstoffe der RRV-Analogieversuche	63
Tabelle 3: Bestimmung des Anpressdrucks auf Basis des maschinenseitigen Aufweitmoments der verwendeten Honwerkzeuge	81

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AlSi	Aluminium-Silizium
AW	Anti-Wear
BAZ	Bearbeitungszentrum
BSE	Rückstreuelektronen
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CBN	Kubisch-kristallines Bornitrid
CFD	Computational Fluid Dynamics (Strömungssimulation)
CIRP	College International pour la Recherche en Productique (Internat. Akademie für Produktionstechnik)
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CrKa	Röntgenstrahlung
CVD	Chemical Vapour Deposition (Chemische Gasphasenabscheidung)
Dia	Diamant
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond Like Carbon
DMS	Dehnungsmessstreifen
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EHD	Elastohydrodynamik
EN	Europäische Norm
Fe	Eisen
Fe ₃ C	Zementit
FEM	Finite Elemente Methode
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
FH	Fertighonen
FIB	Focused Ion Beam (Fokussierter Ionenstrahl)
Ga	Galium
GDC	Chrom mit Mikrodiamant
GH	Gleithonung
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJV	Gusseisen mit Vermiculargraphit
HAADF	High Angle Annular Dark Field (Großwinkel-Dunkelfeld)

HM	Hartmetall
IFQ	Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung
IKAM	Institut für Kompetenz in AutoMobilität
IMK	Institut für Maschinenkonstruktion
ISO	International Organization for Standardization
IWF	Institut für Werkstofftechnik
IWF	Institut für Werkstoff- und Fügetechnik
KSS	Kühlschmierstoff
KW	Kurbelwinkel
N	Stickstoff
NO _x	Stickstoffoxide
O	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
OT	Oberer Totpunkt
P	Phosphor
Pkw	Personenkraftwagen
PLTH	Plateauhonung
Pt	Platin
PTWA	Plasma Transferred Wire Arc
RDE	Real Driving Emissions
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RLG	Reibleistungsgenerator
RNT	Radio-Nuklid-Technik
RRV	Rotations-Reib-Verschleiß
S	Schwefel
SAE	Society of Automotive Engineers (Vereinigung amerikanischer Automobilingenieure)
SE	Sekundärelektronen
SGH	Spiralgleithonung
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SIMS	Sekundärionenmassenspektrometrie
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß
STEM	Scanning Transmissionselektronenspektroskopie
TEM	Transmissionselektronenspektroskopie
TNS	Tiefemperatur-Nasseis-Strahlen
UT	Unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

VH	Vorhonen
VW	Volkswagen
W	Wolfram
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
XRD	Röntgendiffraktometrie
ZDDP	Zinkalkyldithiophosphate
ZH	Zwischenhonen
ZKG	Zylinderkurbelgehäuse
Zn	Zink
ZOT	Oberer Totpunkt bei Zündung

Verwendete Formelzeichen

Lateinische Buchstaben:

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A_{Kori}	Kontaktfläche Kolbenring/Zylinderlauffläche	mm ²
A_r	reale Kontaktfläche	mm ²
b_{Hertz}	Kontaktbreite nach Hertz	mm
b_{real}	gemessene Kontaktbreite	mm
c	Federsteifigkeit	N/mm
$D_{\{\text{hkl}\}}$	Netzebenenabstand	μm
E_Q	Wärmeenergie	J
E_R	Reibenergie	J
E_{Tr}	Energie zur Tribomutation	J
E_W	Energie zur Verschleißerzeugung	J
f	Frequenz	Hz
F_a	Axialkraft	N
F_c	Schnittkraft	N
F_{ca}	axiale Schnittkraftkomponente	N
F_{ct}	tangentiale Schnittkraftkomponente	N
F_{KO}	Konditionierkraft bei Vorkonditionierung im Prozess	N
F_N	Normalkraft	N
F_{osz}	oszillierende Massenkraft	N
F_p	Passivkraft	N
F_R	Reibkraft	N
F_z	Zerspankraft	N
h	Schmierfilmdicke	mm
h_{cr}	kritische Schmierfilmdicke	mm
M_A	Anzugsmoment	Nm
M_H	Hubmoment	-
m_k	Kraftstoffmassestrom	l/min
M_{Sp}	Spindelmoment	-
M_z	Drehmoment beim Honen	Nm
n	Drehzahl	min ⁻¹
n_{max}	maximale Drehzahl	min ⁻¹
P_{ges}	Gesamtleistung	W
P_L	Leerlaufleistung	W
P_M	Massenleistung	W
p_{max}	maximale Flächenpressung / maximaler Druck	N/mm ² / bar

p_{me}	effektiver Mitteldruck	bar
p_{mi}	indizierter Mitteldruck	bar
p_{mr}	Reibmitteldruck	bar
p_n	Anpressdruck	N/mm ²
P_{nenn}	Nennleistung	W
P_R	Reibleistung	W
p_{RLG}	Kolbenringvorspannung im RLG	N/mm ²
P_V	Verlustleistung	W
Ra/Sa	arithmetische Mittenrauwert (2D/3D)	μm
Rk/Sk	Kernrautiefe (2D/3D)	μm
$Rktot$	kombinierter Oberflächenkennwert zur Ermittlung des Verschleißes	μm
Rpk/Spk	reduzierte Spitzenhöhe (2D/3D)	μm
Rvk/Svk	reduzierte Riefentiefe (2D/3D)	μm
Rz	gemittelte Rautiefe	μm
s	Gleitweg	mm
S_{10z}	Zehn-Punkte-Spitzenhöhe	μm
S_o	Sommerfeldzahl	-
Ssk	Schiefe	-
t_H	Honzeit	s
t_{RLG}	Konditionierzeit im RLG	min
U	Beschleunigungsspannung	keV
v	Geschwindigkeit	m/s
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{ca}	axiale Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{cr}	kritische Gleitgeschwindigkeit	m/s
v_{ct}	tangentiale Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{eff}	Effektivgeschwindigkeit	m/s
v_f	Zustellgeschwindigkeit	$\mu\text{m/s}$
v_h	Hubgeschwindigkeit	m/min
V_{Hub}	Hubraum	cm ³
v_{max}	maximale Gleitgeschwindigkeit	m/s
v_u	Umfangsgeschwindigkeit	m/min
w	Verschleißgeschwindigkeit	nm/h

Griechische Buchstaben:

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Honwinkel	°
β	Schnittwinkel	°
ε^G	Gitterdehnung	-
η	dynamische Viskosität	Pa s
θ	Beugungswinkel	°
ϑ	Temperatur	°C
λ	Wellenlänge	nm
μ	Reibungskoeffizient	-
μ_{\max}	maximaler Reibwert	-
σ	Spannung	MPa
φ	Azimutwinkel	°
ψ	Polwinkel	°