

# **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

# 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

<b>Danksagungen</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
<b>2 Vorbetrachtungen und Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
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

<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsplan und -durchführung</b>	<b>39</b>
4.1	Definition geeigneter Endbearbeitungs- bzw. Konditionierungsprozesse . . . . .	42
4.1.1	Ermittlung der während des optimalen Einlaufs umgesetzten Leistung . . . . .	42
4.1.2	Langhubhonen . . . . .	44
4.1.3	Bürsten . . . . .	45
4.1.4	Glattwalzen . . . . .	49
4.1.5	Konditionierung mittels modifiziertem Honprozess . . . . .	53
4.2	Tribologische Prüfung . . . . .	55
4.2.1	Probenpräparation . . . . .	57
4.2.2	Durchführung der SRV-Versuche . . . . .	58
4.3	Kraftmessung . . . . .	61
4.3.1	Analyse des Zerspanprozesses beim Langhubhonen am tribologischen Modellversuch . . . . .	61
4.3.2	In-Prozess-Kraftmessung beim Langhubhonen . . . . .	62
4.4	Validierung der Charakterisierungsmöglichkeiten der Grenzschicht . . . . .	70
4.4.1	Röntgendiffraktometrie und Streuvektormessungen . . . . .	71
4.4.2	Makrohärte und Nanoindentation . . . . .	75
4.4.3	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) . . . . .	79
4.4.4	Elektronenspektroskopie (AES und XPS) . . . . .	80
4.4.5	Massenspektroskopie (SIMS und SNMS) . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>85</b>
5.1	Entwicklung alternativer Prozesse zur Strukturierung von Laufflächen . . . . .	85
5.2	Mechanische Grenzschichteigenschaften und tribologisches Verhalten in Modellversuchen . . . . .	91
5.3	Modifikationen der Endbearbeitung und das tribologische Verhalten (Versuchsgruppe 1) . . . . .	95
5.3.1	Tribologische Bewertung . . . . .	98
5.3.2	Bewertung der mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht . . . . .	99
5.4	Erweiterung der fertigungstechnischen Variationen (Versuchsgruppe 2) . . . . .	102
5.4.1	Oberflächenstrukturanalyse . . . . .	105
5.4.2	Chemische Analyse der Grenzschicht . . . . .	109

<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>114</b>
<b>7 Ausblick</b>	<b>116</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>Studentische Arbeiten mit Betreuung durch den Autor</b>	<b>XXVIII</b>
<b>A Anhang</b>	<b>XXIX</b>
A.1 Ermittlung der realen Kontaktfläche . . . . .	XXIX
A.2 Vergleich der Reibarbeiten und Reibleistungen von Schneidleiste bzw. Honwerkzeug und Kolbenring . . . . .	XXXI
A.3 Vergleich des Analogieversuches zum Honen im SRV . . . . .	XXXII
A.4 Streuvektormessungen . . . . .	XXXIII

# Formelzeichen

$a_p$	Schnitttiefe	[mm]
$A_r$	Kontaktfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$b$	Kontaktbreite	[mm]
$B_{hkl}$	Halbwertsbreite	[°]
$d$	Durchmesser	[mm]
$D_{hkl}$	Domänengröße	[nm]
$E$	Elastizitätsmodul	[GPa]
$E_Q$	Wärmeenergie	[J]
$E_R$	Reibungsenergie	[J]
$E_{Tr}$	Energie zur Initiierung von Tribomutationen	[J]
$E_W$	Verschleißenergie	[J]
$f$	Vorschub	[mm]
$f$	Frequenz	[Hz]
$F_a$	Axialkraft	[N]
$F_c$	Schnittkraft	[N]
$F_f$	Federkraft	[N]
$F_{ka}$	Axialkraft des Konus	[N]
$F_n$	Normalkraft	[N]
$F_r$	Reibkraft	[N]
$F_t$	Tangentialkraft	[N]
$h$	Höhe	[mm]
$h_{cu}$	unverformte Spandicke	[mm]
$h_{cueff}$	effektive Spandicke	[mm]
$hkl$	Millersche Indizes	[–]
$I$	Intensität	[cps]
		Impulse/ Sekunde
$I$	elektrische Stromstärke	[A]
$K$	Scherrer-Konstante	[–]

$K$	Korngröße	[ $\mu\text{m}$ ]
$k$	Konstante	[–]
$l$	Länge	[mm]
$M$	Drehmoment	[Nm]
$m$	Anzahl der Honleisten	[–]
$m_i$	Masse des 3. Körpers	[g]
$m_s$	Masse der abgelösten Verschleißpartikel zur Bildung des 3. Körpers	[g]
$m_w$	Masse der ausgestoßenen Partikel des 3. Körpers	[g]
$n$	Drehzahl	[ $\text{min}^{-1}$ ]
$p$	Druck	[N/mm <sup>2</sup> ]
$p_r$	Anpressdruck	[N/mm <sup>2</sup> ]
$P$	Leistung	[W]
$P_c$	Schleifleistung/Schnittleistung	[W]
$P_d$	dissipierte Leistung	[W]
$P$	Leistung	[W]
$R_{pk}$	reduzierte Spitzhöhe	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_k$	Kernrautiefe	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_{vk}$	reduzierte Riefentiefe	[ $\mu\text{m}$ ]
$s$	Eindringtiefe	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_{pk}$	reduzierte Spitzhöhe im 3D Profil	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_k$	Kernrautiefe im 3D Profil	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_{vk}$	reduzierte Riefentiefe im 3D Profil	[ $\mu\text{m}$ ]
$t$	Laufzeit	[min]
$U$	elektrische Spannung	[V]
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
$v_{Hub}$	Hubgeschwindigkeit	[m/min]
$w$	Verschleiß	[mg] bzw. [nm]
$W$	Arbeit	[J]
$W_{fs}$	Reibarbeit	[J]
$W_{fs,def}$	Deformationskomponente der Reibarbeit	[J]
$W_{fs,adh}$	Adhäsionskomponente der Reibarbeit	[J]
$x, y, z$	translatorische Koordinatenachsen im kartesischen Raum	[–]
$\alpha$	Winkel bzw. Honwinkel	[°]
$\gamma$	Konuswinkel	[°]

---

$\epsilon$	Gitterebenenabstand/Dehnung	[%] bzw. [nm]
$\eta$	Winkel der Drehung um den Streuvektor	[°]
$\vartheta$	Temperatur	[°C]
$\theta_{hkl}$	Beugungswinkel bzw. Braggwinkel	[°]
$\lambda$	Wellenlänge der Röntgenstrahlung	
$\mu$	linearer Absorptionskoeffizient	[–]
$\nu$	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)	[–]
$\phi, \psi$	Winkel und Polarkoordinaten am Goniometer	[°]
$\rho$	Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Normalspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_v$	Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau$	Schubspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]

# Abkürzungen

3D	dreidimensional
5W30	Spezifikation eines Motoröls
AES	Augerelektronen-Spektroskopie
CR	Common Rail
CSM	Continuous Stiffness Measurement
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EBSD	Electron Backscatter Diffraction (Rückstreuelektronen-Kikuchi-Beugung)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FIB	Focused Ion Beam (Ionenstrahlätzen)
GJL250	Gusseisen mit Lamellengraphit (Zugfestigkeit 250-300 N/mm <sup>2</sup> )
HDA	hydraulische Druckaufweitung
HM	Härte nach Martens
HV	Härte nach Vickers
IFQ	Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto von Guericke Universität Magdeburg
ISO	International Organization for Standardization
KSS	Kühlschmierstoff
MRD	Multiple of a Random Distribution (Angabe einer Verteilung in Vielfachen einer regellosen Verteilung)
Nd:YAG Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
OIM	Orientation Imaging Microscopy (Orientierungsabbildungsmikroskopie)
OT	oberer Totpunkt/Umkehrpunkt des Kolbens
Pkw	Personenkraftwagen
REM	Rasterelektronen-Mikroskopie
SEM	Sekundärelektronen-Mikroskopie

SIMS	Sekundärionen-Massenspektroskopie
SNMS	Sekundärneutralteilchen-Massenspektroskopie
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß
TNS	Tieftemperatur-Nasseisstrahlen
TP	Tiefenprofil
XPS	Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie
ZKG	Zylinderkurbelgehäuse

# 1 Einleitung

Die Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Mobilitätssysteme ist aufgrund der nicht abwendbaren Ressourcenverknappung und der hohen Umweltbelastung aktuell unumgänglich und wird auch zukünftig von hoher Bedeutung sein. Die Zukunft der Mobilität wird weitestgehend als elektrisch beschrieben und dementsprechend auch gesellschaftlich und politisch exemplarisch am „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ der deutschen Bundesregierung forciert. Als strategisches Ziel zur Wegbereitung eines Marktes für Elektromobilität sollen entsprechend dieses Planes bis 2020 eine Millionen Elektroautos auf Deutschlands Straßen fahren. Dieses Ziel sehen jedoch viele Experten kritisch und prognostizieren weiterhin eine mittelfristige Dominanz des Verbrennungsmotors [Rees12]. In Form von hybrider Antriebstechnik oder in Erscheinung des Range-Extenders werden uns Verbrennungsmotoren in den nächsten Jahrzehnten begleiten. Somit müssen auch diese hiesigen ökologischen Anforderungen genügen und einer wirtschaftlichen, Know-how geprägten Fertigung zugänglich gemacht werden. Ein großes Potential der Verbrauchsreduktion bzw. Leistungssteigerung liegt weiterhin im Bereich der Kolbengruppe, welche mitunter 25 bis 40 % der Leistungsverluste abhängig vom Brennverfahren des Gesamtaggregate durch Reibung verursacht [Karr09, Heub03]. In der Verlustaufteilung kommen der Kolben-Zylinderpaarung mit Pleuellagerung die größten Anteile von bis 33 % zu [Heub03]. Neben der Optimierung der Betriebsparameter und konstruktiven Veränderungen können auch Bauteileigenschaften das Reibungs- und Verschleißverhalten der gesamten Baugruppe verbessern. Diese Erkenntnis wird schon sehr lange durch ein gezieltes Einlaufen tribologischer Systeme genutzt. Aktuell stellt sich die Frage inwieweit dieses Einlaufen auch ökonomisch durch eine angepasste Fertigung vollzogen oder beeinflusst werden kann. So wird davon ausgegangen, dass ca. 10 % des Kraftstoffverbrauchs auf motorinterne Reibvorgänge zurückzuführen sind. Davon können wiederum 10 % zu Grenzreibungsverlusten gezählt werden [Zhmu11]. Wenn es also gelingt diese Verluste durch fertigungstechnisch optimierte Bauteiloberflächen um ca. 10 bis 60 % zu verringern, wird dies den Gesamtkraftstoffverbrauch um 0,1 bis 0,6 % verringern. Die Vorteile, welche eine Reduktion der Motorreibung durch fertigungstechnische Anpassungen auf

den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges mit sich bringen kann, sind verhältnismäßig gering, aber im Vergleich zu anderen Optimierungsmöglichkeiten sehr schnell, nahezu kostenneutral und ohne weitere Anpassungen umzusetzen.

## 1.1 Motivation

Neben den geometrischen und topografischen Anforderungen an die Fertigung von Zylinderkurbelgehäusen und speziell Zylinderlaufflächen rückt der Fokus mehr und mehr in Richtung definierter Anforderungen an die Grenzschichteigenschaften der tribologisch beanspruchten Bauteile. Dass nicht nur die Formabweichungen und die Oberflächentopografie das tribologische Verhalten während des Einlaufvorganges bestimmen, sondern vielmehr die Gefügeeigenschaften nach der Fertigung auch Einflüsse auf Reibung und Verschleiß im späteren Motorenbetrieb bewirken können, ist seit Mitte des 20. Jahrhunderts durch UETZ bekannt [Uetz68]. In jüngerer Vergangenheit haben viele wissenschaftliche Arbeiten den Einfluss der Finishbearbeitung auf das tribologische Verhalten von Systemen während und nach deren Einlauf untersucht [Kehr98, Sche01, Böhm03, Mach03, Berl09, Pöhl09, Berl10, Karp12]. So zeigt KEHRWALD erstmals umfassend die Notwendigkeit der Erweiterung von Modellvorstellungen zum Einlauf tribologischer Systeme anhand praktischer Versuchsergebnisse, welche teilweise im Widerspruch zu den Vorstellungen von Makroformanpassung und Egalisierung von Rauheitsspitzen stehen [Kehr98]. Demnach ergaben sich folgende Erkenntnisse und zu klärende Unstimmigkeiten bei Versuchen zum Einlaufverhalten in geschmierten Kontakten:

1. Unabhängig von der Ausgangsrauheit stellte sich nach dem Einlauf eine Betriebsrauheit ein, welche teilweise größer als die Ausgangsrauheit war.
2. Auf Makroformanpassungen kann aufgrund geringer Verschleißgeschwindigkeiten nicht geschlossen werden.
3. Aussagen zum Einlaufverhalten bedingen Kenntnisse zu Tribomutationen, also der mechanischen und chemischen Veränderung, von Grenzschichten.
4. Das spätere Betriebsverhalten von Reibung und Verschleiß tribologischer Systeme hängt maßgeblich von deren Einlauf ab, was bedeutet, dass die initiale Belastung des Tribosystems in Kombination mit den fertigungsbedingten Eigenschaften das Betriebsverhalten bestimmen (Abb.1.1).

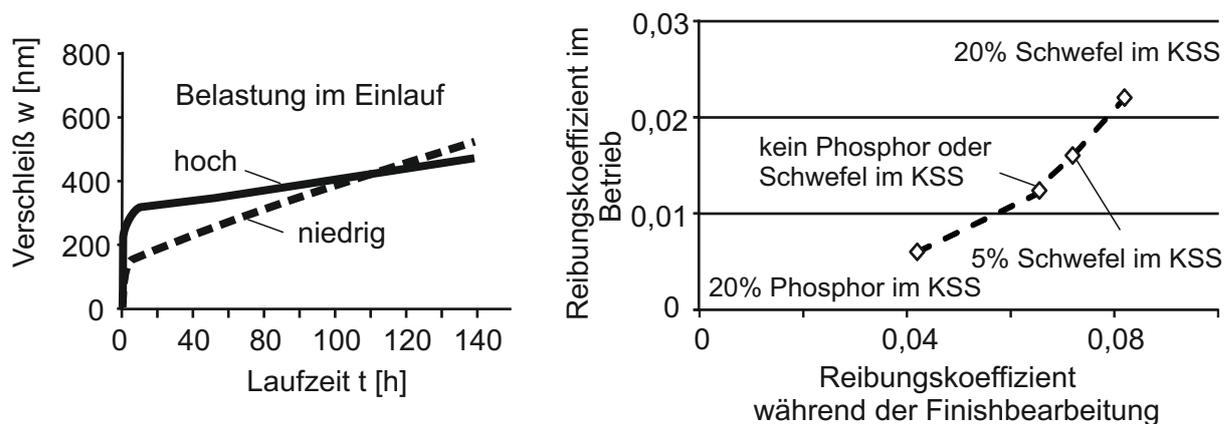


Abbildung 1.1: Einlaufverhalten in Abhängigkeit der Last und Einfluss der Finishbearbeitung auf den Reibungskoeffizienten im Betrieb nach [Berl09]

Umfassende Untersuchungen von MACH zeigen die Auswirkungen von Tribomutationen während der Finishbearbeitung im Zusammenhang mit der Wirkung von Kühlschmierstoffen auf Zerspankräfte und Temperaturen auf Reibung und Verschleiß von Probekörpern in Tribometern [Mach03]. Die Reibkräfte und somit der Energieeintrag während der Finishbearbeitung sind daher maßgeblich für das Verschleißverhalten von tribologischen Systemen. Dies bedeutet, dass die elastischen und plastischen Deformationen in der Werkstückgrenzschicht während der letzten Bearbeitungsschritte eine Art Vorconditionierung ausführen können. Tendenziell bewirken kleine Deformationen, also kleine Reibkräfte während der Bearbeitung, eine Reduktion der Verschleißgeschwindigkeit in tribologischen Systemen [Mach03, Berl09]. Ähnliche Erkenntnisse wurden aktuell auch von BÖHM ET AL. bestätigt und zeigen, dass die Deformationstiefe während der Endbearbeitung, deren exemplarischer Indikator die Eindringtiefe umgebender Medien wie Sauerstoff darstellen kann, einen entscheidenden Einfluss auf das tribologische System ausübt, wohingegen Topografieeinflüsse in bestimmten Betriebspunkten zu vernachlässigen sind (Abb. 1.2)[Böhm12]. Da die Reibung im tribologischen System Kolbenring/Zylinderlauffläche eine skalenabhängige Größe darstellt, was bedeutet, dass neben den mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht auch Additive die Monolagen- und quasiviskosen Festkörperwechselwirkungen bestimmen, muss der Fokus in der Endbearbeitung auf der Deformationstiefe bzw. Verfestigungsvorgängen liegen. Aus diesen Erkenntnissen erwächst somit der Bedarf nach einer umfassenden Analyse des letzten Fertigungsschrittes in der Herstellung von Zylinderlaufflächen, da

dieser bereits eine Art Vorkonditionierung, auch Tribokonditionierung genannt, des tribologischen Systems durchführt.

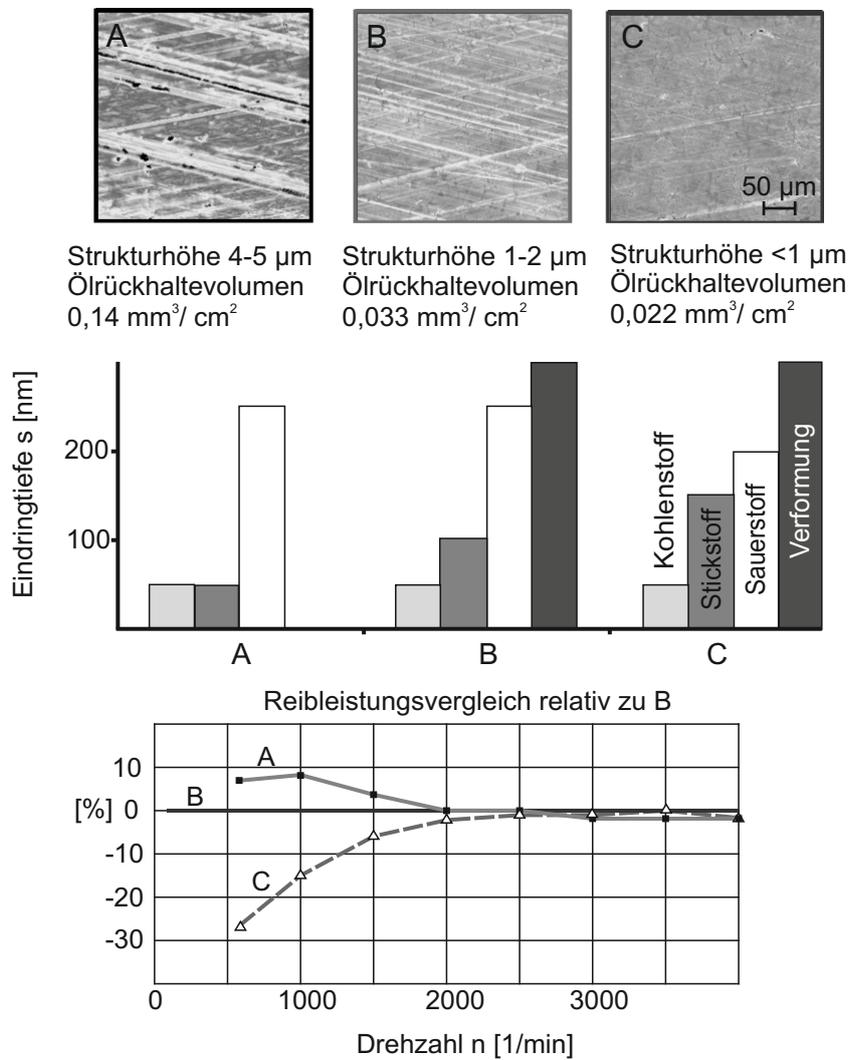


Abbildung 1.2: Reibleistungsvergleich nach unterschiedlicher Finishbearbeitung (ohne Beschreibung des Fertigungsprozesses) eines Pkw-Serienaggregates der Daimler AG [Böhm12]

## **2 Vorbetrachtungen und Stand des Wissens**

### **2.1 Das tribologische System der Kolbengruppe**

In Anlehnung an die zurückgezogene DIN 50323 wird die Tribologie als die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung definiert [DIN 93]. Diese umfasst die Gebiete Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein. Im konkreten Anwendungsfall Kolbengruppe, bestehend aus Kolben, Kolbenring und Zylinderlauffläche, stellen sich die Funktionen entsprechend der Systemstruktur in Abbildung 2.1 dar. Die beiden primären Optimierungshebel bilden die Verlustgrößen des betrachteten Tribosystems in Form von Reibung und Verschleiß. Zum einen gilt es, die innermotorischen Verluste im Kurbeltrieb zu verringern und eine progressive Verschleißentwicklung speziell im Zwickelbereich am oberen Totpunkt des Zylinderliners zu vermeiden. Grundsätzlich bedingen sich Reibung und Verschleiß gegenseitig, was die Komplexität tribotechnischer Systeme um ein Vielfaches erhöht. Reibung ist prinzipiell auch ohne das Auftreten von Verschleiß möglich, wohingegen in praktischen Anwendungen immer Verschleiß im Kontext mit Reibung auftritt. Die Ursachen und Modelle zum Auftreten von Reibung und Verschleiß müssen im Vorfeld erläutert werden, um deren Wirkung auf das Tribosystem zu verstehen. Eine weitere Problematik liegt in der Skalenabhängigkeit und Vielschichtigkeit der Reibung im Gegensatz zum Verschleiß, was eine funktionelle Abbildung der beiden Verlustgrößen zueinander erschwert.

**Funktion des tribolog. Systems Kolben-Kolbenring-Zylinderlauffläche**

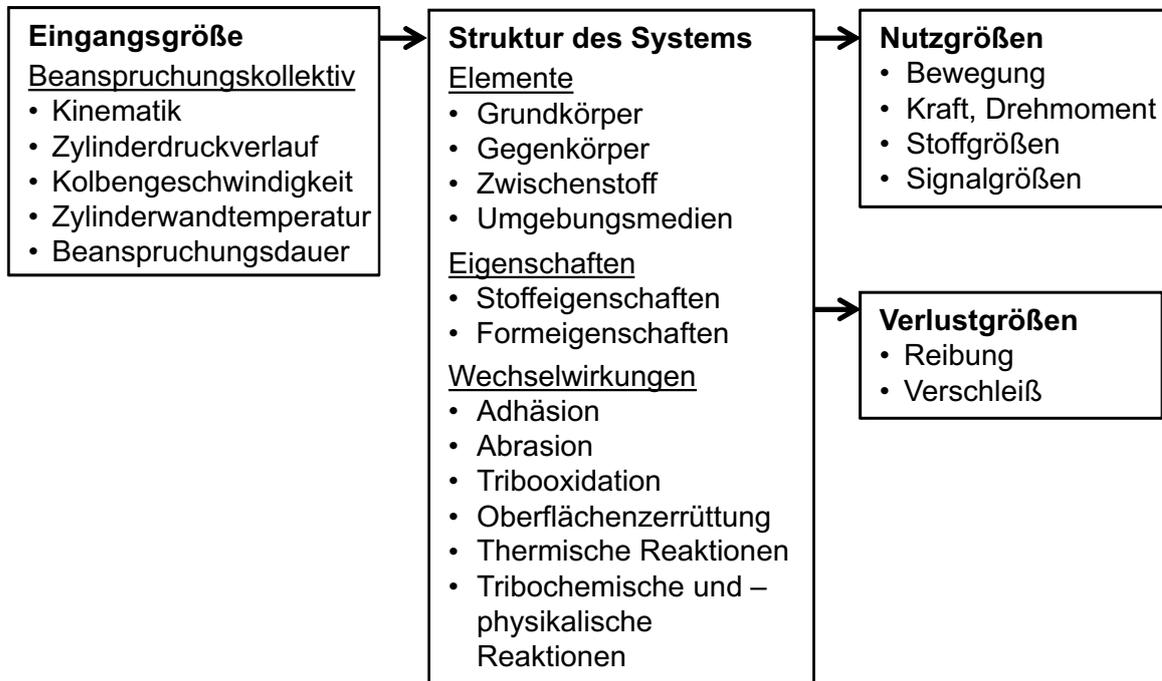


Abbildung 2.1: Funktion des tribologischen Systems Kolbengruppe

### 2.1.1 Reibung

Die physikalische Beschreibung der Wirkung von Reibung wird durch die Reibkraft wiedergegeben. Während eines Reibungsprozesses wird Reibenergie in Form von dissipierter und akkumulierter Energie der aufgebrachtten mechanischen Energie entzogen [Bart10]. Somit ist Reibung eine Widerstandskraft entgegen der Relativbewegung sich berührender Körper. Zum Verständnis der Reibung kann diese nach CZICHOS ET AL. in folgende Einzelprozesse unterteilt werden [Czic03]:

#### 1. Energieeinleitung

- Berührung technischer Oberflächen und Bildung der wahren Kontaktfläche
- Mikrokontaktflächenvergrößerung
- Delamination von Oberflächenschichten
- Grenzflächenbildung mit Akkumulation von Grenzflächenenergie

## 2. Energieumsetzung

- Deformationsprozesse
- Adhäsionsprozesse
- Furchung

## 3. Energiedissipation

- Thermische Prozesse (Erzeugung von Wärme)
- Energieabsorption
  - Elektronen-/ Phononenanregung
  - Elastische Hysterese
  - Gitterdeformationen
  - Erzeugung und Wanderung von Versetzungen
  - Ausbildung von Eigenspannungen
  - Mikro-Bruchvorgänge
  - Phasentransformation
  - Tribochemie
- Energieemission
  - Wärmetransport
  - Schwingungsausbreitung/ Phononenemission
  - Schallemission
  - Photonen-, Elektronen- und Ionenemission

Im vorliegenden System ist die dynamische Reibung von Bedeutung, welche eine Relativbewegung von Grund- und Gegenkörper voraussetzt. Diese wird weiterhin in innere und äußere Reibung separiert. Innere Reibung ist in Stoffbereichen innerhalb eines Körpers zugehörig, wohingegen äußere Reibung sich auf Stoffbereiche von berührenden Körpern bezieht [Bart10]. Dies impliziert die bereits erwähnte Vielschichtigkeit der Reibung. Zur Darstellung der Skalenabhängigkeit der inneren Reibung eignet sich das Modell von SCHERGE ET AL., welches Elemente aus Makro-, Mikro/Meso- und Molekularmodellen enthält (Abb. 2.2)[Sche05].

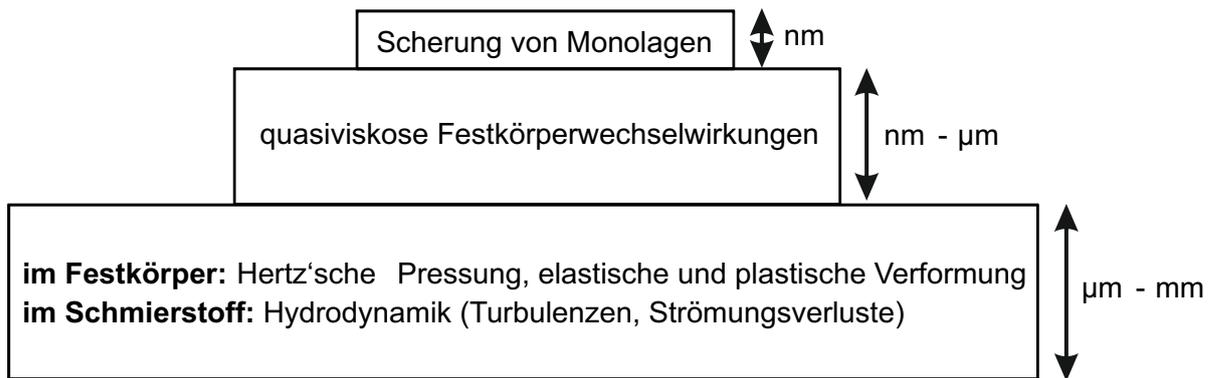


Abbildung 2.2: Skalenabhängigkeit der Reibung nach Scherge

Weiterhin kann entsprechend dem Grad der Trennung von Oberflächen in verschiedene Reibungszustände und somit in Festkörperreibung, Grenzreibung bzw. Mischreibung und Flüssigkeitsreibung (Hydrodynamik, Elastohydrodynamik, Fluid-Scherung) unterschieden werden [Czic03]. In Blickrichtung zur Umsetzung mechanischer Energie während des Reibprozesses liegt der Fokus auf der Festkörper-, Grenz- und Mischreibung. Diese beschreiben einen Reibungszustand, bei welchem die Kontaktflächen nicht vollständig durch einen Schmierfilm getrennt werden. Die dominierenden Reibungsmechanismen sind neben der elastischen Hysterese und Furchung plastische und elastische Deformation sowie Adhäsion. Somit wird bei Festkörperreibung das Reibungs- und zwangsläufig auch das Verschleißverhalten maßgeblich von den mechanischen und chemischen Eigenschaften der äußeren sowie inneren Grenzschicht bestimmt (Abb. 2.3). Speziell dieser Reibungszustand, bei dem Asperite skalenübergreifend umgeformt und abgeschert werden, prägt den Aufbau der Grenzschichten.

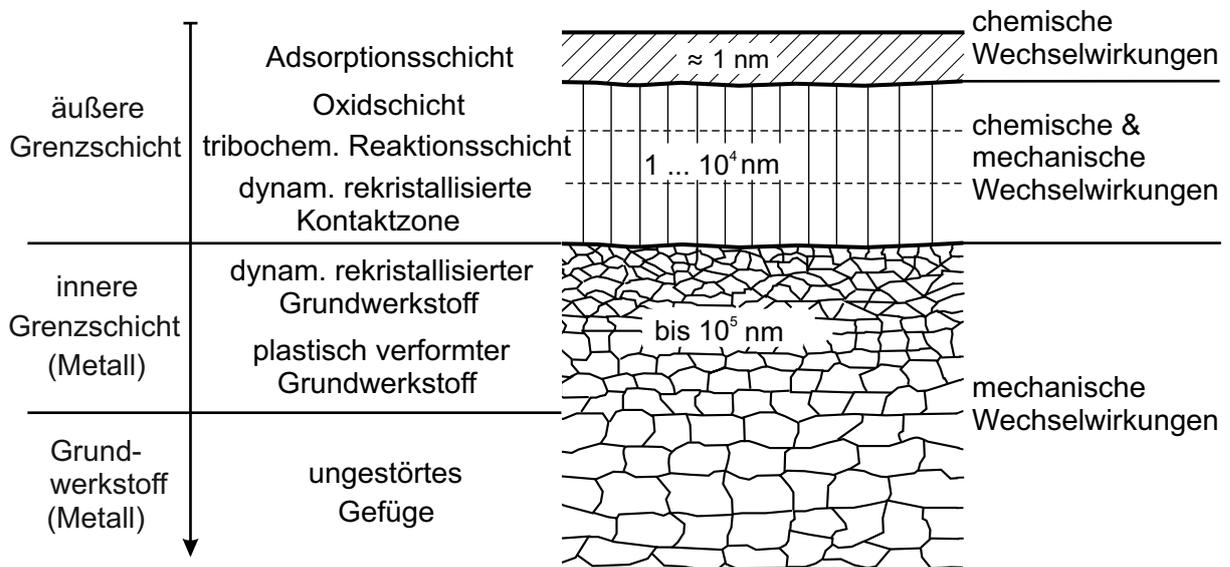


Abbildung 2.3: Modell der tribologischen Randschicht nach [Uetz68, Büsc03, Bart10]

## 2.1.2 Verschleiß

Sehr oberflächlich wird Verschleiß mit dem Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers definiert. Eine präzisere Definition bzw. Modellierung von Verschleißerscheinungen und -vorgängen geht exemplarisch aus den Arbeiten von KEHRWALD und DETERS ET AL. hervor [Kehr99, Dete08]. Beginnend bei ersten Erkenntnissen von ARCHARD, die eine Korrelation von Verschleiß zu dem Reibungskoeffizienten und den mechanischen Werkstoffeigenschaften erläutern, über Betrachtungen von RABINOWICZ, welche Adhäsionseffekte beleuchten und den Begriff der Oberflächenenergiedichte einführen, bis hin zu molekular-mechanischen Vorgängen, die von KRAGELSKY ET AL. untersucht werden, zeigt sich die Vielfältigkeit der Verschleißmechanismen [Arch53, Rabi65, Krag77]. Im Zuge der energetischen Betrachtungen muss die Energiespeicherhypothese von FLEISCHER angeführt werden [Flei90]. Diese beschreibt die Akkumulation von Gitterstörungen durch die im Kontakt absorbierte Energie (Energiedissipation). Nach FLEISCHER muss ein kritisches Energieniveau erreicht werden, um Verschleißteilchen zu bilden [Flei90]. Als Maß für dieses Niveau dienen die scheinbare Energiedichte und die Bruchenergiedichte [Kehr99]. Zusammenfassend lassen sich die Verschleißmechanismen in Delamination infolge von Spannungsmaxima und De-

formationen als Oberflächenzerrüttung unterhalb der Oberfläche, Adhäsion (Abschabung von Grenzflächenverbindungen), Abrasion infolge der Eindringung und Relativbewegung eines härteren Körpers und tribochemische Reaktionen (z.B. Diffusions- und Sublimationsprozesse) unterteilen [ZG87, Bölt10]. Eine wesentliche, verschleißrelevante Rolle spielen die Entstehung und der Abbau von Oxidfilmen im Mischreibungsgebiet [Krag73]. Da Oxidschichten eine Passivierung der Oberfläche darstellen, dienen diese als Verschleißschutz. Somit ist das Verhältnis von Oxidationsrate in Kombination mit der Gleitgeschwindigkeit ebenso verschleißrelevant, wie der Härtegradient von Substrat und Oxidschicht, welcher die Schichthaftung bestimmt.

### **2.1.3 Prozesse in der Ausprägung von Grenzschichten**

Das in der Fertigungstechnik gebräuchliche Modell der Randzone, in welchem maßgeblich makroskopische/globale mechanische Eigenschaften in Tiefen ab 10 µm betrachtet werden, eignet sich zur fertigungsnahen, qualitativen Bewertung spanend bearbeiteter Oberflächen, aber genügt nicht in vollem Umfang den Anforderungen zur Analyse tribologischer Prozesse und muss differenzierter betrachtet werden [Brin11]. Daher muss das Modell der Randzone für die angestrebten Betrachtungen um das Modell der tribologischen Grenzschicht erweitert werden (Abb. 2.3). Aus tribologischer Sicht kommt der sogenannten Grenzschicht in Bezug auf das Verständnis von chemischen und mechanischen Wechselwirkungen eine große Bedeutung zu. Analog den ersten Arbeiten von UETZ zeichnet sich die äußere Grenzschicht durch eine dünne Adsorptionsschicht und Oxid- bzw. Reaktionsschicht aus (Abb. 2.3)[Uetz68]. Daran anschließend befindet sich die, durch Verformung und Ver- oder auch Entfestigung geprägte innere Grenzschicht, deren mechanische und teilweise auch chemische Eigenschaften vom Grundgefüge abweichen. Die chemische Zusammensetzung der äußeren Grenzschicht im friktiven Kontakt ist stark von der Konzentration von Additiven und deren Wechselwirkung mit Metallionen geprägt, welche wie Oxidationsprodukte und Hydroxid-Gruppen auch in Kombination mit Additiven in der äußeren Grenzschicht nachweisbar sind.

Nach spanender Bearbeitung oder z.B. furchender friktiver Belastung aktivierte, metallische Oberflächen können einer Vielzahl möglicher Reaktionen unterliegen. Nach SCHULZ kann es im ersten Schritt zu einer Adsorption von Additiven an der Oberfläche kommen [Schu09]. Bei ausreichend hoher Temperatur erfolgt die Desorption der adsorbierten Moleküle und Reaktionsschichten entstehen. Prinzipiell sind Reaktionen mit Additiven und Oxidationsprozesse zeitabhängig. Zu den „schnelleren“ Reaktionen

werden radikalische und ionische Reaktionen zugeordnet. Die vergleichsweise „langsameren“ Reaktionen bedürfen zuvor einer Spaltung von Bindungen, bevor neue Kombinationen eingegangen werden können. Auch Adsorptions- und Desorptionsprozesse zählen zu den „langsameren“ Reaktionen [Schu09]. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen einem tribologischen Prozess, wie im tribotechnischen System Kolbenring/Zylinderlauffläche, und einem spanenden Bearbeitungsprozess. Während im tribotechnischen System Additive permanent in der Reaktionsstelle zur Verfügung stehen, stellt sich die Benetzung in der Zerspanung, auch durch den Werkstoffabtrag, als schwierig dar. Auch ist die diskrete Kontaktzeit bzw. die Kontaktzeit in Summe, welche für chemische Wechselwirkungen relevant ist, während des Zerspanvorganges im Vergleich gering. Jedoch werden hierbei deutlich höhere Temperaturen erzielt, was wiederum die Reaktionskinetik und Reaktionsgeschwindigkeit positiv beeinflusst. Auch liegen nach der Zerspanung im Gegensatz zum genannten tribotechnischen System die metallischen Flächenelemente immer in aktivierter Form vor. Die Komplexität der Wechselwirkungen einzelner Mechanismen von Reibung und Verschleiß im Hinblick auf die Ausprägung von Grenzschichten zeigt Abbildung 2.4. Eine zentrale Bedeutung kommt im Zuge der Betrachtungen zur dissipierten Energie der thermischen Energie zu.

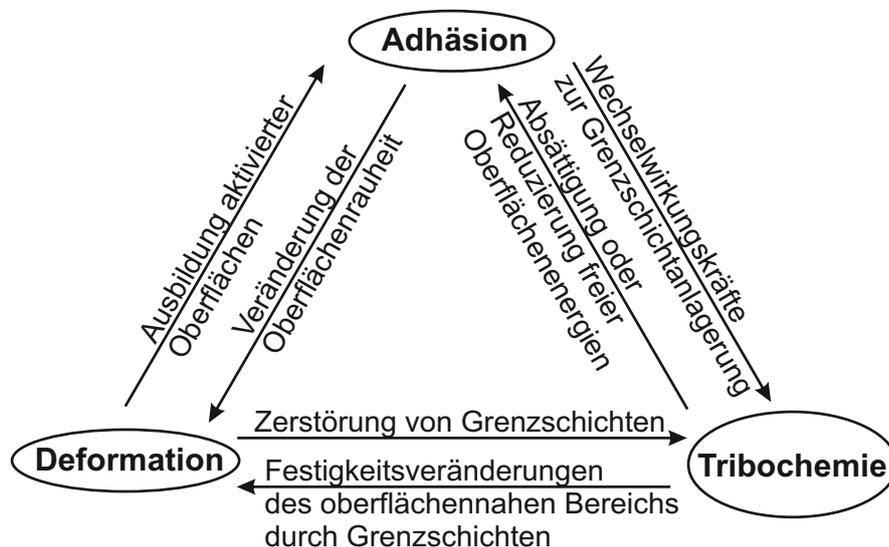


Abbildung 2.4: Wechselbeziehungen zwischen Reibung und Verschleiß

## Kornfeinung

Die Eigenschaften einer nanokristallinen Struktur werden maßgeblich durch deren Korngrenzen bestimmt [Sche03b]. SCHULZ erklärt die Einstellung eines nanokristallinen Gefüges in der Grenzschicht mit Versetzungsaktivitäten und einer steigenden Versetzungsdichte, wodurch kohärente oder teilkohärente Teilchen und Phasen durchtrennt werden [Schu09]. Eine erste Abschätzung der Korngröße belasteter Oberflächen kann anhand der Halbwertsbreite des Reflexprofils durchgeführt werden. Diese liefert Informationen zum Verzerrungszustand des Gefüges. Als Restriktion muss beachtet werden, dass die Abschätzung der Korngröße annäherungsweise über die Ermittlung der Domänengröße  $D_{hkl}$  erfolgt. Diese entspricht der Mindestkorngröße bzw. der Ausdehnung des Kristalls senkrecht zur Netzebene [Smil09].

$$D_{hkl} = \frac{K \cdot \lambda}{B_{hkl} \cdot \cos \theta_{hkl}} \quad (2.1)$$

- mit  $K$  - Scherrer-Konstante in Abhängigkeit der Struktur  
 $\lambda$  - Wellenlänge der Röntgenstrahlung  
 $B_{hkl}$  - Halbwertsbreite  
 $\theta_{hkl}$  - Beugungswinkel

Auf die aktuelle Problematik bezogen gibt die Halbwertsbreite also eine Aussage zum Verzerrungszustand der Oberfläche, welcher sich beispielhaft durch den Aufstau von Gitterdefekten und auch in der Zerstörung kristalliner Strukturen bemerkbar macht. Dies kann ein Indikator zur Verschleißanfälligkeit einer Grenzschicht (Kornebene) sein.

## 2.2 Oberflächennahe Gefügeeigenschaften im Kontext von Reibung und Verschleiß

### 2.2.1 Modelle zum Aufbau oberflächennaher Schichten

Der aus fertigungstechnischer Sicht definierte Begriff der Bauteilrandzone beschreibt die physikalischen und chemischen Eigenschaften oberflächennaher Werkstoffvolumina. Kann davon ausgegangen werden, dass nach einer tribologischen Belastung, welche im Grunde auch eine zerspanende Endbearbeitung darstellen kann, die Isotropie des Werkstoffes beeinflusst wird, hat deren Ausprägung auch zwangsläufig einen Einfluss auf die Eigenschaften des tribologischen Systems. Bei polykristallinen, mehrpha-

sigen Werkstoffen kann es in diesem Fall zu einer Gefügeanisotropie bzw. einer Kristallanisotropie kommen [Bern06]. Die Gesamtheit der Orientierungen einzelner Kristallite bzw. Körner wird als kristallographische Textur bezeichnet und kann mittels einer Orientierungsverteilungsfunktion beschrieben werden. Sind alle Orientierungen gleichmäßig in der Orientierungsverteilung vorhanden liegt eine regellose Textur vor. Bei bevorzugten Ausrichtungen der Kristallite, z. B. nach umformender Fertigung, werden scharfe bzw. ausgeprägte Texturen sichtbar. Die Ermittlung von Texturen kann röntgenographisch (XRD) und optisch (EBSD oder OIM) erfolgen. Neben der Kristallorientierung sind Kristalldeformationen für funktionelle Betrachtungen relevant. Wie sich oberflächennahe Normalspannungen in einem tribologischen Kontakt durch Reibung ausprägen, wird im rechten Teil der Abbildung 2.5 deutlich.

Mit steigendem Reibungskoeffizienten verlagert sich das Maximum der hervorgerufenen Druckspannung in Bewegungsrichtung und es entsteht im auslaufenden Kontakt ein Maximum der Zugspannung. In diesem Bereich kann durch entsprechende plastische Dehnungen der Werkstoffverbund gelöst und somit Verschleiß initiiert werden. Der Einfluss von Normalspannungen als Eigenspannungen auf den Reibungskoeffizienten wurde bisher nicht eindeutig nachgewiesen. Es existieren Korrelationen, welche zeigen, dass erhöhte Druckeigenspannungen nach dem Endbearbeitungsprozess einen geringen Reibungskoeffizienten während des Motorbetriebs hervorrufen [Berl09]. Um jedoch ein höheres Druckeigenspannungsniveau in der Endbearbeitung erzielen zu können, wurden tribologisch wirksame Elemente wie z.B. Phosphor und Schwefel hinzugegeben. Diese lagern sich nachweislich in die Werkstückrandzone ein und beeinflussen ihrerseits die Reibung im Motorbetrieb durch die Bildung von Reaktionsschichten. Andererseits kann durch die Reduktion der Kontaktzeit in der Vorbearbeitung die Höhe der Druckeigenspannung im Werkstück verringert werden. Im Motorbetrieb führt dies wiederum zu einer Verringerung der Reibung [Berl09, Sche09]. An diesem Beispiel wird der Einfluss der chemischen und mechanischen Oberflächenmodifikationen im Verhältnis zur Werkstoffstruktur auf die Reibung sichtbar. Neben Normalspannungen beeinflussen oberflächennahe Scher- oder Schubspannungen die Ausprägung von Reibung und Verschleiß. Diese entstehen zum Großteil aus tangential wirkenden Lasten, welche während der Bearbeitung durch die Werkzeugkinematik und somit der resultierenden Schnittkraft bestimmt und im Motorbetrieb durch die Gleitreibung von Kolbenring und Kolbenhemd beeinflusst werden. Standardmäßig erfolgt die Ermittlung von Eigenspannungskomponenten anhand von röntgenographischen Untersuchungen, in denen elastische Gitterdehnungen von Festkörperkristallen gemessen werden. Über eine Verknüpfung der Dehnungswerte mit röntgenographischen Elastizitätskonstanten

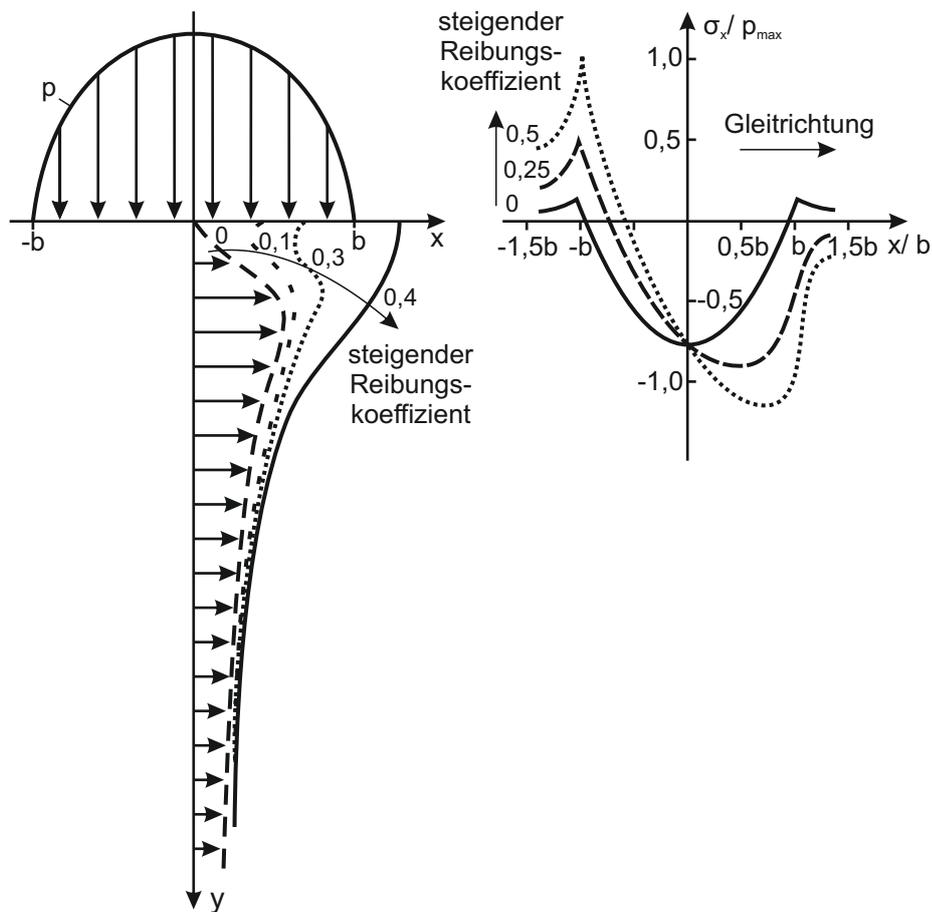


Abbildung 2.5: Links: Position des Schubspannungsmaximums in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten [Holm09]  
 Rechts: Einfluss des Reibungskoeffizienten auf Normalspannungen an der Oberfläche während des Hertz'schen Kontaktes [Hami83]

können den Kristallen Eigenspannungen zugeordnet werden. Unter Anwendung des  $\sin^2 \psi$ -Verfahrens der röntgenographischen Spannungsanalyse können zweiachsige, oberflächenparallele Spannungszustände ermittelt werden, in denen die Komponente des Spannungstensors  $\sigma_{33} = 0$  ist. Nach spanender Bearbeitung oder tribologischem Kontakt treten Abweichungen vom homogenen, azimutalen Spannungszustand durch Scherdeformationen  $\varepsilon_{13}$  und  $\varepsilon_{23}$  auf, sodass die Hauptachsen des Spannungszustandes  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22}$  aus der Oberfläche kippen und somit die Komponenten  $\sigma_{13}$  und/oder  $\sigma_{23}$  nicht verschwinden [Eige95]. Diese elliptischen Gitterdehnungsverläufe werden auch als  $\psi$ -Aufspaltung bezeichnet (Abb.2.6).

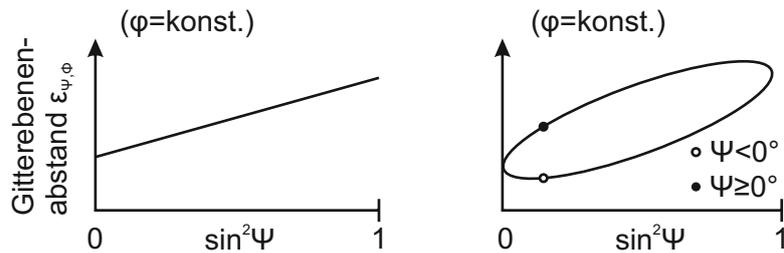


Abbildung 2.6: Links: lineare Dehnungsverteilung,  
Rechts: elliptische Aufspaltung der positiven und negativen  $\psi$ -Werte  
nach [Eige95]

Bereits Bowden und Tabor erkannten in den 50iger Jahren des letzten Jahrhunderts die Bedeutung der Schubspannung, exemplarisch bei der Beschreibung der Viskosität newton'scher Fluide, in der Ausprägung der Reibung respektive Reibkraft.

$$F_r = \tau \cdot A_r \quad (2.2)$$

Unter modellhafter Betrachtung eines Hertz'schen Kontaktes eines Zylinders gegen eine ebene Fläche kann der lastabhängige Spannungszustand theoretisch bestimmt werden. So befindet sich das Maximum der Schubspannung nach Analysen von JOHNSON ET AL. und SUH ET AL. in einer Tiefe, welche ca. 67 % der Hertz'schen Kontaktbreite  $b$  entspricht [John85, Suh86]. Wird dieser Kontakt durch eine tangential Last entsprechend des tribologischen Systems überlagert, bewegt sich das Maximum der Schubspannung mit steigenden tangentialen Lasten in Richtung der freien Oberfläche. Ab einem Tangentialkraftquotienten, respektive Reibungskoeffizienten, von 0,32 liegt das Maximum der Schubspannung auf der Oberfläche [Holm09](Abb. 2.5 links). Was bedeutet dies im Hinblick auf die Reduktion von Reibung? Der Honprozess, als letzter Bearbeitungsschritt vor der bestimmungsgemäßen tribologischen Belastung, ist durch einen Reibungskoeffizienten von ca. 0,3 gekennzeichnet. Hierbei ist aber zu beachten, dass der abrasive Anteil der Reibung, aufgrund des gewünschten Materialabtrags, stark dominiert und somit die im friktiven Kontakt dissipierte Energie geringer ist.

Welche Aussagekraft kann den röntgenografisch ermittelten Schubspannungen beige-messen werden? In Relation zur Größe der inneren und obersten Lagen der äußeren Grenzschicht, welche entsprechend den Modellen nur sehr wenige  $\mu\text{m}$  betragen, scheint es sinnvoll, den Gradienten der Eigenspannung zu kennen, um über diesen Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften der im tribologisch wirksamen Kon-

takt befindlichen Gefügestrukturen zu erlangen. Untersuchungen an Querschliffen tribologisch belasteter Oberflächen, welche durch Ionenfeinstrahlen freigelegt wurden, zeigen eine ausgeprägte innere Grenzschicht. Nach dem Eintrag von Energie durch mechanische Belastung verändert sich die Kornstruktur und bildet ein sehr feinkörniges bis näherungsweise amorphes Gefüge mit Einlagerungen des tribologischen Zwischenstoffes und erhöhter Härte aus (Abschnitt 2.1.3). Dies lässt sich durch die Eindringcharakteristik der Ionen im Ionenfeinstrahlverfahren (Focused Ion Beam) erläutern, welche je nach Ausrichtung des Gitters unterschiedlich stark in das Material eindringen (Abb. 2.7). Diesbezüglich ergibt sich ein unterschiedliches Graufeld entsprechend der Zahl der emittierten Sekundärelektronen. Erkenntnisse zur Ausprägung eines feinkörnigen, superplastischen Gefüges hoher Duktilität und Härte sind allgemein bekannt, nur gibt es bislang wenige stichhaltige Modelle, welche die Prozesse zur deren Bildung beschreiben [Shak04]. Abbildung 2.7 belegt, dass die aus tribologischer Sicht interessante und augenscheinlich amorphe Lage der inneren Grenzschicht mit nachweislich erhöhter Härte nur wenige  $\mu\text{m}$  breit ist. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass deren Breite stark schwankt und somit die lokalen Gefügeeigenschaften stark variieren.

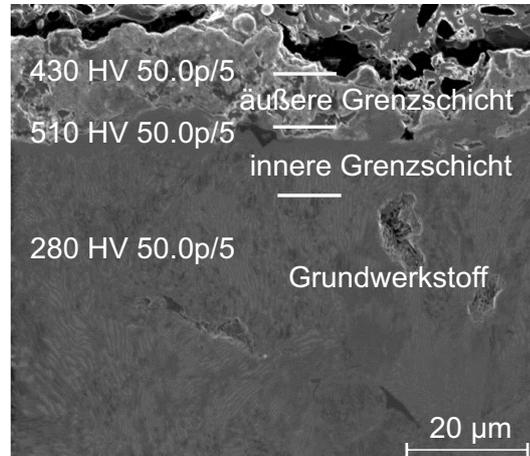


Abbildung 2.7: Mittels Ionenfeinstrahlen freigelegter Querschliff einer gehonten und tribologisch belasteten Oberfläche aus GJL250

## 2.3 Einlauf und Tribomutation

Veränderungen der Reibung, der Verschleißgeschwindigkeit und des Temperaturfeldes sowie der akustischen Emission eines friktiven Kontaktes während der ersten Gleitzyklen sind eindeutige Merkmale eines Einlaufprozesses. Erste Erkenntnisse über den Einlauf tribotechnischer Systeme lieferten Abbott und Firestone. Sie beschrieben den Flächenkontakt einer Gleitpaarung beim ersten Aufeinandertreffen der Körper durch kleine lokale Kontaktflächen, welche sie in der Traganteilkurve, respektive Abbott-Firestone-Kurve, darstellten. Anhand dieser Kurve konnte auch entnommen werden, dass mit zunehmender Einlaufzeit die Größe der Kontaktflächen ansteigt und im Gegenzug die zu Anfang hohe Verschleißgeschwindigkeit abnimmt [Abbo33]. Anhand der Betrachtung der Verschleißgeschwindigkeit kann eine Abgrenzung bzw. Definition des Einlaufes erfolgen. So beschreibt VOLZ in zeitlich diskreten Abständen (Stunden) eine Differenz der Verschleißraten ( $\mu\text{g/h}$ ,  $\text{nm/h}$ ) zu Beginn und zum Ende des Intervalls [Volz76]. Ab einer Differenz kleiner 5% der Anfangsverschleißrate wird von einem Ende des Grobeinlaufes ausgegangen (Abb. 2.8).

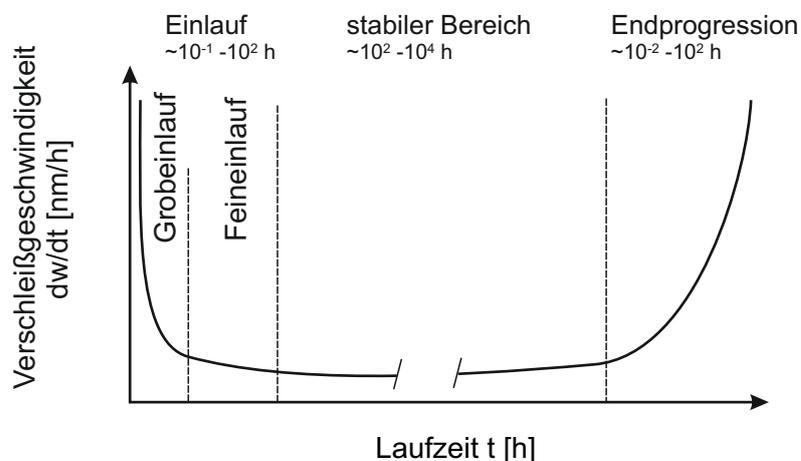


Abbildung 2.8: Verschleißgeschwindigkeit im Bauteillebenszyklus nach [Volz76]

Allgemein und auch heute noch sehr verbreitet lassen sich nach UETZ und VOLZ Modellvorstellungen zum Einlauf tribologischer Systeme mit einer Makroformanpassung und Egalisierung von Rauheitsspitzen mit einhergehender Vergrößerung hydrodynamischer Traganteile beschreiben [Uetz68, Volz76]. Viele wissenschaftliche Arbeiten zeigen den Einlauf anhand einer Reduktion der Rauheit der beteiligten Reibpartner auf. Der zeitliche Rauheitsverlauf während des Einlaufs folgt einer degressiven Funktion,

welche sich einer konstanten Betriebsrauheit nähert. Entsprechend den Untersuchungen von WEN ET AL. aus KEHRWALD ist die Betriebsrauheit keine Funktion der Anfangsrauheit sondern wird ausschließlich von der Systemstruktur und dem Beanspruchungskollektiv des tribologischen Systems definiert [Wen,93, Kehr98]. Diese rein mechanischen Vorstellungen genügen aber nach aktuellem Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse keinem Verständnis des komplexen tribologischen Systems. So zeigt KEHRWALD erstmals umfassend die Notwendigkeit der Erweiterung dieser Modellvorstellungen anhand praktischer Versuchsergebnisse, welche teilweise im Widerspruch zu den eingangs genannten Thesen stehen [Kehr98]. MACH führte Untersuchungen mit verschiedenen endbearbeiteten Oberflächen durch [Mach03]. Er zeigt den Einfluss unterschiedlich additiver Kühlschmierstoffe (KSS) sowie unterschiedlicher Endbearbeitungsverfahren (Glattwalzen, Schleifen und Plateauhonen) auf Reibung und Verschleiß im Betrieb. Zur Quantifizierung der Unterschiede verwendete er ein Stift/Scheibe-Tribometer für den KSS-Einfluss und ein Stift/Buchse-Tribometer für die verschiedenen Fertigungsverfahren. Bei der Variation des KSS wurden Schmierstoffe mit unterschiedlicher Schwefelkonzentration bzw. verschiedenen Phosphor-Additiven verwendet. Durch die Zugabe von Schwefel bis zu einer Höhe von 2,2 % erhielt er eine Verbesserung des tribologischen Verhaltens und ein stabiles Phosphor-Additiv führte zu günstigeren tribologischen Eigenschaften. BERLET untersuchte ebenfalls Schwefelkonzentrationen von 0 %, 5 % und 20 % im KSS (Abb. 1.1)[Berl09, Berl10]. Bei ihm ergibt sich eine Verschlechterung des Reibungs- und Verschleißverhaltens bei Erhöhung der Schwefelkonzentration. Er folgert daraus, dass bei 5 % Schwefelanteil im KSS das Optimum schon überschritten ist. In PÖHLMANN ET AL. wird ein positiver Effekt bei erhöhter Schwefelkonzentration in der Fertigung auf das Funktionsverhalten unter hohen Beanspruchungen nachgewiesen [Pöhl09]. Beide Untersuchungen unterscheiden sich jedoch in der Art der Endbearbeitung und des Werkstoffes. Der Einfluss der Prozessgrößen Kontaktkraft und Kontaktzeit ist wieder in BERLET zu finden [Berl09]. Bei langer Kontaktzeit in der Fertigung stellen sich schlechte Reibungs- und Verschleißwerte im Betrieb ein. Bei der Kontaktkraft scheint es ein Optimum zu geben, zu hohe Kräfte wirken sich generell negativ aus. Bei den von MACH untersuchten unterschiedlichen Fertigungsverfahren demonstriert wiederum die glattgewalzte Oberfläche die besten Eigenschaften [Mach03]. Die Ursache für die Unterschiede in den Messergebnissen sehen die Autoren in der unterschiedlichen Ausbildung und chemischen Zusammensetzung der oberflächennahen Grenzschichten. Zur Erklärung nutzen sie das Modell der Tribomutation, das von GERVÉ ET AL. vorgestellt und von weiteren Autoren verwendet wird [Kehr93, Kehr99, Sche03a, Berl10]. Bei diesem Modell wird die in die Körper eingebrachte Reibungs-

energie  $E_R$  nicht nur in Wärmeenergie  $E_Q$  und Verschleißenergie  $E_W$  umgesetzt, sondern führt auch zu Tribomutationen  $E_{Tr}$  in den oberflächennahen Bereichen.

$$E_R = E_Q + E_W + E_{Tr} \quad (2.3)$$

Unter dem Begriff der Tribomutation werden Veränderungen der Gitterstruktur, der Elementzusammensetzung und der chemischen Bindungen zusammengefasst. Da die Endbearbeitung der Körper ebenfalls als ein tribologischer Prozess gesehen werden kann, kommt es dabei schon in Abhängigkeit vom KSS, vom Umgebungsmedium und der Menge der eingebrachten Energie (abhängig von den wirkenden Schnittkräften) zur Bildung von tribomutierten Schichten, die einen Einfluss auf das spätere tribologische Verhalten ausüben (Vorkonditionierung). Nach BERLET und MACH ist die Dicke der entstehenden Schicht abhängig vom Fertigungsverfahren [Mach03, Berl09]. Beispielsweise können mit Feindreihen, bei dem die Oberfläche nur einmal überstrichen wird, nur wenige nm dicke Schichten erzeugt werden, während beim Bearbeiten mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie dem Honen, schon deutlich größere Schichtdicken erzeugt werden können.

Einen exemplarischen Verlauf des Reibungskoeffizienten während des Einlaufvorganges zeigt Abbildung 2.9. Hierbei handelt es sich mit Fokus auf das reale System Kolbenring/Zylinderlauffläche um einen geschmierten Metall/Metall-Kontakt unter konstanten äußeren Lasten. Der anfängliche Anstieg der Reibung in Phase 1 kann mit der Zunahme von Adhäsion durch das Aufbrechen und Entfernen von Oberflächenverunreinigungen und Oxiden und der damit verbundenen Vergrößerung der wahren Kontaktfläche  $A_r$  erklärt werden. Energetisch betrachtet deutet dies auf eine Zunahme der Grenzflächenenergie im Zuge der Ablösung von Material der Oberfläche hin [Czic10]. Da die Ausbildung einer Adhäsionsbindung in metallphysikalischer Hinsicht stark von der Elektronendichte der Grenzflächen bestimmt wird, kann auf ein „Freilegen“ rein metallischer Strukturen geschlossen werden. Diese verfügen im Gegensatz zu deren Oxiden über eine höhere Elektronendichte. Phase 2 kann durch die Bildung einer Reaktionsschicht niedriger Scherfestigkeit aus den beteiligten Elementen des Schmierstoffes charakterisiert werden.

Der im Einlauf stattfindende Vorgang der Tribomutation setzt sich bis zum Erreichen eines stabilen Zustands fort. Voraussetzung ist dabei das Auftreten von Mischreibungszuständen. Neben der partiellen Glättung der Rauheitsspitzen (Erreichen der Betriebsrauheit) entstehen in den oberflächennahen Bereichen der Körper stabile Grenzschichten, die durch gleiche Neubildungs- und Abtragsraten charakterisiert sind und zwischen de-

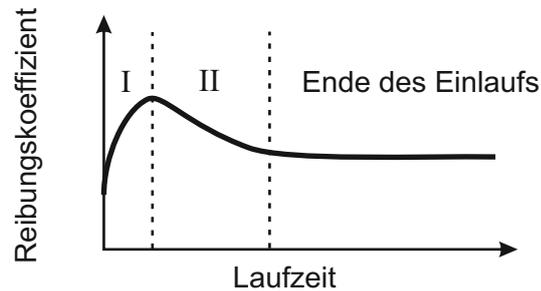


Abbildung 2.9: Exemplarischer Verlauf des Reibungskoeffizienten während des Einlaufs [Blau05]

nen die Reibung maßgeblich stattfindet. Diese Schichten werden in der Literatur auch als „Dritter Körper“ bezeichnet [Kehr99, Fill07]. Der Vorgang der Entstehung der Grenzschichten geht mit dem „mechanical mixing“ einher [Popo99, Pani00, Rign00, Sche03a, Pöhl10]. Der Aufbau und die Zusammensetzung des „Dritten Körpers“ unterscheiden sich deutlich von den Eigenschaften der Grundkörper. Meist entsteht ein sehr feinkörniges Gefüge mit Korngrößen im Nanometerbereich mit superplastischen Eigenschaften in Form von hoher Härte und Festigkeit. Zu einer Änderung der chemischen Zusammensetzung kommt es, wenn Elemente aus dem Schmierstoff und dem Umgebungsmedium und den beteiligten Reibkörpern aufgrund von Reibungsvorgängen in die Grenzschicht gelangen oder durch Verschleiß abgetragen werden. Die Dicke des „Dritten Körpers“ und seine Zusammensetzung hängen von der Höhe der eingebrachten Reibungsenergie und dem Grad der Mischreibung ab und können durch die Einlaufparameter Last und Geschwindigkeit beeinflusst werden [Popo99, Rign00]. Zur Erreichung eines stabilen Zustandes, in welchem die Neubildungsmechanismen gegenüber dem Verschleiß dominieren, müssen die Prozesse der Tribomutation und Grenzschichtbildung näher betrachtet werden. Entsprechend des Verschleißmodells von FILLOT ET AL. werden Partikel im mechanischen Kontakt vom Grundkörper abgelöst und bilden den „Dritten Körper“ der spezifischen Masse  $m_i$  [Fill07]. Der Massenstrom  $\dot{m}_s$  bezeichnet die Neubildungsrate, wohingegen der Massenstrom  $\dot{m}_w$  die aus dem Kontakt entfernte Verschleißmasse beschreibt. Dem entsprechend gilt als Voraussetzung für die Bildung eines stabilen Zustandes

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_s - \dot{m}_w \geq 0. \quad (2.4)$$

Durch die Ablösung von Verschleißpartikeln  $m_s$  im Bereich der Mischreibung wird die Masse des „Dritten Körpers“  $m_i$  erhöht. Der „Dritte Körper“ wiederum dämpft die mechanischen Lasten und Relativgeschwindigkeiten, was sich negativ auf  $m_s$  auswirkt. Andererseits wird der Ausstoß von Partikeln  $m_w$  durch eine entsprechend große Masse  $m_i$  gefördert, wodurch sich  $m_i$  verringert. Der „Dritte Körper“ weist aufgrund seiner Inhomogenität eine im Vergleich geringere Scherfestigkeit auf und lässt sich in seinen mechanischen Eigenschaften eher einem Fluid zuordnen, was dazu führt, dass Scherung vermehrt im „Dritten Körper“ stattfindet. Beim Erreichen der maximalen Scherspannung  $\tau_{max}$  kann es zur Materialablösung kommen. Nach FILLOT ET AL. ist die Scherspannung  $\tau_{max}$  konstant, was bedeutet, dass die Schergeschwindigkeit  $dx/dt$  des „Dritten Körpers“ proportional zu dessen Dicke und somit auch die dissipierte spezifische Leistung proportional zur Dicke  $m_i$  im kontinuierlichen Verschleißprozess ist [Fill07].

$$P_d = \tau_{max} \frac{dx}{dt} \approx m_i \quad (2.5)$$

Eine umfassende Analyse des Einlaufvorganges, der Prozesse der Tribomutation und somit der Bildung eines stabilen Zustandes durch den Aufbau eines „Dritten Körpers“ können über die Analyse des Verschleißverhaltens erreicht werden. Die Art des Einlaufs kann direkte Auswirkungen auf die Bildung des „Dritten Körpers“ und auf die Verschleißgeschwindigkeit (Verschleißrate) haben [Sche03a, Berl09]. Die Verschleißraten können durch einen optimierten Einlauf deutlich gesenkt werden. Zwar kann die Verschleißrate während eines optimierten Einlaufs höher ausfallen als bei einem suboptimalen Einlauf, aber im Anschluss daran stellen sich beim optimierten Einlauf deutlich geringere Verschleißgeschwindigkeiten ein. Dieser Effekt kann noch lange während des regulären Betriebes beobachtet werden und ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass sich unterschiedliche, aber jeweils stabile Zustände des „Dritten Körpers“ einstellen. Die Abhängigkeit des Verschleißes von den Betriebsbedingungen wird in POPOV ET AL. präsentiert [Popo02]. Es wird gezeigt, dass Temperatur, Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit in Synchronisierungen bei gegebener Werkstoff/ Schmierstoff-Paarung bestimmen, ob sich eine Verschleißhochlage (instabiler Zustand) oder ein nahezu verschleißfreier Betrieb (stabiler Zustand) einstellt. In diesem Mechanismus spielt die Stabilität der Grenzschichten („Dritter Körper“) eine entscheidende Rolle.

### 2.3.1 Einfluss der Laufflächentopografie auf die tribologischen Eigenschaften

Die Ausbildung tragfähiger Plateaustrukturen dominierte in den letzten Jahren die Diskussion über die Reduktion von Reibung und Verschleiß im Bereich der Misch- und Grenzreibung. Deren Vorteil wurde in der geringen Kontaktfläche der Spitzenrauheit bei gleichzeitigem Transport und Speicher von Schmierstoff gesehen [Jeng96]. Eine Weiterentwicklung der Plateaustruktur stellt die sogenannte Gleithonung, im Falle der Steigerung des Honwinkels bis  $140^\circ$  auch Spiralgleithonung, dar. Theoretische Betrachtungen konnten eine Reduktion des Reibungskoeffizienten für Honwinkel im Bereich von  $40^\circ - 55^\circ$  und  $115^\circ - 130^\circ$  darlegen [Mezg12]. Im Praxistest konnten Vorteile in Reibung und Verschleiß spiralgelöhter Gusseisen-Oberflächen beim Einsatz in Nutzkraftwagen erzielt werden [Hoen09]. Eine positive Auswirkung der Erhöhung des Honwinkels in Kombination mit thermisch gespritzten Laufflächen konnte in einigen Modelltests jedoch nicht bestätigt werden [Ande08]. Eine der umfangreichsten Arbeit in den letzten Jahren zum Einfluss der Oberflächentopografie von Zylinderlaufbahnen auf die Reibung der Kolbengruppe liefert [Heub07]. In dieser Arbeit erfolgt eine präzise Beurteilung von Honstrukturen und definierten Oberflächentopografien. Die untersuchten Honstrukturen gegenüber einer Serienhonung sind

- eine D15-Honung (Diamant der mittleren Körnung  $15 \mu\text{m}$ ),
- eine Spiegelhonung,
- eine Feinsthonung,
- eine feine Honung mit Politur,
- eine feine Honung mit „Keramofinish“ (nicht näher erläutert) und
- eine Oberfläche mit definierten Schmierstoffspeichern, durch Lasern und Ätzen generiert sowie
- weitere Strukturen auf thermisch gespritzten Oberflächen.

Die Ergebnisse im simulierten Fahrzeugrollentest nach „neuem europäischen Fahrzyklus“ ergaben bei der Keramofinish-Oberfläche einen Vorteil im Kraftstoffverbrauch um ca. 1,5 % gegenüber der Serienhonung und somit ein verbessertes Einlaufverhalten indiziert durch eine sehr feine Oberflächenstruktur (Abb. 2.10). Theoretische Modelle in HEUBERGER konnten ebenso eine Verbesserung der Reibleistung beim Übergang

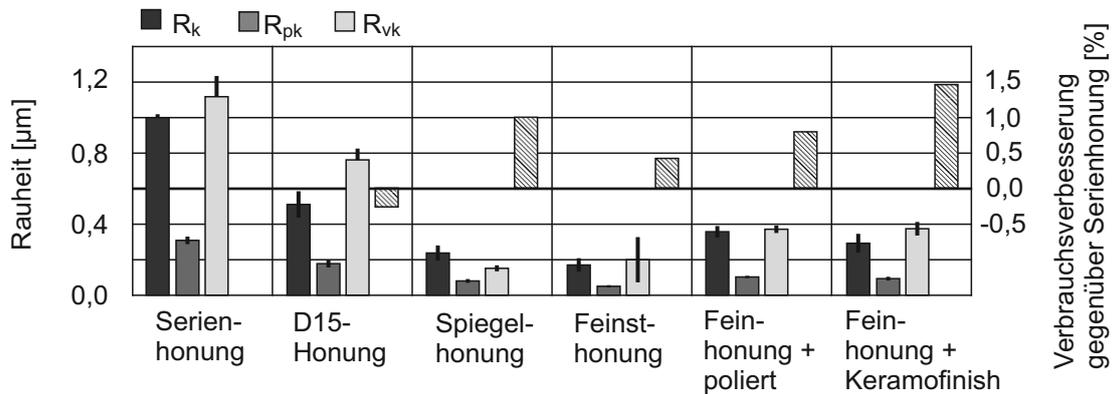


Abbildung 2.10: Vergleich einer Serienhonung mit weiteren Honstrukturen im Einzylinderprüfstand nach [Heub07]

von einer Serienhonung zur Feinsthonung belegen [Heub03]. Eine zusätzliche Option zur Reduzierung der Reibung und Erhöhung der Fresssicherheit stellen definierte Strukturen dar. Deren Funktionalitäten werden in Kapitel 2.4.4 erläutert.

## 2.4 Industrielle Endbearbeitung von Zylinderlaufflächen

In der Großserienfertigung von Pkw-Verbrennungsmotoren kommen die unterschiedlichsten Endbearbeitungsverfahren zum Einsatz. Das Innenrundhonen im Langhub nach DIN 8580 bzw. DIN 8589-14 ist hierbei von entscheidender Bedeutung (Abb. 2.11). Ziel der Endbearbeitung ist die Reduzierung von Form- und Maßabweichungen bei gleichzeitiger Generierung eines bestimmten Oberflächenprofils. Die prozessstabile Reduktion von Formabweichungen, exemplarisch eine Zylinderformabweichung von 6 μm bei einem Bohrungsdurchmesser von 80 mm und einer Bohrungslänge von 150 mm, stellt eine nicht zu unterschätzende Anforderung dar, welche bisher nur durch das Langhubhonen wirtschaftlich umzusetzen war.

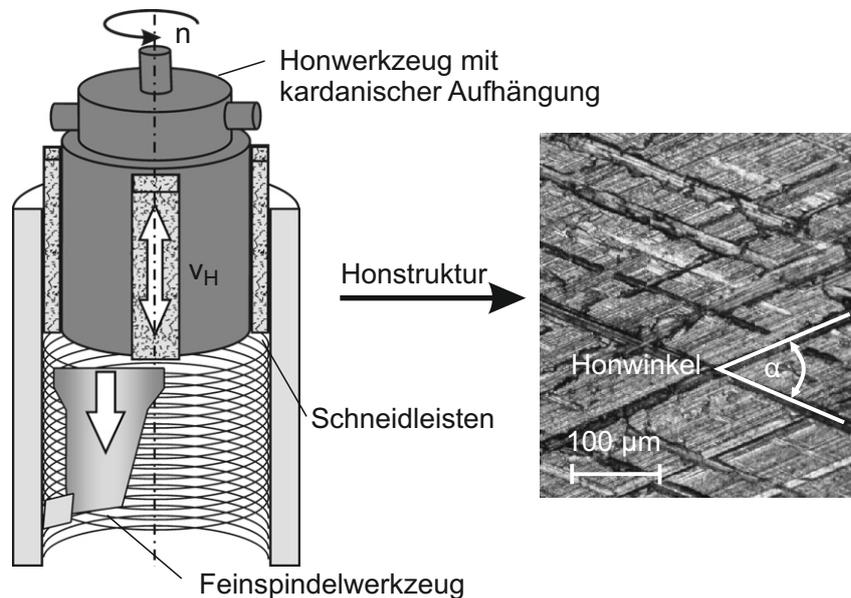


Abbildung 2.11: Honprozesses mit resultierender Oberflächenstruktur

In Abbildung 2.12 wird die Systemstruktur bzw. Komplexität dieses Endbearbeitungsverfahrens anhand der Beziehungen der Prozesskenngrößen deutlich. Da der Werkstoffabtrag im Verhältnis zur Eingriffsfläche sehr gering ist, kommt es lokal zu sehr unterschiedlichen Kontakt- und somit Eingriffsbedingungen. Daher stellt sich der Honprozess zeitlich und örtlich sehr differenziert dar. Eine effektive Charakterisierung der Prozesskenngrößen kann somit nur integral oder über eine entsprechende Mittelung erfolgen.

Die Forderung nach einer nachhaltigen Produktion ohne den intensiven Einsatz von Kühlschmierstoff und der Flexibilität von Produktionskapazitäten führt zu Betrachtungen weiterer Finishverfahren, wie dem Feinspindeln, Laserbelichtungsverfahren oder der Integration von Honprozessen auf Bearbeitungszentren [Auri13]. Durch den zukünftig steigenden Einsatz von Laufflächenbeschichtungen und den damit verbundenen Änderungen von Produktionsprozessen und stofflichen Gefügestrukturen gewinnen alternative Finishverfahren an Bedeutung.

Als Schneidstoffe kommen beim Langhubhonen überwiegend Diamant, kubisch kristallines Bornitrid oder Keramik, wie Korund oder Siliziumkarbid, zum Einsatz. Als Bindung wird hierbei Kunstharz aus Duroplasten, Keramik aus Kaolin, Ton bzw. Quarz oder gesintertes bzw. galvanisch aufgetragenes Metall verwendet. Das Honen zählt zu den Fertigungsverfahren mit hohem KSS-Durchsatz in Form von Schneidölen oder Emul-

**Der Honprozess als funktionales System**

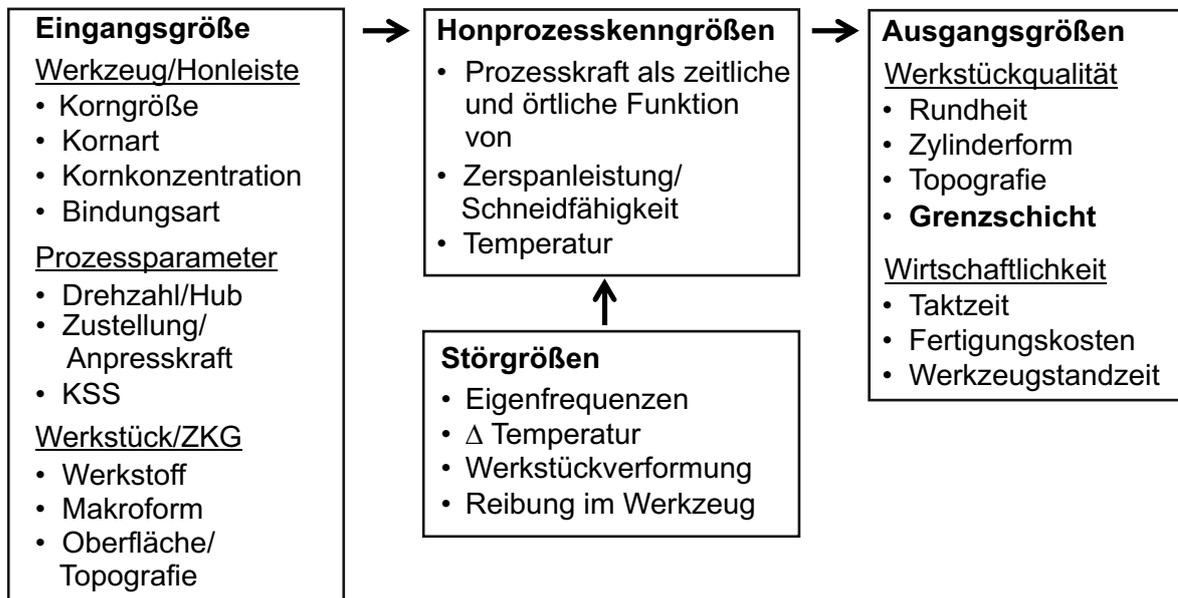


Abbildung 2.12: Systemschaubild des Honprozesses

sion. Eine erste Diversifikation für die Endbearbeitung stellt der Grundwerkstoff der Lauffläche dar. Dieser variiert entsprechend den Anforderungen an das Aggregat und kann grob in folgender Übersicht beschrieben werden:

- Eisengusswerkstoffe mit unterschiedlichen Legierungszusätzen,
- Eisenbasislegierungen in Form von gegossenen Linern oder Beschichtungen unterschiedlichster Technologien,
- metallische Verbundmaterialien unter Nutzung nachfolgender Technologien [Schm06],
  - Guss von übereutektischen Legierungen z.B. Aluminium-Silizium,
  - Infiltration von Partikeln in ein offenporiges Gerüst z.B. Magnesium-Matrix Legierungen,
  - pulvermetallurgisch hergestellte Materialien,
  - Einrühren harter Partikel in die Schmelze z.B. Korund oder Siliziumkarbid,
  - Sprühkompaktierte Zylinderliner,
  - Laserlegieren,

- Thermisches Spritzen und
- Galvanisches Beschichten.

Exemplarisch am Beispiel eines Gusseisen-Liners ergibt sich die folgende Darstellung unterschiedlicher Honvarianten analog [N.N.09a]:

- 2-stufiges Honen bzw. Peakhonen (Strukturen mit relativ gering ausgeprägter Riefentiefe),
- Plateauhonung,
  - konventionelle Plateauhonung,
  - Gleithonung (Strukturen mit geringer Spitzenhöhe),
  - Spiralgleithonung (Gleithonung mit großem Honwinkel),
  - Bürsthonung (Freilegung von Graphit an der Oberfläche),
  - Glätthonung inkl. Fluidstrahlen (Ausbrechen von Karbiden zur Generierung von Schmierstoffspeichern) und
  - Fein-, Feinst- und Spiegelhonungen (Strukturen mit geringer Riefentiefe).
- Sigma-Honung (Auslegung zur Generierung von Druckeigenspannungen),
- Honen + Laserstrukturieren (Schaffung von Kavitäten zur Schmierstoffspeicherung) und
- Polierhonen mit Graphitfreilegung bzw. UV-Photonen Laserbelichten [Geza05].

Die aufgeführten Honverfahren unterscheiden sich im Bearbeitungsergebnis in der Ausprägung des tragenden Profils in Form stabiler Plateaus oder einer hohen Anzahl an Spitzen, der Gesamtstrukturhöhe, geprägt durch die Riefentiefe und dem damit verbundenen Schmierstoffspeichervolumen und den additiv ergänzenden Schmierstoffspeicherkapazitäten, welche durch eine definierte Struktur oder durch das gezielte Herausbrechen von harten Phasen ermöglicht werden. Eine markante Abweichung zur Bearbeitung thermisch gespritzter Laufflächen stellt die Porosität der Beschichtung dar. Diese dient als fein verteilter Schmierstoffspeicher, was die aufgeführten Eigenschaften gehonter Oberflächen nahezu unbedeutend macht und lediglich die Forderung nach einer sehr glatten Lauffläche und makroskopisch tolerierten Form stellt. Die Honprozessauslegung zur Modifizierung der oberflächennahen Gefügeeigenschaften ist im Vergleich relativ neu und ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

### 2.4.1 Grundlagen zum Zerspanverhalten beim Honen

Beim Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide, was im Grunde das tribotechnische System Honleiste/ Graugussoberfläche darstellt, unterscheiden sich die Eingriffsverhältnisse zu den Verfahren mit bestimmter Schneide deutlich. Kennzeichnend für Verfahren wie dem Honen sind der stark negative Spanwinkel und eine größere sekundäre Scherzone an der Freifläche (Abb. 2.13). Auf Grund der unbestimmten Korngeometrie können sich mehr aktive Schneidflächen im Eingriff befinden. Diese einzelnen Prozesskenngrößen, wie Spannungsdicke oder Zerspankräfte, sind nur statistisch zu beschreiben. Die Körner sitzen wie beim Schleifen fest in der Bindung und ragen entsprechend theoretischer Betrachtungen ca.  $1/3$  der Korngröße bei metallisch gebundenen Schneidkörpern heraus.

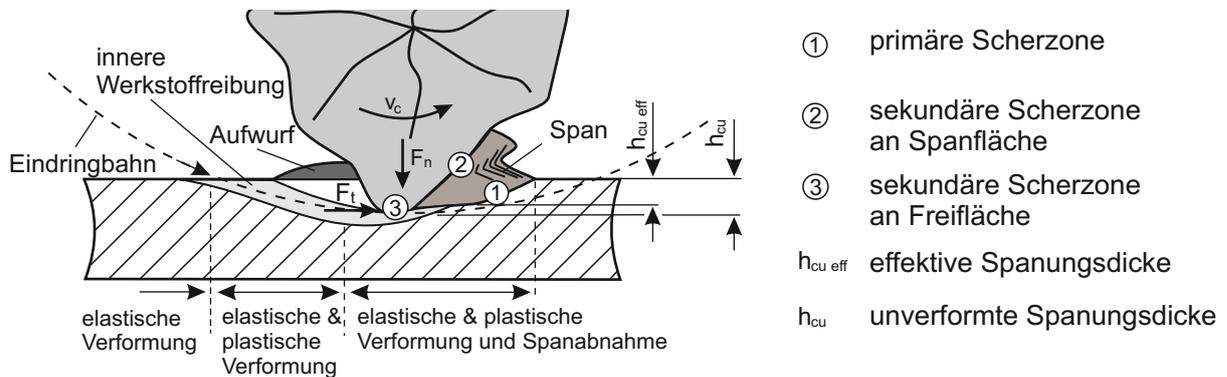


Abbildung 2.13: Spanbildung beim Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide entsprechend der Kinematik eines Schleifprozesses analog [Töns95, Denk11]

Erste umfassende praktische Untersuchungen und ausführliche Dokumentationen bestehender Arbeiten zu Spanbildungsmechanismen beim Honen wurden von MASKUS vollzogen [Mask91]. Zwar liefern Einkornritzversuche gute Erkenntnisse zu Spanbildungsmechanismen, jedoch stellen die statistische Verteilung der Schneidkörner und deren mechanisches Verhalten während des Prozesses immer noch eine gewisse Unschärfe im Zerspanverhalten dar. Die Geometrie der Schneidkörner ist selten optimal, so dass es beim Abspanvorgang nicht zwangsläufig zum Mikrospanen kommt. Vielmehr ist das System durch (sich wiederholende) plastische und elastische Werkstoffverformung gekennzeichnet, an deren Ende die Spanabnahme steht. Je nach Korngeometrie, die hauptsächlich aus stumpfen Körnern mit flachen Kanten besteht, verän-

dert sich die Eindringtiefe und somit der Abspannvorgang (Abb. 2.13). Beim Mikropflügen wird der Werkstoff seitlich aus der Kornriebe verdrängt und durch die Bindung in benachbarten Bereichen wieder angedrückt. Erst nach mehrfachem Übergleiten und weiterer plastischer Verformung kommt es durch Materialermüdung zum Abtrag. Ist die Eindringtiefe noch geringer, kommt es zum Mikrofurchen, das in geringen Tiefen durch plastisches Querfließen hohe Spannungen hervorruft und dünne Plättchen vom Material abplatzen lässt. Beim Schleifen sind die Körner nur teilweise im Eingriff und laufen oft auf zykliden Bahnen, was einen Unterschied zum Honen ausmacht. Dort ist der Radius des Werkzeuges gleich dem der Bohrung, so dass stets ein Eingriff mit Ausnahme des oberen und unteren Honüberlaufes vorliegt. Diese Tatsache ist auch beim Werkstoffstau zu berücksichtigen, bei dem die Körner den Werkstoff vor sich herschieben und dieser dann nur seitlich ausweichen kann. Dabei wird die Bindung stark beansprucht [Flor92, Pauc08, Denk11]. Der Kornverschleiß tritt sofort nach den ersten Kontakten auf. Zu Beginn des Honvorganges mit ungenutzten Honleisten sorgen die spitzen Körner für höhere Rauheiten. Mit zunehmender Zahl bearbeiteter Werkstücke ergibt sich ein fallender Verlauf der Rauheit. Das Arbeitsprofil hat sich ausgebildet. Es stellt sich ein stationärer Bereich ein, der auf ein Selbstschärfen der Körner hinweist. Der Verschleiß von Körnern und Bindung sollte in gleichen Verhältnissen ablaufen. Ist der Bindungsverschleiß größer, kommt es zu vorzeitigem Ausbrechen der Schneidkörner und somit zu niedrigeren Standzeiten. Dominiert der Kornverschleiß, resultiert aus der geringen Eingriffshöhe ein schlechtes Schneidverhalten. Dies zeigt die Relevanz des Bindungskontaktes für die Scherbeanspruchung der Werkstückoberfläche. Nach WEIGMANN ist eine Separierung zwischen Bindungs- und Schneidkornkontakt möglich, was in seinen Untersuchungen zu einem Bindungskontakt bei diamantbestückten Honleisten von bis zu 75 % führen kann [Weig97]. Aus SCHERGE ET AL. ist bekannt, dass beim Honen von Gusseisen eine Keramikbindung niedrigere Reibungs- und Verschleißwerte bedingt als eine Kunstharzbindung [Sche05]. Die Oberflächen weisen bei der härteren keramischen Bindung schärfere Konturen auf. Bei verringertem Anpressdruck und verlängerter Honzeit ist bei der Keramikbindung von einer schonenden Endbearbeitung die Rede. In diesem Kontext werden Eigenspannungen angeführt. Es zeigt sich, dass Kunstharzbindungen stärker das Einbringen von Druckeigenspannungen begünstigen [Berl09]. Mit zunehmender Zerspanleistung nehmen diese ab und Zugeigenspannungen können auftreten. Demgegenüber steht die oft genannte positive Wirkung von Druckeigenspannungen, die durch eine mögliche Grenzschichtverfestigung erklärt wird und beim Honen, auch durch die geringen Prozesstemperaturen, stärker ausgeprägt ist als bei anderen Verfahren. Die Vorteilhaftigkeit von Druckeigenspannun-

gen im Betrieb eines tribologischen Systems ist nicht belegt und generell von dessen Funktion abhängig. In SABRI ET AL. wird ebenfalls der Einfluss der Bindung, speziell bei Diamantkorn, auf den Honprozess untersucht [Sabr09, Sabr10]. Demnach haben metallisch gebundene Diamant-Honleisten die Eigenschaft, die Blechmantelbildung zu fördern. Diese Materialverquetschungen und Verschuppungen setzen die Honriefen zu und können sich im Betrieb lösen, was an axialen Riefen zu erkennen ist. Außerdem werden die Graphitlamellen überschmiert, was dem Notlaufverhalten abträglich sein kann. Generell tritt die Blechmantelbildung durch die plastische Verformung des Materials auf, was bei stumpfen Honleisten verstärkt vorkommt. Es wird angeregt, trotz der höheren Standzeit von Metallbindungen, den Einsatz von Keramik- oder Kunstharzbindungen zu prüfen. Diese erzielen deutlich bessere Oberflächenqualitäten und können bei optimierter Korngröße vorteilhaft sein. Der Blechmantel stellt somit einen maßgeblichen Einflussfaktor auf den abrasiven Verschleiß dar. In Untersuchungen von DIMKOVSKI ET AL. wird die Blechmantelausprägung entlang einer befeuerten Lauffläche von Nutzkraftfahrzeugen analysiert [Dimk09, Dimk10]. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Veränderung der Honriefengestalt im Bereich des oberen Totpunktes und der unterhalb gelegenen Laufflächenbereiche. So nimmt die Anzahl der vertikalen Riefen, welche durch Blechmantelpartikel hervorgerufen werden, vom oberen zum unteren Totpunkt ab. Hingegen werden durch fortschreitenden Verschleiß am oberen Totpunkt die Materialverquetschungen sukzessive eliminiert. Somit muss bei allen Betrachtungen zum Einlaufverhalten von Zylinderlaufflächen auch der Zustand der Honriefen Berücksichtigung finden.

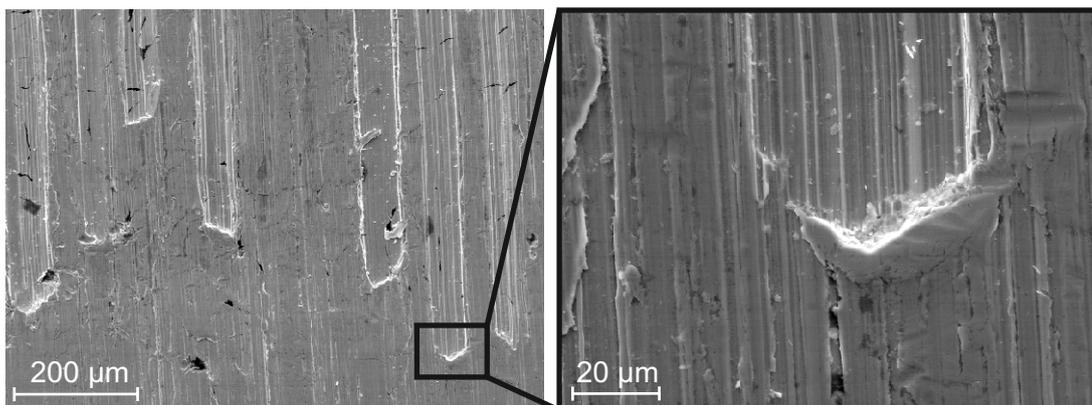


Abbildung 2.14: SEM Analyse der Schnittunterbrechung beim Honen

Eine experimentelle Analyse der Blechmantelbildung konnte durch eine Schnittunterbrechung vollzogen werden (Abb. 2.14). Aus der bildlichen Darstellung mittels Sekundärelektronen wird deutlich, dass die Graphitlamellen durch das Schneidkorn, im vorliegenden Fall Diamant, sauber geöffnet werden. In Abhängigkeit der Schnitttiefe treten Verschuppungen in unterschiedlicher Größe entlang der Honriefe auf. Durch ein sogenanntes Ausfeuern, der Bearbeitung mit sehr geringen bis keinen Aufweitkräften des Honwerkzeuges, kann daher eine Reduktion der Verschuppungen erreicht werden.

### **2.4.2 Der Einfluss des Kühlschmierstoffes beim Honen**

Prinzipiell weisen wässrige Lösungen bzw. Emulsion und Honöl unterschiedliche Spannungscharakteristika bzw. Eigenschaften auf. So weisen viele Hersteller dieser KSS auf die verschiedenen Gebrauchseigenschaften hin. Neben der Spülwirkung muss der KSS auch die Anhaftung von Spänen am Leistenträger verhindern, was zur Minderung der Beweglichkeit des Zustellmechanismus führen kann. Bei der Verwendung von Schneidstoffen aus SiC in keramischer Bindung wird der Einsatz von Honöl bei vergleichsweise hohen Pressungen von 3 - 4 N/mm<sup>2</sup> empfohlen, wohingegen CBN- und Diamantschneidmedien in metallischer Bindung vorzugsweise mit Emulsion als KSS verwendet werden sollten [N.N.10]. Generell muss beim Einsatz von Honöl im Vergleich zur Emulsion mit einer gesteigerten Prozesszeit und erhöhtem Anpressdruck kalkuliert werden, da die Abtragsgeschwindigkeit mit steigender KSS-Viskosität sinkt. Jedoch wird durch eine verbesserte Schmierung die Reibung zwischen Schneidkorn und Werkstoff reduziert, was einen gleichmäßigen Schnitt und eine regelmäßige Riefenausprägung begünstigt [Flor92]. Eine gesteigerte Anpresskraft wirkt sich insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen auf die Formabweichung des Bearbeitungsprozesses aus. Durch den Einsatz von Emulsion kann die Anpresskraft auf 1 - 2 N/mm<sup>2</sup> reduziert werden.

### **2.4.3 Oberflächencharakterisierung**

Unter dem Aspekt der prozesssicheren und funktionsorientierten Bewertung der Qualität gehonter Oberflächen kommt der Erfassung und Bewertung von Profilmessgrößen hohe Bedeutung zu. Diese Thematik stellt aufgrund der Vielzahl durchgeführter Arbeiten auch in Korrelation mit funktionellen Betrachtungen ein umfangreiches Forschungsgebiet dar. Neben der Aufnahme von zwei- und dreidimensionalen Profilen, vorzugsweise durch taktile oder optische Messung, sind die Filterung und abschließende Auswer-

tung ein zentrales Element der funktionellen Oberflächenanalyse. Zur Beschreibung funktionaler Oberflächen eignen sich im ersten Ansatz die in ISO13565-2 beschriebenen Kenngrößen der Amplitudendichte- bzw. Abbott-Kurve ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ) [ISO196b]. Eine umfassendere Bewertung ermöglicht die Darstellung der Traganteilkurve auf Basis dreidimensionaler Daten ( $S_{pk}$ ,  $S_k$ ,  $S_{vk}$ ). Durch die Nutzung dieser Kennwerte kann der Materialanteil in verschiedenen Schnitttiefen und somit exemplarisch das Schmierungsverhalten oder das tragende Flächenprofil verdeutlicht werden. Diese Informationen können durch die sogenannte Motif-Methode ISO12085 ergänzt werden [ISO196a]. Über die Länge eines Motifs kann der Abstand zwischen funktionswirksamen Spitzen und Riefen abgeschätzt werden. Speziell die dreidimensionale Rauheitsbewertung, welche noch nicht vollständig in Normen beschrieben wird, liefert Mehrinformationen in Form der räumlichen Verteilung von Strukturelementen. Exemplarisch am Beispiel laserstrukturierter Zylinderlaufflächen zeigen WEIDNER und BRINKMANN die Möglichkeit der Detektion und Separierung von Strukturen und Bildung strukturorientierter Kenngrößen [Brin02, Weid07]. Auf dem Strukturniveau gehonter Zylinderlaufflächen sind zahlreiche Algorithmen zur Bildung von senkrechten, waagerechten und hybriden Kenngrößen bekannt [PL02, Lemk03, PL05, Ande09, Herc09]. Senkrechte Kenngrößen dienen dabei der Beschreibung von Amplitudenverteilungen. Waagerechte Kenngrößen kennzeichnen Strukturmerkmale, wie die laterale Dichte einzelner Profiltäler oder die Anisotropie von Strukturen. Hybride Parameter liefern Aussagen über Profilsteigungen. Im Zusammenhang mit funktionellen Eigenschaften wurden diese Kenngrößen im System Kolbenring/Zylinderlauffläche vielfach untersucht. So zeigt exemplarisch [Rose02] den Einfluss der Topografie der Honung auf den Ölverbrauch und Verschleiß auf. Es wird gezeigt, dass bei Betrachtung der Kenngrößen der Abbott-Kurve eine geringe Kernrautiefe in Kombination mit einer geringen Spitzenhöhe den Verschleiß mindern und in Kombination mit einer verringerten Riefentiefe der Ölverbrauch folgerichtig reduziert werden kann. Auch eignen sich diese Kenngrößen gut zur Quantifizierung des Materialabtrages bei der Erzeugung einer Plateauhonung [Corr10]. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden sich in der vorliegenden Arbeit die topografischen Analysen vorzugsweise auf die Kennwerte der Abbott-Kurve beziehen. In Kombination von dreidimensionalen Darstellungen mit genormten Oberflächenkennwerten soll somit eine hinreichende Übersicht der Oberflächentopografie möglich erscheinen. Für eine funktionelle Bewertung der Oberfläche wären Kenntnisse zur realen Kontaktfläche hilfreich. Bei Verwendung dreidimensionaler Datensätze könnte hierzu in erster Näherung die Deformation der Oberfläche infolge der Hertz'schen Pressung auf das gemessene Profil durch Bestimmung einer projizierten Schnittebene übertragen wer-

den. Bei Betrachtung einer idealisierte Deformation der Lauffläche infolge der Eindringung des Kolbenringes (Anhang A.1) wird deutlich, dass hierbei ein Volumenelement im unteren dreistelligen Nanometerbereich verwendet werden muss. Die Durchdringung der realen Oberfläche inklusive langwelliger Profilanteile kann für vergleichsweise große Oberflächenausschnitte im Bereich von mehreren Quadratmillimetern somit nur äußerst aufwendig oder nur sehr stark vereinfacht realisiert werden.

## **2.4.4 Spezielle technologische Entwicklungen beim Honen von Zylinderlaufflächen**

### **Definierte Strukturierung von Laufflächen**

Neben der Generierung einer chemisch und mechanisch veränderten, eingelaufenen Grenzschicht sind Betrachtungen zur Reduktion des abrasiven Verschleißes sinnvoll. Eine stabile Grenzschicht darf nicht durch lose Partikel, also Späne, progressiv abgebaut werden und dem tribologischen System muss genügend Schmierstoff zur Verfügung stehen, um eine gewisse Hydrodynamik zu gewährleisten und im Bedarfsfall Additive zur Grenzschichtbildung bereitzustellen. Dies führt zwangsläufig zu Betrachtungen der Mikrostrukturierung von Laufflächen. Um im Bereich des oberen bzw. auch unteren Totpunktes einer Zylinderlauffläche die Mischreibung zu reduzieren, werden Mikrokavitäten zur Schmierstoffspeicherung in die Oberfläche der Lauffläche eingebracht. In der industriellen Praxis wird dies durch eine Laserstrukturierung erreicht. Die Vorteile der Strukturierung von Laufflächen wurden bereits in zahlreichen Veröffentlichungen dargelegt und sind aktuell Bestandteil vieler Forschungsaktivitäten [BMBF13]. Erste theoretische Aussagen bezüglich des Verhaltens unterschiedlich dimensionierter Kavitäten wurden Anfang der 60iger von Hamilton getroffen, als deren Einsatz bei mechanischen Dichtungen untersucht wurde [Hami66]. Neben diesen liegt ein großes Anwendungsfeld definiert strukturierter Flächen im Bereich der Gleitlagerungen bzw. Gleitführungen sowie im Gesenk- und Formenbau. Entscheidend für die Funktionalität ist die Dimensionierung und Positionierung der Mikrokavitäten. Der hydrodynamische Druckaufbau tribologischer Kontaktflächen wird maßgeblich durch die Art und Anordnung der deterministischen Mikrokavitäten bestimmt. Die wesentlichsten geometrischen Einflussfaktoren zur Generierung des maximalen hydrodynamischen Tragdruckaufbaus in Abhängigkeit des Belastungsfalls sind

- die laterale und Tiefenausdehnung der Struktur,

- die laterale und Tiefenkontur der Struktur und
- die Anordnung bzw. Ausrichtung der Kavitäten zueinander.

Zahlreiche Forschungsaktivitäten basierend auf Simulation, analytischen Modellen und Versuch haben in der Vergangenheit geeignete Strukturen analysiert. So zeigt DENKENA ET AL. in Untersuchungen zur tribologischen Charakterisierung von Funktionsflächen unter Anwendung von fluiddynamischen Simulationstechniken die Beeinflussung der resultierenden Tragkraft durch die Kontur der Mikrokavitäten auf [Denk08a]. Es wurden Konturen ermittelt, welche ausgehend von einem Fluidstrom den hydrodynamischen Druckaufbau und somit die Tragkraft begünstigen. Es zeigt sich deutlich, dass an der einlaufenden Flanke ein Unterdruck und somit eine Sogwirkung und an der auslaufenden Flanke eine Druckwirkung erzeugt wird. Da im System Kolbenring/Zylinderlauffläche eine oszillierende Bewegung der Kontaktpaare zueinander stattfindet, müssen die deterministischen Mikrokonturen nach zwei Bewegungsrichtungen ausgelegt werden. Weiterhin ist festzuhalten, dass die Flankenform einen entscheidenden Einfluss auf den resultierenden Tragdruck ausübt. Grundlegend wirken also seichte Flankenwinkel eher tragkraftfördernd. Bezüglich des Einflusses der Strukturdichte auf den hydrodynamischen Schmierfilmaufbau wurden Untersuchungen an strukturierteren Dichtringen vorgenommen. ETSION ET AL. stellte fest, dass die Effektivität der Mikrokavitäten entscheidend von hydrodynamischen Effekten, zurückzuführen auf Relativgeschwindigkeit, Viskosität und Oberflächenreinheit, sowie hydrostatischen Effekten aufgrund von Druckdifferenzen entlang der Dichtung abhängt [Etsi99]. Im direkten Vergleich wirkte sich das Verhältnis von Strukturtiefe zu Strukturbreite stärker auf den Tragdruck aus als die Strukturdichte [Etsi99]. Eine funktionale Laufflächenstruktur sollte wie folgt aussehen. Eine sehr feine tragende Struktur stellt den Kontakt zum Schmierstoff bzw. Kolbenring sicher. Die Honstruktur hat die Aufgabe, den Schmierstoff gleichmäßig auf der Oberfläche zu verteilen und Mikrokavitäten sorgen für ein ausreichendes Schmierstoffangebot im tribologischen Kontakt. Durch eine gezielte Aufbringung von Mikrokavitäten, beispielsweise durch das Laserstrukturieren, kann demzufolge die Reibung bei vermindertem Ölverbrauch reduziert und der Verschleiß der Laufflächen herabgesetzt werden [Mehr02]. Die Dimension dieser Struktur ist abhängig von der mechanischen Belastung der Zylinderinnenwand, gekennzeichnet durch Lastverlauf, Geschwindigkeit, Innendruck, Temperatur, Schmierstoffeigenschaften etc., in Bereichen von  $l = 1 - 3 \text{ mm}$ ;  $b = 30 - 60 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $h = 25 - 50 \text{ }\mu\text{m}$ . Die Ausrichtung der Struktur verläuft tangential zum Bohrungsumfang und erstreckt sich axial im Bereich des oberen Totpunktes auf  $2 - 4 \text{ cm}$ . Das beschriebene Verfahren ordnet sich im Herstellungspro-

zess von Laufflächen vor bzw. nach der letzten Honoperation ein. Untersuchungen in Fahrzeugrolltests haben einen Vorteil strukturierter Laufflächen in der Verbrauchsreduzierung um bis zu 0,8 % gegenüber konventionellen Honungen und selbst 0,3 % gegenüber optimierten Honungen in [Heub07] herausarbeiten können. Die im Vergleich beste Struktur wurde durch ein Ätzverfahren über die komplette Lauffläche appliziert und beinhaltet folgende Merkmale:

- Zeilenabstand: 250  $\mu\text{m}$ ,
- Näpfchenlänge: 500  $\mu\text{m}$ ,
- Näpfchenabstand: 250  $\mu\text{m}$ ,
- Spaltenversatz: 375  $\mu\text{m}$ ,
- Näpfchenbreite: 30  $\mu\text{m}$  und
- Strukturanteil: 8 %.

Seit Mitte der 90iger Jahre wird das Verfahren des Laserstrukturierens in Kombination mit der Honbearbeitung, umgangssprachlich „Laserhonen“, umgesetzt. Hierbei wird ein Nd: YAG Laser über Umlenkspiegel 90° zur Oberfläche der Bohrung gerichtet und trägt Werkstoff entlang einer definierten Bahn am Bohrungsumfang ab. Die erzeugten Strukturen sind durch sehr steil abfallende Kanten und seitliche Aufwürfe (Schmelzurückstände) gekennzeichnet, sodass über eine nachfolgende Honoperation diese Aufschmelzungen und Oxidaufwürfe entfernt werden müssen (Abb. 2.15). Aufgrund der hohen Härte der Schmelzpartikel neigen die eingesetzten Honleisten der letzten Honstufe zu erhöhtem Verschleiß. Dies muss durch eine zusätzliche Honstufe kompensiert werden.

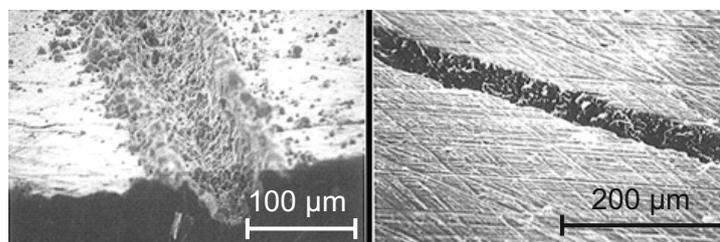


Abbildung 2.15: Laserstruktur mit Schmelzaufwürfen [N.N.09b]

Das Profil der Laserfurche weist dagegen eine sehr raue Oberfläche auf, welche sich im Hinblick auf Haftungseffekte sehr gut zur Ölspeicherung eignet [Klin99]. In der industriellen Praxis erfolgt die Endbearbeitung von Zylinderbohrungen in 4 Stufen. Nach dem Vor- bzw. Zwischenhonen, welches die Makroform generiert, folgt der beschriebene definierte Strukturierungsprozess. In einer abschließenden Glättbearbeitung, dem so genannten Fertighonen, werden die Oxidwürfe entfernt und eine sehr feine plateauartige Gleitfläche wird ausgebildet [Abel03]. Eine aktuelle Neuerung stellt die Anwendung von Ultrakurzpuls-Lasern dar. Diese können die Höhe der Aufschmelzungen reduzieren. Aus tribologischer und fertigungstechnischer Sicht liegen die Vorzüge und Ziele der definierten Mikrostrukturierung von Laufflächen in:

- der Aufrechterhaltung einer Flüssigkeitsreibung mit hydrodynamischer Vollschröpfung,
- der Schaffung einer Oberflächentopografie mit funktionsgerechtem Schmierstoffhaltevolumen und hoher Schmierstoffverweildauer,
- der Toleranzeinengung von spezifischen Profilparametern tribologischer Oberflächen in Kombination mit frei gestaltbaren Reliefs und
- der Forderung, die Dimension von Schmieraschen definiert umzusetzen und deren Ausprägung axial entlang der Lauffläche zu differenzieren.

In Motortestläufen konnte nachgewiesen werden, dass sich durch die Anwendung des Laserstrukturierens der Ölverbrauch um bis zu 80 %, der Verschleiß um bis zu 60 % und die Reibleistung in Form des Reibungskoeffizienten um ebenfalls 60 % drastisch reduzieren lassen. Ein bevorzugtes Anwendungsgebiet bilden Motoren aus Gusseisen, die in der heutigen Zeit noch den Großteil der automobilen Serienproduktion ausmachen. Eine deutliche Abnahme des progressiven Einlaufverschleißverhaltens konnte ebenfalls beobachtet werden [Karr09]. In Untersuchungen zur Gesamtpartikelemission eines Dieselmotors konnten Vorteile im Bereich von 20 - 25 % errungen werden [Abel03]. Diese Ergebnisse konnten in weiteren Untersuchungen auf den starken Anstieg der Ölfilmdicke im Bereich der Strukturierung zurückgeführt werden, welche jedoch nachweislich keine Steigerung des Ölverbrauchs nach sich zieht [Robo99]. In letzter Konsequenz kann dieses Verfahren also den Kraftstoffverbrauch um bis zu 4 % senken bzw. nach DENKENA die Reibungsverluste, gemessen am Reibmitteldruck, um 19 % reduzieren [Denk12].

### Oberflächenkonturierung von Zylinderlaufbahnen

Neben der Optimierung der Mikrostruktur von Laufflächen bieten Konturierungsverfahren hohes Potential zur Minderung von Zylinderformverzügen und somit zur Reduktion von Reibung und Verschleiß. Zylinderformverzüge wirken sich nachteilig auf das lokale Kolbenspiel und somit auf die Reibung, den Ölverbrauch und die Leistungsentfaltung des Motors aus. Prinzipiell resultieren Formverzüge neben fertigungsbedingten Ursachen aus kaltstatischen, dynamischen und thermischen Verformungen. Die vergleichsweise größten Deformationen werden durch die statische Verspannung von Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderkopf hervorgerufen. Eine fertigungsbedingte Zylinderformabweichung, welche sich im Bereich  $\leq 7 \mu\text{m}$  befindet, wird durch die kopfseitige Verspannung mit Dehnschrauben deutlich vergrößert [Schm10, Wien11].

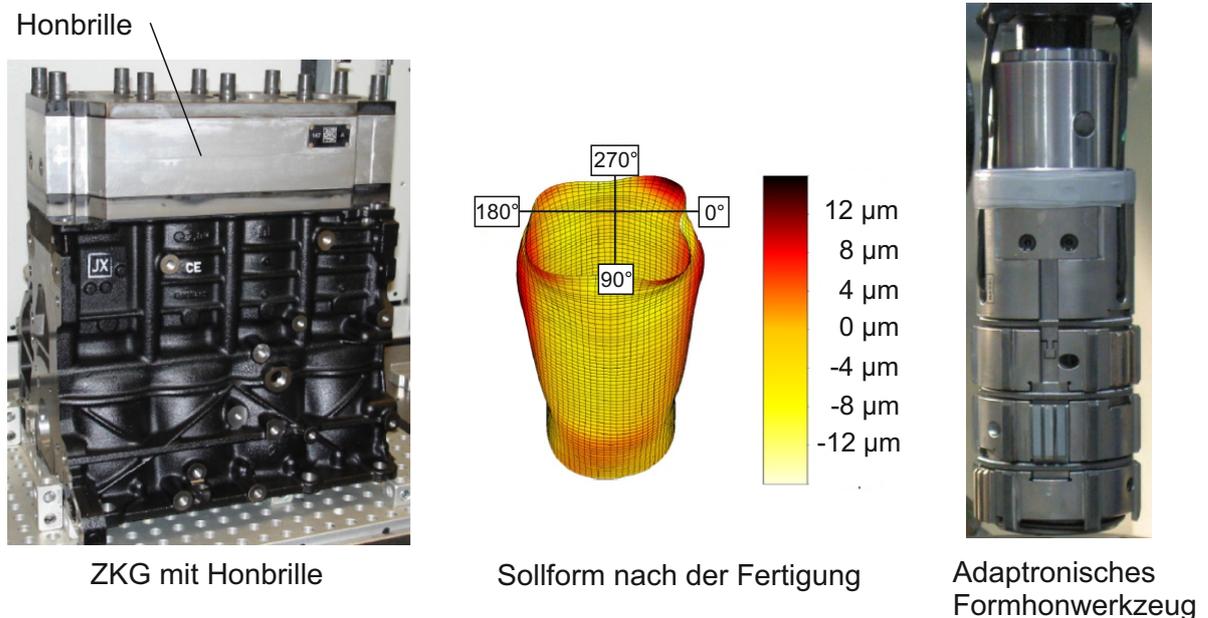


Abbildung 2.16: Links: Zylinderkurbelgehäuse mit Honbrille vorgespannt, Rechts und Mitte: Formhonwerkzeug mit errechneter Sollform [Schn11, Schn12]

Um dies zu kompensieren, wird industriell der Einsatz von Honbrillen favorisiert (Abb. 2.16). Diese realisieren während der Honbearbeitung eine der Verspannung mit dem Zylinderkopf ähnliche mechanische Last, sodass kaltstatische Verzüge kompensiert werden können. Die Montage und Demontage der Honbrillen während der Fertigung stellen jedoch einen zeitlichen und somit finanziellen Aufwand dar, welcher durch entsprechende Oberflächenkonturierungsverfahren reduziert werden soll. Ziel ist es, das

fertigungstechnische Einbringen von Vorhaltekonturen, welche von der Betriebsollform abweichen, zu realisieren, um für definierte Motorbetriebspunkte geringe Abweichungen von der gewünschten Sollform zu erhalten. Durch ein sogenanntes Formhonen oder Freiformhonen können durch kurze, aktiv und individuell zustellbare Honleisten Freiformen erzeugt werden [Weig07, Wien07, Wien11, Schn11, Dröd13] (Abb. 2.16). Die Sollformdaten der Zylinderform werden durch mathematische Transformation in Form von diskreten radialen Zustellwegen in Winkel- und Bohrungshöhenlage als Zustellsignale die Steuerung bereitgestellt. Somit kann eine orts aufgelöste Honleistenzustellung erfolgen. Die Auslenkung der verkürzten Honleisten erfolgt über piezoelektrische Aktoren in Stapelanordnung. Die Lage der Aktorstapel variiert in einzelnen Konzepten. Diese können axial über dem Zustellkonus oder direkt hinter dem Leistenträger angeordnet sein [Wien11, Schn12]. Eine Weiterentwicklung und mögliche Substitution des Formhons stellt die Unrundbearbeitung mit geometrisch definierten Schneiden auf Bearbeitungszentren dar [Junk12]. Hierfür wird das Bearbeitungszentrum um eine piezobasierte Parallelkinematik zur hochdynamischen Werkzeugfeinstpositionierung ergänzt.

### 3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Nach dem derzeitigen Stand der Technik wäre es möglich, die Kolbenring/Zylinder-Paarung durch einen optimierten Einlauf so zu konditionieren, dass sich im regulären Betrieb eine sehr kleine Verschleißgeschwindigkeit und geringe Reibung einstellen. Diese Erkenntnis wird in der Praxis jedoch bisher nicht konsequent umgesetzt. Gründe dafür sind, dass der Einlauf zu lange dauert, zu teuer ist und vom Kunden nicht im nötigen Umfang durchgeführt werden kann. Außerdem kann es während des Einlaufs zu Spontanausfällen kommen. Ferner sind die beim Einlauf ablaufenden Prozesse an der Oberfläche und in den Grenzschichten bisher noch nicht vollständig verstanden. Wenn es gelingt, schon bei der Endbearbeitung des Zylinders solche Oberflächentopografien und Grenzschichten zu erzeugen, die weitestgehend denen nach dem optimierten Einlauf entsprechen, könnten auch ohne Einlauf geringer Verschleiß und niedrige Reibung erreicht werden. Die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel haben die Komplexität in Aufbau und Wirkungsweise des technischen/tribologischen Systems Kolbenring/Zylinderlauffläche dargelegt. Um einen tieferen Einblick in die Abhängigkeit der Einlaufsituation von der Fertigung zu erlangen, soll eine detaillierte Analyse der Endbearbeitung im Hinblick auf eine mögliche Reduktion von Reibung und Verschleiß des tribologischen Systems Kolbenring/Zylinderlauffläche erfolgen. Am Beispiel eines Gusseisen-Liners erfolgt eine Betrachtung zur mechanischen Wirkungsweise unterschiedlicher Endbearbeitungsprozesse. Diese Betrachtungen fokussieren auf eine mechanische Optimierung des letzten Fertigungsschrittes tribologisch belasteter Bauteile und beinhalten nur in begrenztem Umfang wirtschaftliche Aspekte einer effizienten Fertigung. Die in einer Vielzahl von Arbeiten dargelegte Relevanz der Oberflächentopografie in der Optimierung des Einlaufs soll um Kenntnisse zur Gestalt der Grenzschicht erweitert werden.

## 4 Versuchsplan und -durchführung

Auf Basis der Analyse eines unterschiedlich eingelaufenen Dieselmotors sollen Variationen in der Endbearbeitung von Zylinderlaufflächen untersucht werden. Als Referenzwerkstücke werden Zylinderliner verwendet (Abb. 4.1).

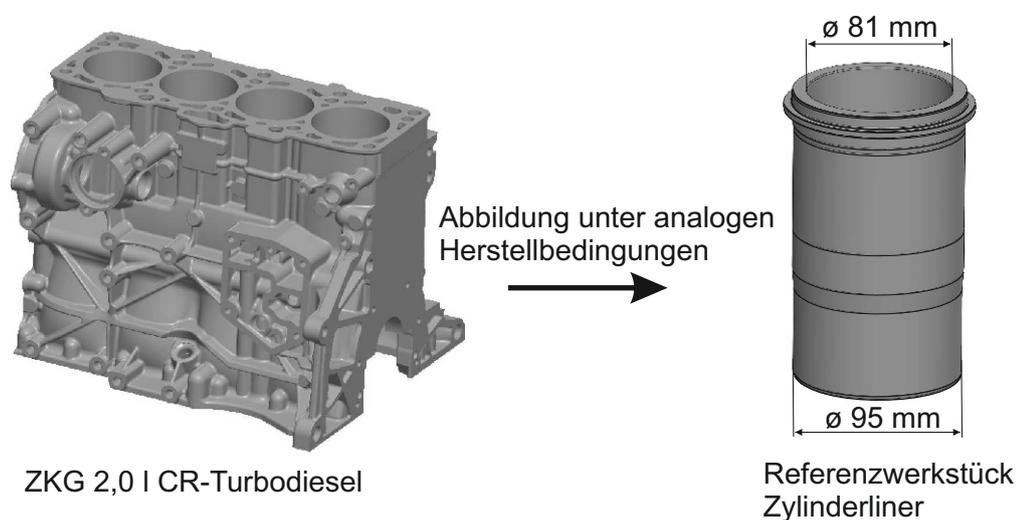


Abbildung 4.1: Betrachtete Bauteile und Versuchswerkstücke

Als Versuchsträger und Referenzobjekt dient ein 4 Zylinder 2,0 I CR-Turbodiesel mit einer Nennleistung von  $P = 103 \text{ kW}$  bei  $n = 4200 \text{ min}^{-1}$ . Das betrachtete tribologische System besteht aus dem Grundkörper Zylinderlauffläche, bestehend aus GJL250, und dem Gegenkörper Kolbenring (Topping), bestehend aus einem Kugelgraphitguss mit Chrom und Diamantbeschichtung der Härte 900 - 1200 HV 0,1 (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Elementkonzentration des Werkstoffes GJL250 (ohne Fe) nach Vorgabe in [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Ti
3,0-3,5	1,8-2,7	0,3-1,0	$\leq 0,2$	$\leq 0,14$	0,15-0,45	$\leq 0,8$	$\leq 0,1$	0,03-0,05

Das Versuchsspektrum umfasst die nachfolgenden Arbeitspakete, welche sukzessive einen Beitrag zur Erweiterung von Erkenntnissen zum Endbearbeitungs- und Einlaufprozess leisten. Auf Basis der mechanischen Wirkung erfolgt eine Betrachtung mehrerer technisch relevanter Endbearbeitungsverfahren in Kombination mit Einlaufprozessen. Der Versuchsumfang beinhaltet

1. die Definition geeigneter Endbearbeitungs- bzw. Konditionierungsverfahren,
2. Betrachtungen zu adäquaten Bewertungsmöglichkeiten für
  - die, im Endbearbeitungsprozess verwendeten, spezifischen Prozesscharakteristika,
  - die Charakterisierung der tribologisch relevanten Grenzschicht,
  - die tribologischen Eigenschaften der Bauteile.

Die Untersuchungen zur Honbearbeitung wurden auf einer Vertikalhonmaschine vom Typ VARIOHONE VS 8-60 SV-NC der Firma Nagel durchgeführt. Als Schmierstoff wurde ein Schneidöl Honilo 930 der Firma Castrol verwendet. Für weitere Untersuchungen zum Feinspindeln und mechanischem Glattwalzen wurden Bearbeitungszentren FT 2000 und FST 30 der Firma Heller und ein Dreh-Fräszentrum CTX beta 1250 der Firma DMG Mori eingesetzt (Abb. 4.2).



VARIOHONE VS 8-60 SV-NC  
Nagel



CTX beta 1250  
DMG Mori



FT 2000  
Heller

Abbildung 4.2: Übersicht der verwendeten Fertigungseinrichtungen

Die vorliegende Arbeit fokussiert primär auf:

1. die Analyse konventioneller Fertigungsverfahren, speziell Honen, zur Herstellung von Zylinderlaufflächen und Ableitung von optimierten/alternativen Prozessen,
2. die Entwicklung einer Kraftsensorik zur Bewertung des Honprozesses,
3. die vergleichende Betrachtung des Fertigungsprozesses mit nachfolgenden tribologischen Analysen auf einem Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer,
4. Verfahren zur Validierung der Grenzschichtcharakteristik.

Jede Modifikation der Endbearbeitung zieht zwangsläufig eine veränderte Oberflächenbeschaffenheit bezüglich Rauheit und Struktur nach sich. Diese hat einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das tribologische Verhalten der Bauteile während des Einlaufes und überlagert somit in jedem Fall die mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht. Daher ist es im vorliegenden Versuchsprogramm notwendig, eine vergleichbare Topografie zu generieren. Eine Bewertung von Oberflächentopografien wird maßgeblich durch die Kennwerte der Materialanteilkurve nach ISO 13565 im zweidimensionalen Raum erfolgen. Zur besseren lateralen Oberflächencharakterisierung werden Profildaten mit dreidimensionalen Informationen hinzugezogen, welche jedoch nicht normgerecht bewertet werden können, da deren Informationsdichte zu gering ist. Die Notwendigkeit der Verwendung dreidimensionaler Oberflächeninformationen ist in der Prozesscharakteristik des Honens begründet. Durch das prozesstypische Kreuzriefenmuster muss neben dem Rauheitsprofil der Oberfläche auch die Strukturausrichtung bewertet werden. Es besteht weiterhin die Möglichkeit der Bildung von Kennwerten der Materialanteilkurve aus dreidimensionalen Daten. Diese sind jedoch nicht genormt und somit nur bedingt vergleichbar.

## 4.1 Definition geeigneter Endbearbeitungs- bzw. Konditionierungsprozesse

### 4.1.1 Ermittlung der während des optimalen Einlaufs umgesetzten Leistung

Zur Ermittlung von Verschleißkennwerten eines realen Einlaufs am Versuchsträger wurden zwei verschiedene Einlaufprozeduren, ein Einlauf bei Nennleistung und ein stufenförmiges Einlaufprogramm, mittels Radionuklidmesstechnik (RNT) analysiert. Hierbei handelt es sich um die Online-Detektion der Konzentration von radioaktiv dotierten Verschleißpartikeln im Schmierölkreislauf. Dazu wurde ein Topring am Umfang und ebenso ein Bereich von 8 mm der Lauffläche im oberen Totpunkt 10 mm unterhalb des Topdecks radioaktiv aktiviert. Die Analysen sollen den Bereich des maximalen Verschleißes im Gebiet des oberen Umkehrpunktes bzw. Totpunktes (Zwickelbereich) fokussieren. Es zeigt sich, dass die Intensität der Einlaufbelastung eine Veränderung der Verschleißgeschwindigkeit bedingt (Abb. 4.3). Der Einlauf mit Nennleistung stellt einen überkritischen Belastungsfall des Motors dar, welcher die Ausfallwahrscheinlichkeit des Aggregates stark erhöht und somit im industriellen Maßstab nicht umsetzbar ist. Für Versuchszwecke soll dieser Einlauf das Optimum repräsentieren und als Referenz dienen. Im Gesamtsystem ergeben sich daher bei Betrachtung des Topringes folgende Reibarbeiten und umgesetzte Reibleistungen:

Einlauf unter Nennleistung

$$n = 4000 \text{ min}^{-1}$$

$$M = 320 \text{ Nm}$$

$$\text{Laufzeit } t = 20 \text{ h}$$

an einem Kolbenring verrichtete Reibarbeit während des Einlaufs

$$W = 104 \text{ MJ},$$

im Zwickelbereich des oberen Totpunktes verrichtete zündstoßinduzierte Reibarbeit während des Einlaufs

$$W = 4,9 \text{ MJ},$$

im Zwickelbereich verrichtete zündstoßinduzierte Reibarbeit in einem Hub,

$W = 2 \text{ J}$

im Zwickelbereich umgesetzte zündstoßinduzierte Reibleistung in einem Hub,  
 $P = 1620 \text{ W}$ .

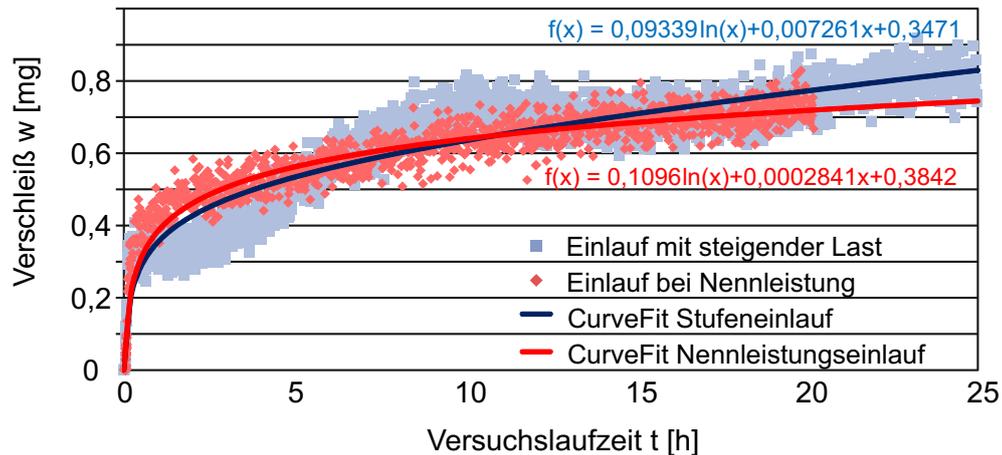


Abbildung 4.3: Vergleich der Verschleißgeschwindigkeiten am Zylinderkurbelgehäuse beim Stufeneinlauf und Einlauf bei Nennleistung

Zur Charakterisierung der Zylinderlaufflächentopografie wurden taktile dreidimensionale Oberflächenmessungen angefertigt (Abb. 4.4). Der optische Eindruck nach Filterung der Makroform lässt eine Reduktion der Profilhöhe nach dem Einlauf vermuten. In Betrachtung der dreidimensionalen Traganteilkennwerte reduziert sich lediglich die Spitzenrauheit bei leichter Steigerung der Kernrautiefe und des Riefenvolumens. Im Linienscan orthogonal zum Zylinderzwickel wird der Bereich des maximalen Einlaufverschleißes deutlich (Abb.4.4 unten). Inwieweit ein progressiver Einlaufverschleiß Auswirkungen auf die Verschleißlebensdauer eines Bauteils hat, ist aktuell nicht Gegenstand der Diskussion. Es soll somit nur der Fokus auf den initialen Verschleiß und die initiale Reibung gelegt werden, um somit adäquate Endbearbeitungsverfahren zu definieren.

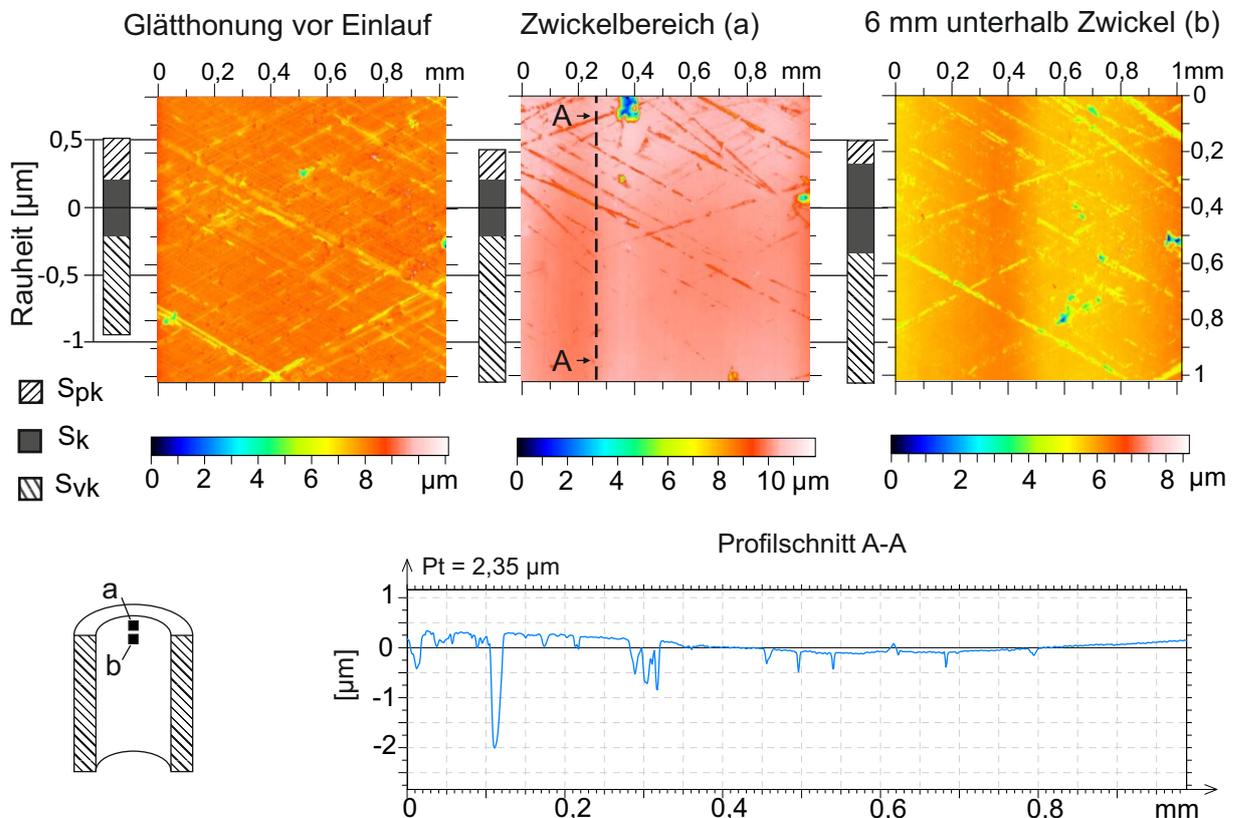


Abbildung 4.4: Vergleich der Topografien (taktile Oberflächenscan und 3D Traganteilkenngrößen) der Zylinderlauffläche des gehonten und mit Nennleistung eingelaufenen Aggregates nach 20 h Laufzeit

#### 4.1.2 Langhubhonen

Als Referenzverfahren werden zwei unterschiedliche Honverfahren untersucht. Diese unterscheiden sich in der letzten Bearbeitungsstufe durch den Einsatz unterschiedlicher Schneidstoffe. So werden metallisch gebundene Diamanthonsteine und keramisch gebundene Keramikhonsteine verwendet. Diese unterscheiden sich entsprechend Abbildung 4.5 deutlich im Aufbau. Die Keramik weist ein eher poröses Gefüge mit sehr geringer Korngröße auf, wohingegen die Diamantpartikel deutlich aus der metallischen Matrix herausragen und somit sich auch in der Schneidkorndichte von der Keramik abheben. Die Relevanz der Betrachtung unterschiedlicher Schneidstoffe kann aus Abschnitt 2.3 entnommen werden. Die Wahl der Schneidstoffe zielt auf die Erzeugung

vergleichbarer Oberflächentopografien der Laufflächen ab, welches in entsprechenden Vorversuchen betrachtet wurde. Wie für die Finishhonoroperation üblich, kommen vergleichsweise breite Leisten ( $b = 4 \text{ mm}$ ) zum Einsatz.

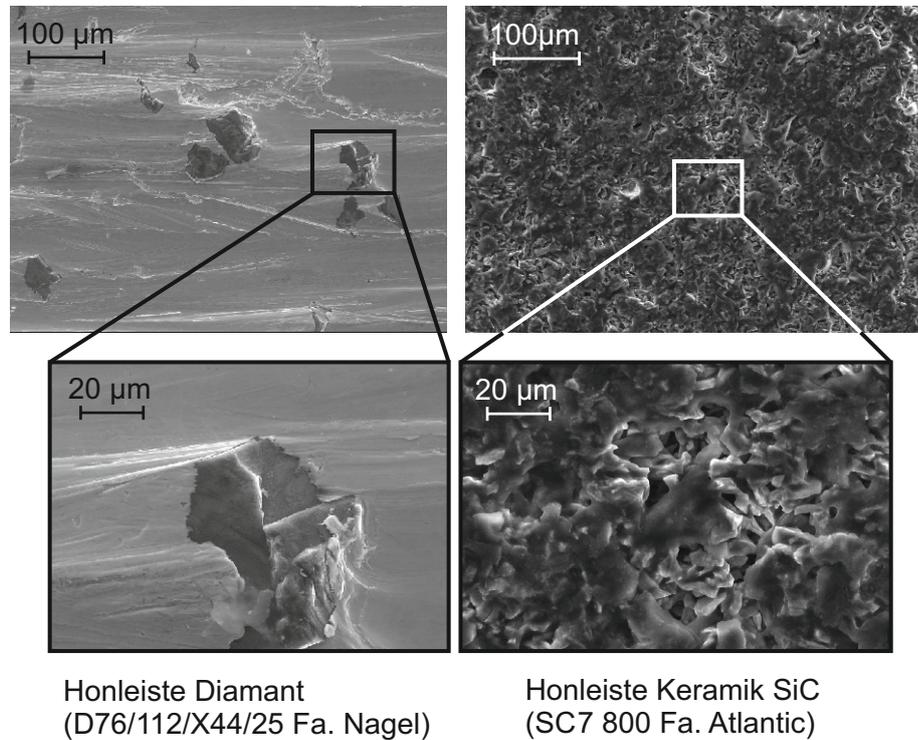


Abbildung 4.5: Beschaffenheit der untersuchten Honleisten

Die Schneidstoffe unterscheiden sich somit in deren Schnittvermögen durch unterschiedliche Schneidkorngemetrien und unterschiedlicher Besatzdichte. Um das Konditionierungsvermögen des Langhubhonsens bewerten zu können, muss ein Vergleich der umgesetzten Reibleistungen stattfinden (Anhang A.2). Hier zeigt sich die deutliche Diskrepanz der umgesetzten Leistungen, welche das Konditionierungsvermögen des Honprozesses vor dem Hintergrund der Energieumsetzung im friktiven Kontakt deutlich relativieren.

### 4.1.3 Bürsten

Neben dem klassischen Langhubhonen stellen Polier- und Umformverfahren ebenso potentielle Endbearbeitungsprozesse mit differierender Prozesscharakteristik dar. Das Bürsten von Laufflächen ist industriell relevant, wenn es um die Beseitigung von „Ver-

schuppungen“ und „Blehmänteln“ geht. In diesem Zusammenhang kommen sogenannte Honbürsten zum Einsatz, welche kleinste Grate am Rand von Honriefen beseitigen. Prinzipiell können drei Bürstvarianten in Betracht gezogen werden. Zum einen kann eine mit losen Abrasivmedien besetzte Bürste verwendet werden, welche ähnlich einem Läpp- bzw. Polierverfahren arbeitet. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Implementierung von Abrasivmedien in Kunststoffborsten (Anderlon). Auch können im Vergleich zum Werkstück härtere Borsten, beispielsweise aus Keramik, Verwendung finden. Diese speziellen Keramik-Bürsten bieten einen vielversprechenden Ansatz. Keramische Fasern aus beispielsweise Korund mit wenigen Mikrometern Durchmesser bilden im Verbund aus ca. 1000 Einzelfasern einen Faserstab. Die Faserenden wirken als Abrasivmedium im Zerspanprozess. Zur Verfahrenskinematik ist die bündelweise Anordnung von Fasern in einer Art Hohlzylindergeometrie mit axialer Faserausrichtung sinnvoll. Bei hohen Drehzahlen wirkt die Fliehkraft bei einer entsprechenden Auskraglänge der Fasern als Normalkraft bzw. Anpresskraft der Schneiden. Somit ist eine präzise und stufenlose Schnittkraftregelung über die Schnittgeschwindigkeit möglich. Dieses Verfahren ist jedoch nur für kleinere Bohrungsdurchmesser wirtschaftlich. Nachfolgend werden diese Optionen entsprechend deren Prozesscharakter durch ein Bürst-Polieren mit Rosshaarborsten, dem Bürsten mit Anderlon und konventionellem Stahldrahtbürsten abgebildet (Abb. 4.6).

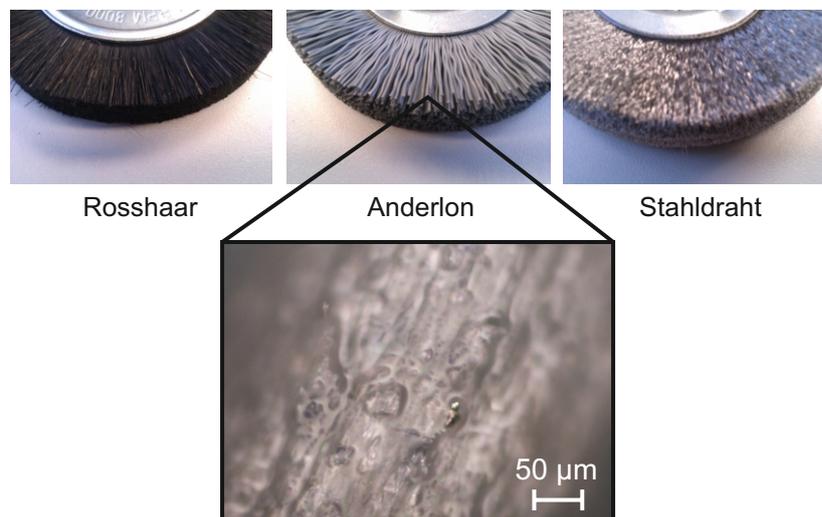


Abbildung 4.6: Art und Beschaffenheit der untersuchten Bürsten

Der Ansatz zur Verwendung des Bürst-Poliervorgangs in der Herstellung von Lauf­flächen entstammt Untersuchungen zur Schneidkantenpräparation von Zerspanwerk­zeugen. Durch dieses Verfahren werden definierte Schneidkantenmikrogeometrien und Schartigkeiten erzeugt, was die Standzeit von Werkzeugen und die Werkstückqualität positiv beeinflusst. Eine umfassende Betrachtung zu diesem Verfahren und den Ef­fekten der Schneidkantenpräparation liefern exemplarisch BYELYAYEV und TIKAL ET AL. [Byel08, Tika09]. Für diese Arbeit kommt eine mit Abrasivmedien besetzte Ross­haarbürste, welche ein leichtes Übermaß von 1 - 2 mm zum Bohrungsdurchmesser aufweist, zum Einsatz (Abb. 4.7).



- Bürste aus Rosshaar bestehend aus 5 Segmenten
- Besatz aus Diamantpaste
- axiale Verspannung der Segmente zur Variation der Elastizität der Bürste

Abbildung 4.7: Konzept des Bürstens von Zylinderlauf­flächen mit losem Korn

Das Abrasivmedium besteht aus losen Industriediamanten in adäquater Korngröße von ca. 20  $\mu\text{m}$  verglichen mit den Honsteinen der letzten Honstufe, welche in einer hochvis­kosen Paste eingelassen sind. Entsprechend der DIN 8589 lässt sich dieses Verfahren dem Zerspanen mit geometrisch unbestimmter Schneide und ungebundenem Korn zu­ordnen. Im Gegensatz zur Applikation Schneidkantenpräparation ist das Verhältnis von Borstenfläche zur Werkstückoberfläche stark reduziert. Somit wird das Bearbeitungs­ergebnis dementsprechend stark von dem Ergebnis einer Schneidkantenpräparation differieren. In Bezug auf das Honen stellt die Bearbeitung ohne Kühlschmierstoff den größten Unterschied dar. Zur Charakteristik dieses Verfahrens gehört demnach der Verbleib von Spänen in der Kontaktzone zwischen Werkzeug, in Form der belegten Borsten, und Werkstück. Dies führt dazu, dass mit zunehmender Bearbeitungszeit die effektive Korngröße der Abrasivmedien bestehend aus Diamanten und Mikrospänen des Werkstückwerkstoffes exponentiell sinkt, aber gleichzeitig die Anzahl der Körner und somit des Abrasivmediums im ähnlichen Maße ansteigt. Die effektive Spanungs­dicke sinkt somit. Das Abtragverhalten lässt sich anhand der gemittelten Rautiefe und den Kennwerten der Abbott-Kurve erklären. So stellt sich ein stationärer Zustand der

Rauheit ein, was darauf schließen lässt, dass ein konstantes Mischungsverhältnis von Abrasivmedien vorliegt. Jedoch liegt die reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$  deutlich oberhalb der des Honprozesses mit ähnlicher Korngröße und im Bereich der Kernrautiefe  $R_k$  (Abb. 4.8). Eine Ausbildung plateauartiger Tragprofile ist somit durch dieses Verfahren nicht möglich.

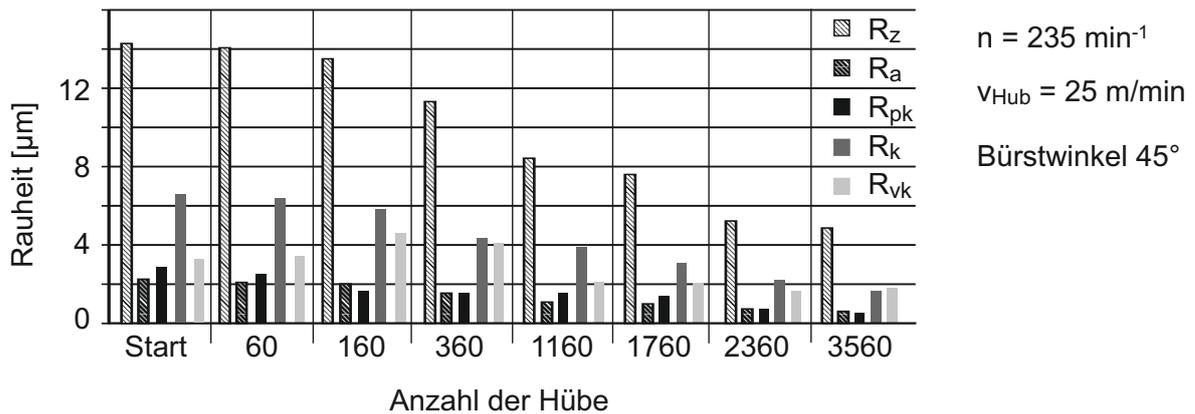


Abbildung 4.8: Ausprägung der Oberflächenrauheit nach fortschreitendem Bürst-Poliervorgang

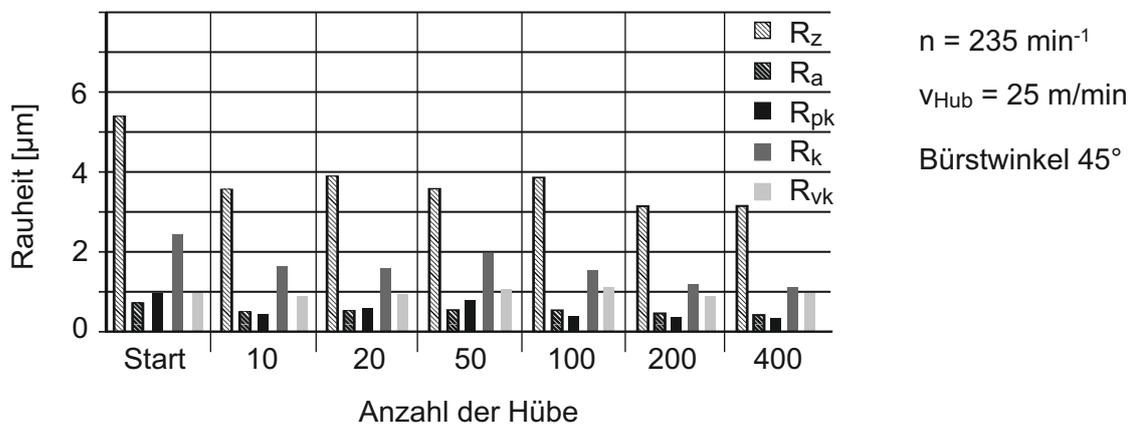


Abbildung 4.9: Ausprägung der Oberflächenrauheit nach fortschreitendem Bürstvorgang mit Anderlon

Als zweites Verfahren wird das Bürsten mit in Kunststoffborsten eingelassenen Abrasivmedien, welche unter dem Handelsnamen „Anderlon“ bekannt sind, betrachtet. Dieses Konzept kann einen Vorteil im Materialabtrag in Kombination mit dem parallelen Einsatz

von Kühlschmierstoffen bieten. Die Besatzdichte der Kunststofffasern mit Siliziumkarbid beträgt ca. 20 - 40 % bei einer mittleren Korngröße von  $K = 10 \mu\text{m}$ .

Bereits bei wenigen Überläufen auf einer zwischengehonten Oberfläche wird ein stationäres Rauheitsprofil erreicht (Abb. 4.9). Dies lässt darauf schließen, dass lediglich eine Einebnung der Profilsitzen stattgefunden hat und somit der Materialabtrag relativ gering ausfällt. Somit scheinen Bürstverfahren für die Endbearbeitung zur Substitution der letzten Honstufe nicht geeignet. Zweifelsohne können durch das Bürsten kleinere Verschuppungen einer gehonten Oberfläche eliminiert werden. Dies reduziert folglich den abrasiven Initialverschleiß beim Einlaufen tribologischer Systeme.

### 4.1.4 Glattwalzen

Unter dem Begriff des Oberflächenfeinwalzens werden umformtechnische Feinbearbeitungsverfahren zusammengefasst, welche sich hinsichtlich ihres Bearbeitungszieles in Glattwalzen zur Verbesserung von geometrischen Oberflächeneigenschaften, Maßwalzen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit und Festwalzen zur Verbesserung von Festigkeitseigenschaften oberflächennaher Werkstoffbereiche unterscheiden lassen [VirK01, Kloc06, DIN 03a]. Prinzipiell bewirkt jedes aufgeführte Walzverfahren Änderungen in Maß, Oberfläche und mechanischen Eigenschaften des Werkstückes, was die Einordnung nach deren primären Wirkprinzipien und Bearbeitungszielen erfordert. Somit wird das Glattwalzen als ein Umformverfahren zur Änderung der geometrischen und mechanischen Oberflächen- und Grenzschichtgestalt nach DIN 8580 der Verfahrenshauptgruppe Stoffeigenschaftsändern durch örtliches Umformen bzw. Verfestigen durch Walzen zugeordnet [VirK01]. Nach dem Modell von KÖNIG bildet der spezifische Walzdruck der Walzkörper im Werkstück einen Druckkeil aus, an dessen Seiten der Werkstoff in Richtung der Profiltäler bzw. Drehrillen oder Profiliriefen verdrängt wird [Köni54]. In Folge dessen werden die Profiltäler angehoben und die Spitzenbereiche eingeebnet. Dieser Vorgang bedingt das plastische Fließen des Werkstoffes, welches bei Erreichen einer kritischen Schubspannung, der Fließspannung, eintritt. Den dominierenden Mechanismus dieser plastischen Verformung stellt die Bewegung von Versetzungen und das Abgleiten von Atomen entlang kristallographischer Gleitebenen dar. Da die Versetzungsbewegung und die Gleitvorgänge an diese energetisch günstigen Gleitebenen gebunden sind, stellen Korngrenzen, also Richtungsänderungen dieser Ebenen, eine physikalische Grenze dar, welche die Bewegung behindert und zu einem Aufstau von Versetzungen führt. Somit erhöhen sich die Fließspannung respektive die Formänderungsfestigkeit, was makroskopisch als Werkstoffverfestigung deutlich wird. Untersu-

chungen von ZWIRLEIN ET AL. zur Werkstoffanstrengung bei Wälzbelastung zeigen die Lage der maximalen Vergleichsspannung in einer Tiefe von  $z = 0,7 b$  (Druckflächenbreite nach Hertz)[Zwir80]. Unter der Voraussetzung, dass die Schubspannungsverteilung in der Druckfläche der Verteilung der Normalspannung entspricht, liegt somit in der Nähe der maximalen Vergleichsspannung auch ein Schubspannungsmaximum vor [Zwir80]. Somit findet das plastische Fließen unterhalb der Werkstückoberfläche statt. Aufgrund der sich daraus ergebenden unterschiedlichen elastischen Eigenschaften der oberflächennahen Werkstoffbereiche kommt es zu einer tangentialen Stoffverschiebung in Walzrichtung. Entsprechend den Aussagen von KLOCKE ET AL. führen zu hohe tangentiale Stoffverschiebungen zu einem „Abblättern der Randzone“ also einer Delamination [Kloc06]. Verglichen mit der Anpresskraft stellt somit die Überwalzzahl den kritischeren Belastungsfall dar [Kloc06].

### **Werkzeugkonzept**

Für die Innenbearbeitung von Zylinderlaufflächen muss eine kraftgesteuerte Anpressung der Walzelemente realisiert werden, da nur so die mechanische Belastung der Oberfläche ermittelt werden kann und eine homogene Lastverteilung unabhängig vom Zustellweg und der Lageabweichung von Werkstück und Werkzeug sichergestellt wird. Entsprechend dieser Forderungen kann eine mediengebundene, z.B. hydraulische, Anpressung der Wälzkörper eingesetzt werden. Die hydrostatische Anpressung von Wälzkörpern bei der Innenbearbeitung birgt jedoch viele Schwierigkeiten. So muss eine Gegenkraft erzeugt werden, welche die Wälzelemente im Werkzeug hält und beim Ein- und Ausfahren des Werkzeuges die Elemente in einer definierten Lage positioniert. Weiterhin ist die Lagerung der Wälzelemente im Kraftschluss mit dem Werkstück problematisch. Nachfolgend werden 2 Konzepte zur hydrostatischen Anpressung von Wälzkörpern beim Innenglattwalzen erläutert (Abb. 4.10).

Beim Walzkonzept 1 kommt eine hydrostatisch gelagerte Keramikkugel zu Einsatz, welche auf einem Hohlzylinder in einem Käfig gelagert wird. Der hydrostatische Druck wirkt auf die Stirnfläche des Hohlzylinders und über eine Drossel auf die Kugel. Während der hydrostatischen Anpressung und Rotation wird somit die Kugel mit Hydraulikmedium umspült und bildet einen hydrodynamischen Schmierfilm aus. Nachteilig bei diesem Konzept ist die Ausprägung von Vorschubmarkierungen durch den linienförmigen Wälzkontakt bei der Bearbeitung. Beim Walzkonzept 2 erfolgt der Wälzkontakt durch die Anwendung von zylindrischen Walzen flächenförmig. Am Umfang des Werkzeuges sind 3 Walzelemente aus Hartmetall platziert, um eine zentrische Positionierung



Abbildung 4.10: Hydrostatische Glattwalzwerkzeuge

des Gesamtwerkzeuges in der Bohrung zu gewährleisten. Die Walzelemente weisen einen Versatz zur Werkzeugachse auf, sodass bei einer axialen Vorschubbewegung des Gesamtwerkzeugs eine automatische Winkelkorrektur der Walzen in Richtung der Bohrungsachse erfolgt. Über einen Druckkolben wird die Anpresskraft auf die gleit- oder wälzgelagerten Walzelemente übertragen. Die Dimensionierung der Walzelemente erfolgte anhand der Erkenntnisse von GERLACH, wonach für das Glattwalzen von Gusseisen Anpressdrücke von  $p = 40 - 100 \text{ N/mm}^2$  praktikabel sind [Gerl61]. Die reale Pressfläche resultiert demnach aus der Hertz'schen Pressfläche eines konkaven und eines konvexen Körpers unter Berücksichtigung der Oberflächenrauheit. Somit weisen die Walzkörper bei einer Breite von  $b = 6 \text{ mm}$  eine ungefähre Pressfläche von  $A = 0,4 - 0,6 \text{ mm}^2$  auf. Als Referenz können die, während des Motorbetriebes vorherrschenden, maximalen Pressungen herangezogen werden (Anhang A.1).

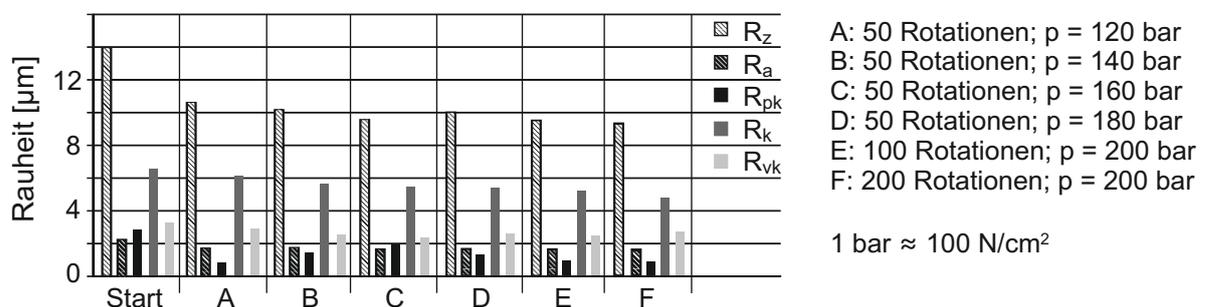


Abbildung 4.11: Ausprägung der Oberflächenrauheit nach dem Glattwalzen mit unterschiedlichen Walzparametern (Walzkonzzept 2)

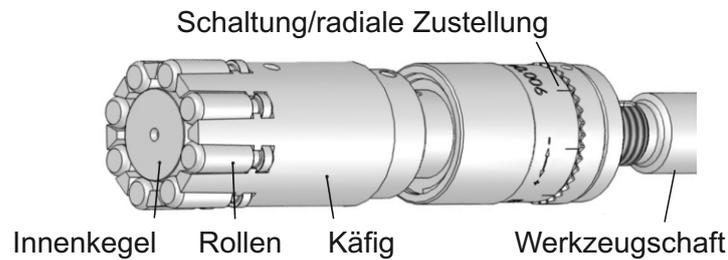


Abbildung 4.12: Mechanisches Glattwalzwerkzeug der Firma Ecoroll

Analysen zum Glattwalzen von GJL250 mit dem Werkzeugkonzept 2 zeigt Abbildung 4.11. Es wird deutlich, dass beim Walzen von Gusseisen ein Grenzwert bezüglich der zu erreichenden Oberflächenqualität existiert. Der Effekt einer mehrfachen Überwalzung ist erwartungsgemäß gering, da nach der ersten Überwalzung eine Zunahme der Kaltverfestigung in Kombination mit der Zunahme der tragenden Flächenelemente eine stetige Erhöhung der Walzkraft verlangen.

Ein im industriellen Gebrauch befindliches, mechanisches Glattwalzwerkzeug (Abb. 4.12) wurde im Vorfeld am bestehenden Aggregat untersucht. Grundlage des Einsatzes von Glattwalzwerkzeugen ist die Einhaltung der Formtoleranzen durch den vorgelagerten Feinspindelprozess. Durch den Einsatz spezieller Feinspindelwerkzeuge können

- Rundheitsabweichungen  $\leq 6 \mu\text{m}$ ,
- Geradheitsabweichungen  $\leq 6 \mu\text{m}$ ,
- Zylinderformabweichungen  $\leq 7 \mu\text{m}$ ,
- Parallelitätsabweichungen  $\leq 6 \mu\text{m}$ ,
- Rundheitsfehler unterhalb der 4. Ordnung realisiert werden.

Da das Honen auf Bearbeitungszentren zum aktuellen Stand der Technik in Forschung und Entwicklung gezählt werden muss und eine Substitution des Feinspindelprozesses durch ein entsprechendes Positionshonen bzw. Formhonen möglich ist, muss das Glattwalzen in Kombination mit der jeweiligen Vorbearbeitungsstruktur betrachtet werden (Abb. 4.13)[Horn10, Schn11]. Es zeigt sich, dass die durch Glattwalzen induzierten topografischen Veränderungen unterschiedlich auf das tribologische Verhalten wirken. Eine vorgehonte und kaltumgeformte Oberfläche zeigt bei tribologischer Belastung in einem oszillierenden Modellversuch eine erhöhte Reibung [DA13].

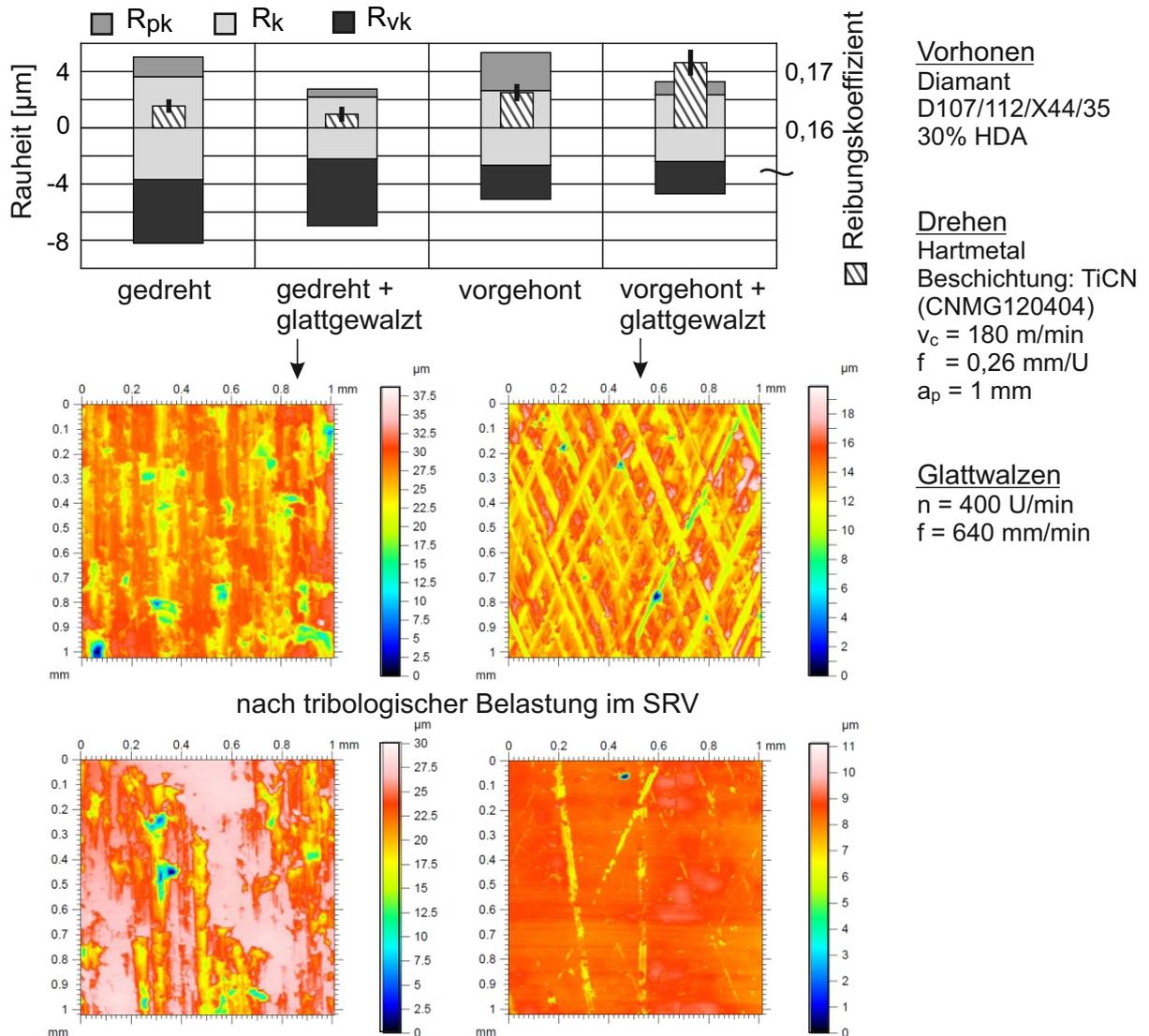


Abbildung 4.13: Versuche zum konventionellen Glattwalzen mit mechanischen Werkzeugen

#### 4.1.5 Konditionierung mittels modifiziertem Honprozess

Die Option einer Doppelaufweitung von Honwerkzeugen, also die Kombination von zwei Bearbeitungsstufen in einem Honwerkzeug, eröffnet die wirtschaftliche Möglichkeit zur Durchführung einer zusätzlichen Finishstufe. Diese kann eine Art Vorkonditionierung des Werkstückes durch friktive Belastung herbeiführen. Ähnliche Ansätze wurden be-

reits mit dem Einsatz von Fluiden, welche eine Wolfram und Schwefelquelle enthalten, vorgenommen [Zhmu12]. Unter tribologischer Belastung wirkt  $WS_2$  ähnlich wie  $MoS_2$  als eine Art Festschmierstoff und kann bei Einlagerung in die Grenzschicht der Zylinderlauffläche die Reibung mindern. Obwohl die Anhaftung des  $WS_2$  nur in der äußeren Grenzschicht detektiert wurde, wirkt diese Schicht auch nach fortgeschrittenem Verschleiß noch positiv auf das Reibverhalten. Analog zu diesen Erkenntnissen kommen in der letzten Honstufe mit Hartmetall besetzte Tragleisten zum Einsatz, welche in Kombination mit einem Motorenöl eine Einlaufsimulation bzw. Tribokonditionierung durchführen. In der beschriebenen Anordnung ergeben sich nachfolgende Kennzahlen des Konditionierverfahrens:

gemessener Reibungskoeffizient an der Konditionierleiste bei gegebener Pressung und Geschwindigkeit

$$n_{\text{Werkzeug}} = 47 \text{ min}^{-1}$$

$$v_{\text{Hub}} = 5 \text{ m/min}$$

$$p_{\text{Leiste}} = 0,39 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Reibungskoeffizient an der Leiste} = 0,38,$$

Reibarbeit/ -leistung einer Leiste bestehend aus translatorischer und rotatorischer Bewegung in einem Hub

$$W_{\text{RLeiste}} = 3,4 \text{ J}$$

$$P_{\text{RLeiste}} = 1,059 \text{ W bei einer Geschwindigkeit von } v_{\text{RLeiste}} = 0,1 \text{ m/s,}$$

Reibarbeit/ -leistung aller Leisten in einem Hub bezogen auf den Zylinderzwickelbereich

$$W_{\text{RLeisten}} = 33,6 \text{ J}$$

$$P_{\text{RLeisten}} = 20 \text{ W bei einer Kontaktzeit von } t_{\text{RLeisten}} = 1,7 \text{ s.}$$

Die gewählte Prozessgeschwindigkeit wurde aufgrund der vereinfachten Schmierstoffversorgung im unteren Bereich angesiedelt. Bei kontinuierlicher Flutung und vollständigem Kühlschmierstoffwechsel wäre eine Erhöhung der Geschwindigkeit um Faktor 10 realistisch, was zu einer 10fach höheren Reibleistung führen würde. Eine weitere drastische Steigerung der Reibleistung kann durch eine Reduktion der Translationsgeschwindigkeit und Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit herbeigeführt werden. In diesem Fall würden die Wirkrichtungen um  $90^\circ$  abweichen. In wie weit eine tribologische Grenzschicht in diesem Fall anisotropes Verhalten aufweist, muss nachfol-

gend untersucht werden. In jedem Fall weichen die Reibleistungen von fertigungstechnischem und realem Einlauf deutlich voneinander ab.

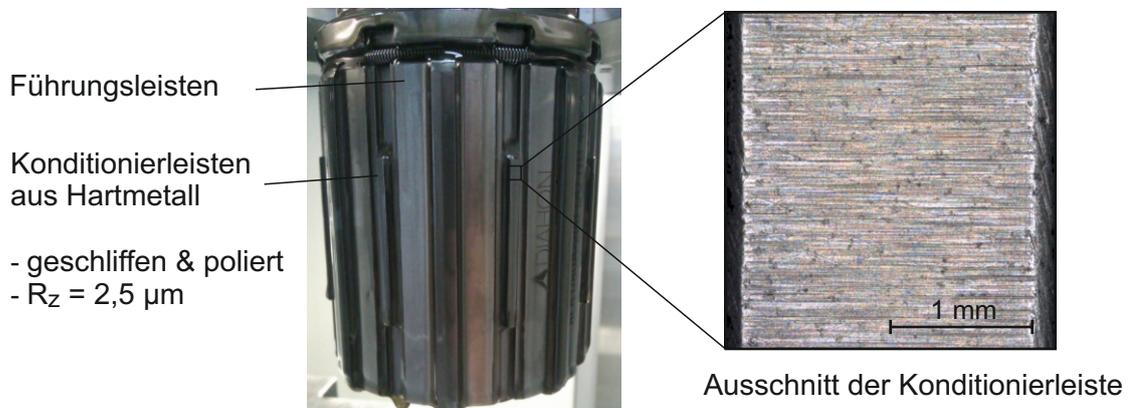


Abbildung 4.14: Konditionierwerkzeug auf Basis eines Honwerkzeuges mit eingesetzten Konditionierleisten

Das Konditionierwerkzeug aus Abbildung 4.14 weist auf der Kontaktfläche nach dem Einsatz parallel zur Honstruktur eine Abbildung der gehonten Grundstruktur respektive Honriefen auf. Da im Laufflächenwerkstoff keinerlei Karbide oder Oxideinschlüsse vorhanden sind, kann die Vermutung geäußert werden, dass die Abrasivpartikel entweder aus den Karbiden des Hartmetalls entstammen oder vereinzelt aus ausgebrochenen Schneidkörnern der vorangegangenen Honstufe resultieren. Es muss jedoch von einer progressiven, prozessimmanenten Schädigung der Konditionierleisten ausgegangen werden, welche in einer sukzessiven Steigerung der Oberflächenrauheit des Werkstückes bei steigender Prozessdauer Abbildung findet (Abb. 4.15).

## 4.2 Tribologische Prüfung

Tribologische Prüfungen lassen sich in deren Näherungsgrad zum realen Tribosystem kategorisieren [N.N.02]. Die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse zwischen den einzelnen Testleveln muss für den einzelnen Anwendungsfall differenziert bewertet werden [Dete09, Dete11]. In der Kategorie der Versuche mit Modellsystemen können Schwing-Reib-Verschleiß-Prüfungen (SRV) angesiedelt werden. Hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise einfache Methode zur tribologischen Bewertung einer Kolbenring/Zylinderpaarung unter definierten Prüfbedingungen. Maßgebliche Differenzen zum Real-

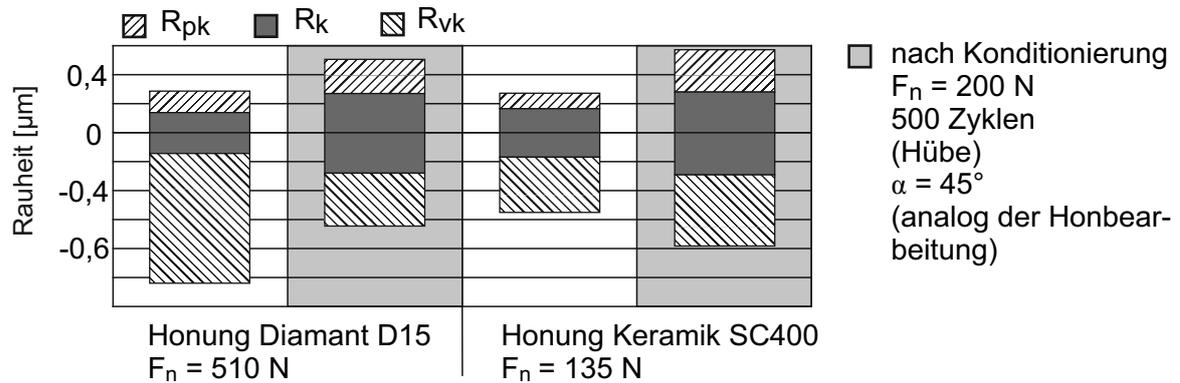
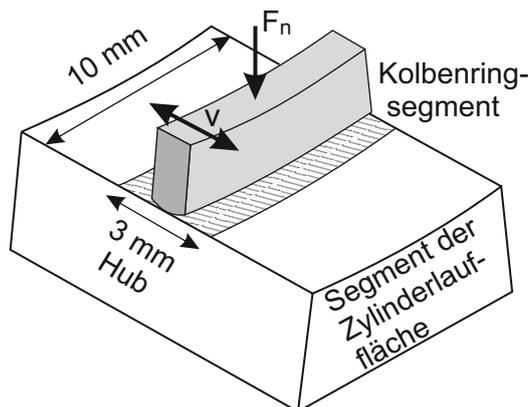


Abbildung 4.15: Oberflächenrauheit nach dem Konditionieren

system resultieren aus der Kompensation von Makroformverzügen und dem Fehlen der Verbrennungscharakteristik. Es werden jeweils Segmente aus dem realen Zylinderliner und Toprings oszillierend gegeneinander bewegt (Abb. 4.16). Im Hinblick auf eine spätere chemische und mechanische Analyse der Probekörper ist die Bearbeitungskette von entscheidender Bedeutung. Die SRV-Prüfung beschränkt sich auf segmentierte Probekörper, was wiederum Auswirkungen auf das Fertigungsverfahren im Vergleich zur rotationssymmetrischen Bearbeitung hat (Abb. 4.16).



**einstellbare Versuchsparameter:**

- Normalkraft  $F_n = 40\text{ N} \dots 2000\text{ N}$
- Reibungszeit  $t = 1\text{ min} \dots 999\text{ h}$
- Temperatur im Oszillationsblock  $v = -35^\circ\text{C} \dots +900^\circ\text{C}$
- Hub  $s = 0,1\text{ mm} \dots 4\text{ mm}$
- Schwingfrequenz  $f = 1\text{ Hz} \dots 511\text{ Hz}$

Abbildung 4.16: Aufbau der Schwing-Reib-Verschleiß-Prüfung (SRV)

### 4.2.1 Probenpräparation

Beim Trennen der Proben aus den zylindrischen Buchsen treten plastische Formänderungen auf, welche sich in der Vergrößerung des Zylinderdurchmessers widerspiegeln. Diese Veränderung muss der Kolbenring durch eine entsprechende Verspannung im SRV kompensieren. Im Idealfall müsste ein adäquates Finishverfahren/Kurzhubhonenverfahren nach DIN 8589-14 für prismatische Bauteile angewendet werden [DIN 03c].

Tabelle 4.2: Bewertung möglicher Probenpräparationsverfahren

	<b>chemischer Einfluss</b>	<b>mechanischer Einfluss</b>
Trennen durch Sägen	bei Einsatz von KSS Relevanz: 2	Verformung durch Einspannung Relevanz: 3
	- -	thermische Wirkung Relevanz: 3
Trennen durch Fräsen	Verwendung von KSS Relevanz: 2	Verformung durch Einspannung Relevanz: 3
	- -	thermische Wirkung Relevanz: 4
Strahlverfahren	korrosive Wirkung des Strahlmediums (z.B. Wasser), Korrosionsschutzmittels Relevanz: 2	thermische Wirkung (z.B. Laserstrahlschneiden) Streuung der Strahlmedien Relevanz: 3
Drahterodieren	korrosive Wirkung des Dielektrikums, Korrosionsschutzmittels Relevanz: 2	thermische Wirkung lokal in Schnittfuge Relevanz: 2

1 - nicht vorhanden

2 - geringer Einfluss

3 - mittlerer Einfluss

4 - hoher Einfluss

Die Nachbildung einer charakteristischen Honstruktur entsprechend dem Langhubhonen durch andere Finishverfahren stellt somit eine zusätzliche Abweichung zum Originalsystem dar. Alternativ und mit geringerem Abstraktionsgrad werden Zylinderliner

durch Langhubhonen bearbeitet und anschließend Segmente mit konkaver Funktionsform ausgearbeitet. Auch dieses Verfahren beinhaltet systematische Fehler in Bezug auf spätere Analysen. Hierbei ist die Technologie der Probenpräparation entscheidend für chemische und mechanische Modifikation im Probekörper. Zweifelsohne ist es aus fertigungstechnischer Sicht unmöglich, diese Einflüsse vollständig zu eliminieren. Daher kommt der Evaluation entsprechender Probepreparationsverfahren hohe Bedeutung zu. Diese ist jedoch nur ungenügend in bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten unter dem Gesichtspunkt der Beeinflussung tribologischer Eigenschaften behandelt worden. Es stellen sich somit grundlegend mehrere Präparationsmöglichkeiten dar (Tabelle 4.2). Im Idealfall sollte die Probe durch Sägen mit äußerst geringen Schnittgeschwindigkeiten und Vorschüben bei verzugsarmer Einspannung präpariert werden. Unter den Gesichtspunkten der verzugsarmen Präparation und Reproduzierbarkeit wurde das Erodieren angewendet. Eine Isolation bzw. chemische Konservierung der Oberfläche kann mittels Benetzung mit synthetischem Wachs vorgenommen werden. Die korrosive Wirkung des Dielektrikums darf jedoch nicht vernachlässigt werden. Diese unterscheidet sich stark bei der Verwendung niedrigviskoser Öle oder deionisierten Wassers.

#### 4.2.2 Durchführung der SRV-Versuche

Um die Parameter der SRV-Versuche auf den Realprozess abzustimmen, müssen Betrachtungen zur umsetzbaren Leistung erfolgen. Der Vergleich der Reibarbeiten eines Ringsegments im Realprozess und auf dem SRV-Prüfstand bei einer Normalkraft von  $F_n = 200 \text{ N}$  wird nachfolgend beschrieben.

Es wird deutlich, dass die realen Reibleistungen nicht im SRV-Prüfstand abgebildet werden können. Jedoch können gleiche Reibarbeit und Lastspielzahl realisiert werden. Die Abbildung eines 20 Stunden Einlaufprogramms im Realversuch kann daher in ca. 66 Stunden nachvollzogen werden.

Reibarbeit/-leistung eines entsprechenden SRV-Ringsegments im Zwickelbereich bei einem Arbeitstakt

$$W_{RSeg} = 0,154 \text{ J}$$

$$P_{RSeg} = 123 \text{ W bei einer Kontaktzeit von } t_{RSeg} = 0,00125 \text{ s}$$

Reibarbeit/-leistung eines Ringsegments auf einem SRV-Schwingweg

$$W_{RSRV} = 0,134 \text{ J}$$

$P_{RSRV} = 4,8 \text{ W}$  bei einer Kontaktzeit von  $t_{RSeg} = 0,025 \text{ s}$

Die Benetzung der Lineroberfläche kann wahlweise in Vollschnierung, also einem Ölbad, bzw. in Mangelschnierung durch diskretes Dosieren des Schmieröls erfolgen. Eine vertikale Positionierung des SRV-Prüfstandes zur Annäherung an das Realsystem wurde im betrachteten Fall nicht umgesetzt, ist aber kommerziell verfügbar. Die Versuchsauswertung konzentriert sich im Wesentlichen auf die Messung der Reibung, da eine In-Prozess-Verschleißmessung nicht möglich ist. Einen exemplarischen Verlauf des Reibungskoeffizienten während eines Versuches mit Mangelschnierung im Vergleich zur Vollschnierung zeigt Abbildung 4.17.

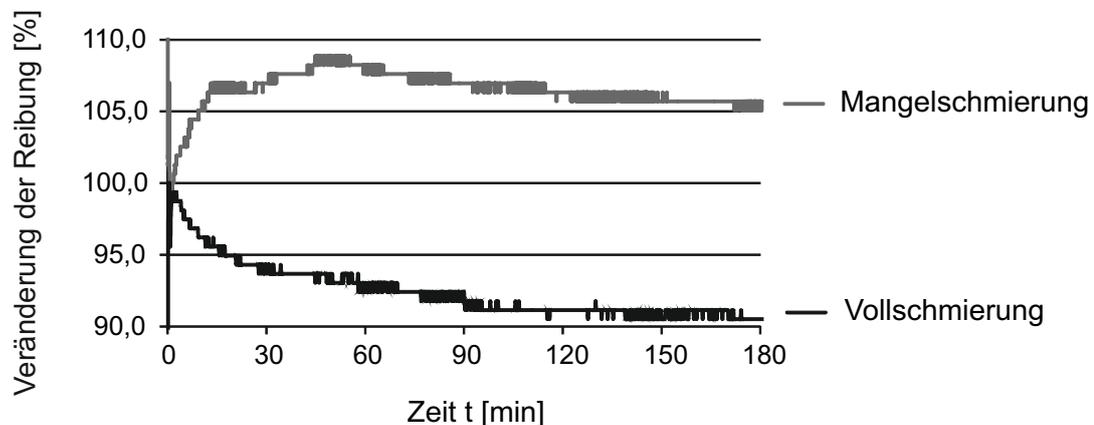


Abbildung 4.17: Verlauf des Reibungskoeffizienten im SRV einer gleitgehonten Lauffläche

Als Einlaufzeit wird die Dauer bis zum Erreichen des durchschnittlichen Reibungskoeffizienten definiert. Diese ist zwangsläufig auch stark von der Oberflächenstruktur der Bauteile abhängig. Unter Mangelschnierung mit einmaliger Özugabe zu Beginn des Versuches zeigen alle Versuche eine Anlaufphase mit einem unregelmäßigen Verlauf, die mit dem Erreichen des maximalen Reibungskoeffizienten endet. In dieser Phase wird sukzessive der vorab aufgebrachte Ölfilm abgetragen, sodass das System immer stärker in den Bereich der Grenzreibung entsprechend der Stribeckkurve übergeht [Czic10]. Die progressive geometrische Anpassung der Flächenelemente scheint bei Erreichen des Maximums abgeschlossen, sodass sich das Reibkraftniveau stabilisiert und bei Ausprägung einer Grenzschicht auch leicht absinkt. Hingegen verläuft der Einlaufvorgang beim System in Vollschnierung im Mischreibungsbereich, was bedeutet, dass hydrodynamische Effekte zum Vorschein treten und die maßgeblichen

Komponenten der Reibung in Form von Deformations- und Furchungsprozessen dominieren und kontinuierlich sinken. Es wird weiterhin deutlich, dass eine Modifikation der Schmierbedingungen in der SRV-Prüfung nur sehr geringe Reibkraftveränderungen nach sich zieht. Dies bedeutet weiterhin, dass Veränderungen der Oberflächentopografie demnach auch nur sehr geringe Reibkraftveränderungen bewirken. Dies zeigt die Analyse unterschiedlicher Strukturrichtungen und Strukturhöhen in Abbildung 4.18. In diesem Fall ergeben sich zwei Effekte, zum einen, dass eine Oberfläche mit tendenziell transversalen Rauheiten, also Riefen um 90° versetzt zur Bewegungsrichtung, und plateauartige Profile mit großem Schmierstoffspeichervolumen den hydrodynamischen Tragdruck erhöhen und somit die Reibung reduzieren. Diese Versuche dienen dem Systemverständnis und der Einordnung späterer Versuchsergebnisse.

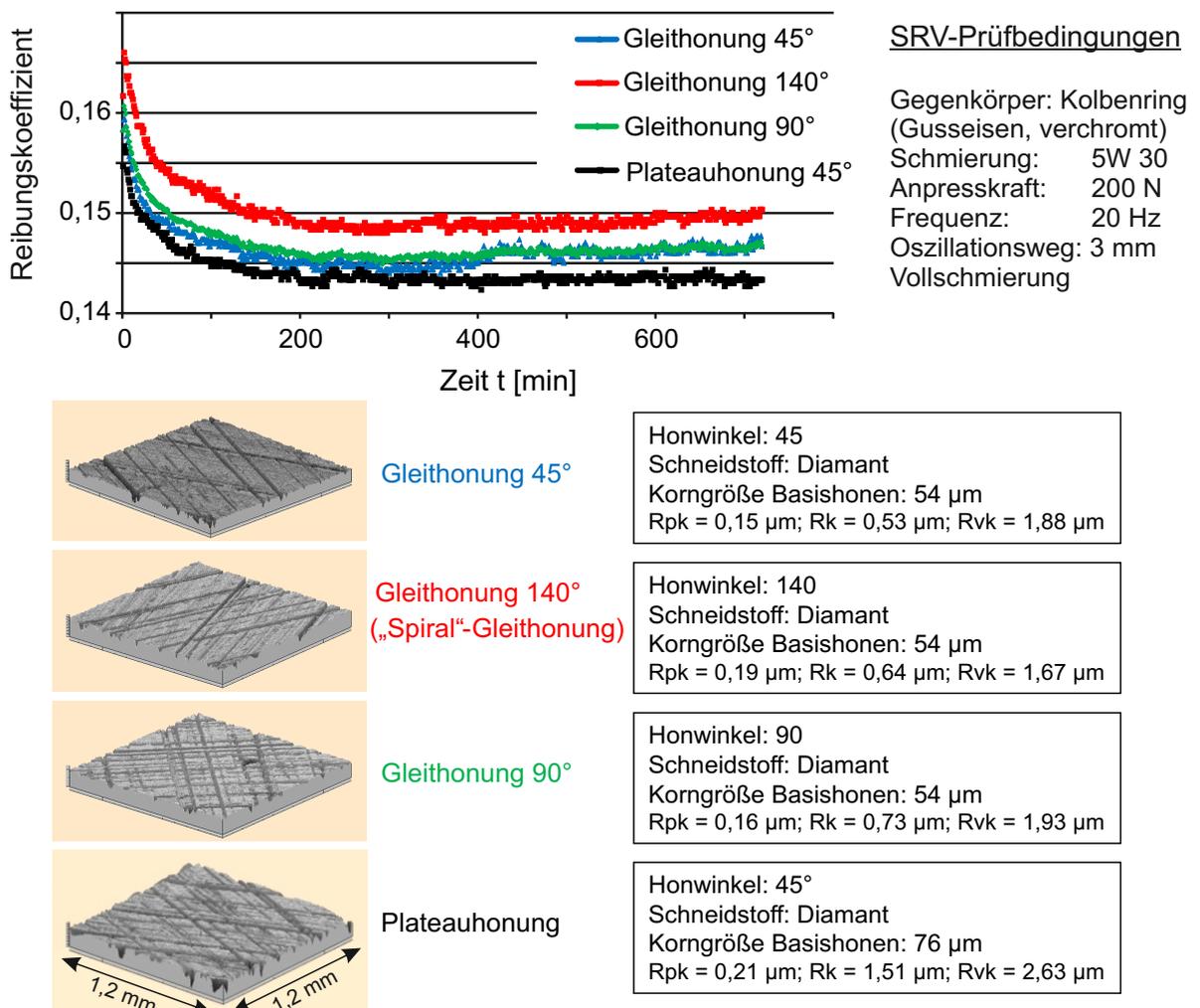


Abbildung 4.18: Vergleich unterschiedlicher Oberflächenstrukturen im SRV-Prüfstand

Zur weiteren Qualifizierung des SRV-Prüfstandes wurde die Möglichkeit der Abbildung von Einlaufprozeduren überprüft (Abb. 4.19)[DA11]. Im vorliegenden Fall erfolgte eine Art Konditionierung des tribologischen Systems durch einen verschärften Einlauf mit erhöhter Last. Bei Reduzierung der Last auf Betriebsbedingungen zeigt sich ein geringerer Reibungsvorteil, welcher jedoch nicht durch vergleichbare Verschleißmessungen untermauert werden konnte. Der Anstieg der Reibung der hochbelasteten Probe im späteren Verlauf legt eine progressive Verschleißentwicklung nahe, kann jedoch diese nicht eindeutig bestimmen, da Reibung und Verschleiß nicht immer korrelieren.

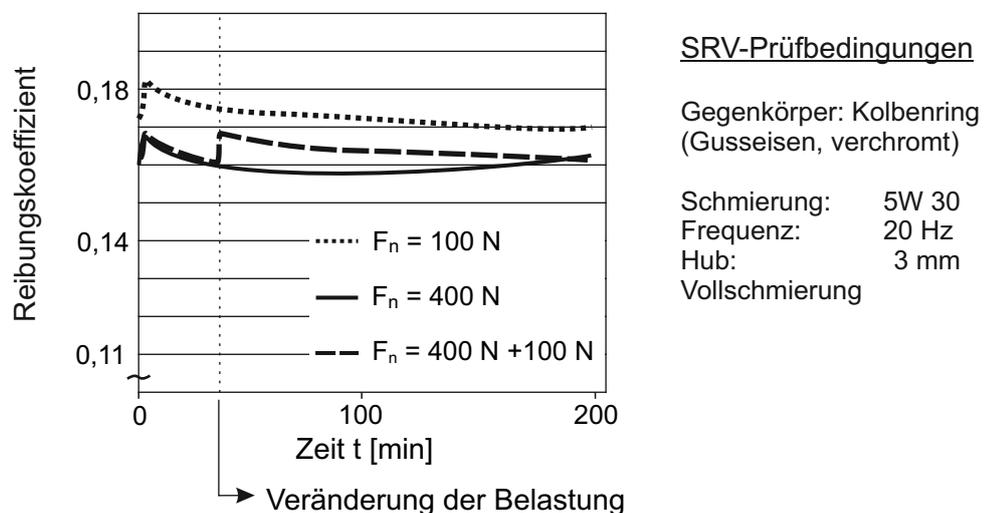


Abbildung 4.19: Simulation eines scharfen Einlaufs im SRV-Prüfstand

## 4.3 Kraftmessung

### 4.3.1 Analyse des Zerspanprozesses beim Langhubhonen am tribologischen Modellversuch

Um grundlegende Erkenntnisse zur Prozesskraft beim Honen zu gewinnen, bietet sich der Analogieversuch am Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer (SRV, Abschnitt 4.2) an. Die überlagerte Hub- und Drehbewegung des Honens kann im SRV-Tribometer nicht nachgebildet werden, dennoch besteht die Möglichkeit der Erfassung des Reibungskoeffizienten unter dem Einfluss unterschiedlicher Oszillationsgeschwindigkeiten und Belastungen. Die im realen Prozess wirkenden Geschwindigkeiten erreichen nicht sel-

ten Größenordnungen von ca. 1 m/s und sind somit nicht reproduzierbar. Die Flächenpressung hingegen kann beeinflusst werden und erreicht im SRV-Tribometer durchaus größere Werte als im realen Prozess. Folgerichtig kann davon ausgegangen werden, dass eine ähnliche Leistung abgegeben wird. Durch eine Reduktion der Honleistenlänge um Faktor 8 können bei vergleichbaren Normalkräften ähnliche oder gar höhere Flächenpressungen erzielt werden als im realen Prozess. Die Gegenkörper aus lamellarem Gusseisen entsprechen dem Zustand der Zylinderlaufläche zu Beginn der Endbearbeitung. Als Zwischenstoff dient ein Honöl (Honilo 930 der Fa. Castrol), welches in konstanter Menge vorliegt (ca. 1,6 ml). Die Abgrenzung zum Realsystem Honleiste/Zylinderlaufläche kann somit wie folgt definiert werden:

1. veränderte Kinematik in Hublänge  
→ verändertes Geschwindigkeitsprofil,
2. veränderte Kinematik der Bewegungsrichtung  
→ keine kreuzenden Strukturen und
3. Stagnation des Kühlschmierstoffflusses  
→ keine kontinuierliche Spanabfuhr

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen liegt der Vorteil dieser Versuchsanordnung in der kurzen Messstrecke zur Kraftermittlung und der vergleichsweise definierten Positionierung von Grund- und Gegenkörper reduzierter Dimension. Bei Betrachtung der im Prozess umgesetzten Leistung (Anhang A.3) zeigt sich, dass ein vergleichbares Prozessfenster sehr klein ist. Da eine maximale Frequenz von  $f = 80$  Hz bei einer Amplitude von mind. 2 mm im SRV berücksichtigt werden muss, wird die Übertragung dieser Versuche auf den Realprozess weiter erschwert. Jedoch kann anhand des aufgezeigten Versuchsaufbaues die Schnitt- respektive Reibkraft in erster Näherung grob abgeschätzt werden.

### 4.3.2 In-Prozess-Kraftmessung beim Langhubhonen

Aussagen zur im Prozess umgesetzten thermischen und mechanischen Energie bedürfen einer genauen Kenntnis der Prozesskräfte. Entsprechend der Definition von KLOCKE ET AL. zählt die zwischen Werkzeug und Werkstück wirkende Kraft bei kraftschlüssiger Zustellmechanik beim Honen im Gegensatz zum Schleifen nicht zu den Prozesskenngrößen sondern zu den Einstellgrößen [Kloc05]. Die resultierende Schnittkraft als

Prozesskenngröße kann folglich als Funktion der Einstellgröße Anpresskraft dargestellt werden. Zur Ermittlung der Schnittkraft müssen deren Komponenten in axialer und tangentialer Richtung bestimmt werden. In der Zerspantechnik kann die Kraftmessung an rotierenden Werkzeugen über rotierende Mehrkomponenten-Dynamometer durchgeführt werden, deren besonderes Merkmal die berührungslose Datenübertragung zwischen Dynamometer und Telemetrie darstellt. In diesem Fall muss eine nahezu konstante Spaltweite von ca. 1 bis 2 mm zwischen Rotor und Stator sichergestellt werden können. Im Anwendungsfall Honen stellt dies die größte Unwägbarkeit dar, da dieser Prozess durch eine Vielzahl von Freiheitsgraden des Werkzeuges bezogen auf das Werkstück gekennzeichnet ist. Neben den Prozessgrößen Drehmoment  $M_D$  und Axialkraft  $F_a$ , welche als Funktion der radialen Anpresskraft  $F_r$  die Schnittkraft  $F_c$  ergeben, stellt die Messung der radialen Anpresskraft  $F_r$  aus der Kombination der Axialkraft des Konus  $F_{ka}$  und des Konuswinkels die elementare Messaufgabe dar (Abb. 4.20).

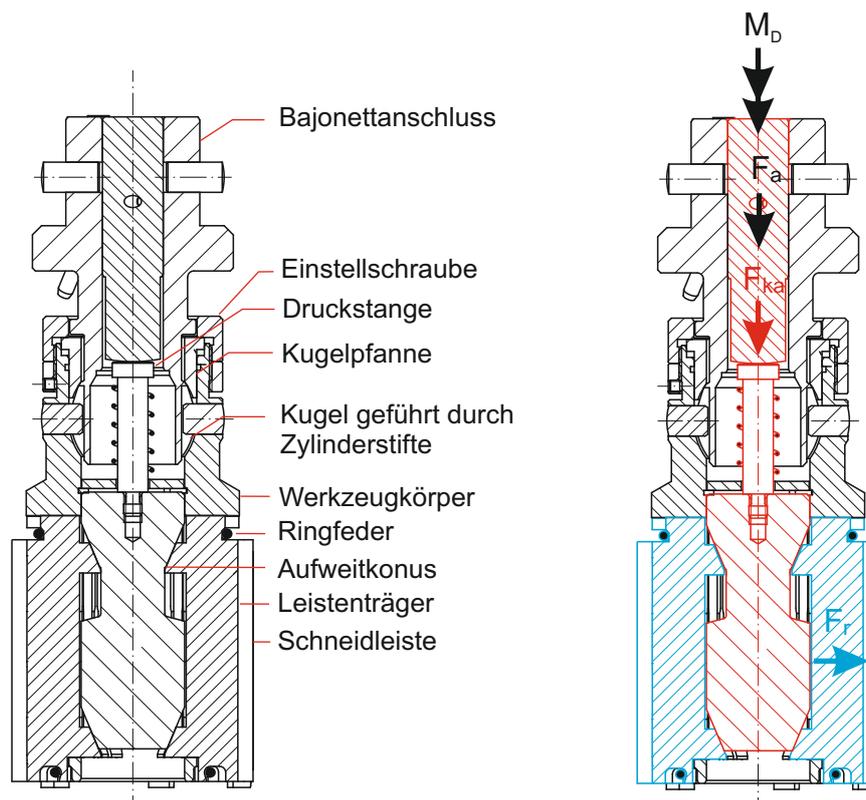


Abbildung 4.20: Honwerkzeug in Schnittdarstellung (links), Kraftfluss innerhalb des Honwerkzeugs (rechts)

### Stand des Wissens

Die In-Prozess-Messung der Anpresskraft  $F_r$  stellt den anspruchsvollsten Bereich der Kraftmessung während des Honprozesses dar. Die Schwierigkeiten ergeben sich aus dem Aufbau und der Kinematik des Werkzeuges (Abb.4.20). Grundsätzlich kann entsprechend der Messstelle in drei Messanordnungen unterschieden werden:

1. der direkten Kraftmessung im Kraftfluss nahe der Wirkstelle,
2. der quasi direkten Kraftmessung im Kraftfluss auf Seiten des Werkzeuges und
3. der Kraftmessung im Nebenfluss auf Seiten des Werkstückes.

Diese unterscheiden sich generell in ihrer Messunsicherheit, bieten aber je nach Zugänglichkeit zum Prozess Vor- und Nachteile im Aufbau, welche immer Bestandteil der Überlegungen zur Anwendbarkeit einer Messanordnung sind. Entsprechend den Betrachtungen von MUSHARDT stellen die Reibkräfte zwischen Zustellkonus mit dem Konuswinkel  $\gamma$  und Leistenträger die größte Messunsicherheit in der Bestimmung der realen Anpresskraft dar [Mush86]. Er zeigt anhand der Gleichungen 4.1 und 4.2, dass die reale Anpresskraft  $F_r$  trotz konstanter Vorschubkraft  $F_{ka}$  erheblich schwanken kann. Andererseits kann die Anpresskraft  $F_r$  in verengten Bohrungsabschnitten deutlich ansteigen, bevor eine Änderung der Vorschubkraft  $F_{ka}$  gemessen werden kann. [Mush86] errechnete und validierte bei einem Honwinkel von  $22^\circ$  und einem Reibungskoeffizienten von 0,12 zwischen Zustellkonus und Leistenträger ein Verhältnis von maximaler zu minimaler Anpresskraft  $F_r$  infolge der veränderten Wirkrichtung von  $F_{ka}$  in Höhe von  $\frac{F_{rmax}}{F_{rmin}} = 2,2$ .

Belasten des Zustellkonus:

$$F_r = F_{ka} \cdot \frac{\cos \gamma - 2\mu \sin \gamma}{m(\sin \gamma + \mu \cos \gamma)} \quad (4.1)$$

Entlasten des Zustellkonus:

$$F_r = F_{ka} \cdot \frac{\cos \gamma + 2\mu \sin \gamma}{m(\sin \gamma - \mu \cos \gamma)} \quad (4.2)$$

Die direkte Kraftmessung im Kraftfluss nahe der Wirkstelle stellt unter Betrachtung der Messunsicherheit den günstigsten Aufbau dar. Arbeiten von Hoffmeister zur Regelung von Honprozessen zeigen Untersuchungen zur Bestimmung von  $F_r$  mittels pneumatischen Kraftsensoren, welche unterhalb der Schneidleiste im Leistenträger positioniert

wurden [Hoff04]. Diese gehen auf die Arbeit von Maskus zurück, in welcher die pneumatische Kraftmessung nach dem Prinzip der Düse - Prallplatte funktioniert [Mask90]. Hierbei kommt ein nachgiebiges Kraftmesselement zur Anwendung, welches einen definierten Luftspalt, der unterhalb einer Federplatte liegt, verengt. Mittels einer Düse kann der resultierende Staudruck ermittelt und einer Abstandsänderung von Düse und Platte sowie entsprechend einer Kalibrierkurve einer Normalkraft gleichgesetzt werden. Diese Anordnung beeinflusst jedoch die Steifigkeit des Gesamtsystems und ist für eine seriennahe Anwendung von zu komplexer Natur, da die Schneidleistenträger zur Implementierung der fragilen Sensorik aufwendig modifiziert werden müssen. Eine weitere Möglichkeit der direkten Kraftmessung bietet die direkte Implementierung von piezoelektrischen Sensoren in den Honleleistenträger [Salj83, Mush86, Mask90]. So wurden Piezoelemente paarweise unterhalb der Honleiste positioniert und das Messsignal über Miniaturladungsverstärker im Werkzeugkorpus an Schleifringen einem externen Registergerät zugeführt [Mush86]. Aktuelle Entwicklungen haben dieses Konzept zur Erzeugung von definierten Vorhaltekonturen zur Verzugskompensation zylindrischer Bauteile erweitert [Wien10]. In diesem Konzept befinden sich die aktorischen Bauelemente in Form von Piezokeramiken stapelförmig in axialer Anordnung oberhalb eines separaten Zustellkonus im Werkzeug. Dieser Aufbau erhöht die Komplexität des Werkzeuges um ein Vielfaches und muss zusätzlich durch umfangreiche Telemetrie sowie geeignete Schnittstellen zur Signalübertragung zwischen rotierender Spindel und Stator ergänzt werden (Abschnitt 2.4.4). Dem gegenüber steht die Messung der Anpresskraft im Nebenfluss am Werkstück. Bei dünnwandigen Werkstücken kann dies über die Ermittlung der radialen Dehnung erfolgen [Yoko87]. Da die Qualitätsanforderungen beim Honen jedoch eine vorrichtungsseitige Kompensation jeglicher Dehnungen bzw. eine verzugsarme Bearbeitung vorsehen, kommt der Kraftmessung im Nebenfluss keine Bedeutung zu. Eine weitere Möglichkeit stellt die Messung der Anpresskraft im Kraftfluss zwischen Schneidleiste und Anpresskinematik dar. Exemplarisch kann hierbei die Anbringung von Dehnmessstreifen am Zustellkonus angeführt werden [Zett74]. In diesem Zusammenhang konnten große Konuskraftschwankungen, also Schnittkraftschwankungen, bei konstanter Zustellkraft entlang der Hubbewegung gemessen werden. Die Ermittlung der Schnittkraft, welche sich aus der Axialkraft  $F_a$  und des Drehmomentes  $M_D$  ergibt, kann im Kraftfluss am Werkzeug bzw. im Kraftfluss am Werkstück durchgeführt werden. Von einer Kraftmessung im Nebenfluss, welche beispielhaft über eine Verformungsmessung des Werkstückes mittels Interferometrie realisiert werden kann, wird in dieser Anwendung abgesehen. Erste Untersuchungen auf diesem Gebiet wurden mittels einer Applikation von Dehnmessstreifen am Werkstück vollzogen [Yoko87]. Nachtei-

lig an diesem Konzept ist der Mangel an Messdaten zur Bestimmung der Anpresskraft der Honleisten. In aktuellen Arbeiten zum kraftgesteuerten Honen kleinerer Bohrungen wurde die Kraftsensorik in die Druckstange implementiert [Bähr13]. Dieser Ansatz ist bei lokalen Bauraumrestriktionen vorteilhaft. Eine vergleichsweise effektive Lösung zur Ermittlung von Prozesskräften stellt die Kombination von Signalen der Prozesssteuerung und einer indirekten Kraftmessung dar.

Grundsätzlich kann die Axialkraft des Konus  $F_{ka}$  auch aus dem Druckanstieg des Systems bei kraft geregelter hydrostatischer Aufweitung sowie aus der Leistungsaufnahme der elektrischen Stellmotore sowie vorzugsweise aus der Regelung der Servoantriebe bei elektromechanischer Schrittaufweitung im weggeregelten System bestimmt werden [West13]. Dieser Ansatz bedarf der werkzeugabhängigen Kalibrierung des Gesamtsystems. Die verwendete Kraftmesstechnik umfasst folgende Eigenschaften:

1. Messung der Anpresskraft  $F_r$  aus Daten des Stellmotors für die axiale Zustellung des Konus sowie aus dem Hydraulikdruck der hydrostatischen Aufweitung mit vorausgehender Kalibrierung des Gesamtsystems,
2. Messung der Schnittkraft  $F_c$  im Werkstück unter Anwendung einer Mehrkomponenten-Kraftmessplattform.

### Kalibrierung des Gesamtsystems bezogen auf die Messung von $F_r$

Zur Bestimmung der radialen Aufweitungskraft  $F_r$  wurden spezielle Messbügel entwickelt, welche in Kombination mit zwei Dehnungsmessstreifen an der Innen- und Außenseite die Kraft über jeweils zwei Leistenpaare erfassen. In diesem Kontext bleibt zu beachten, dass die wirksame radiale Anpresskraft bzw. zwischen Honleiste und Werkstückwandung wirkende Flächenpressung bei Verwendung von ringfedergespannten Honleisten eine Funktion des Aufweitweges  $s$  darstellt. Somit muss die Gleichung 4.1 um die wegabhängige Federkraft  $F_f(s)$  erweitert werden:

$$F_r = F_{ka} \cdot \frac{\cos \gamma - 2\mu \sin \gamma}{m(\sin \gamma + \mu \cos \gamma)} - F_f(s). \quad (4.3)$$

Da zur Gewährleistung einer parallelen Aufweitung ein Doppelkonus entsprechend Abbildung 4.21 im Werkzeug verbaut wurde, erfolgte die Kompensation des Kippmoments durch den Einsatz eines zweiten Messbügels. Die definierte Vorspannung der Messbügel erfolgt über Mikrometerschrauben. Um ein Verkippen der Messbügel zu verhindern,

wurden außerhalb des Kraftflusses Ösen vorgesehen, welche eine statisch bestimmte Lagerung gewährleisten können. Die Kalibrierung der Messbügel erfolgte unabhängig über eine piezoelektrische Kraftmessplattform, welche wiederum mit einem Gewicht kalibriert wurde und mittels eines mechanischen Kraftmessbügels, zu welchem ein Kalibrierprotokoll vorliegt. Die Abweichung beider Kalibriermethoden, welche den ersten beschreibbaren Messfehler wiedergibt, kann mit 5 % benannt werden. Da die Langzeitstabilität von Dehnmessanordnungen nicht zu 100 % sichergestellt werden kann, sind regelmäßige Neukalibrierungen der Messbügel erforderlich.

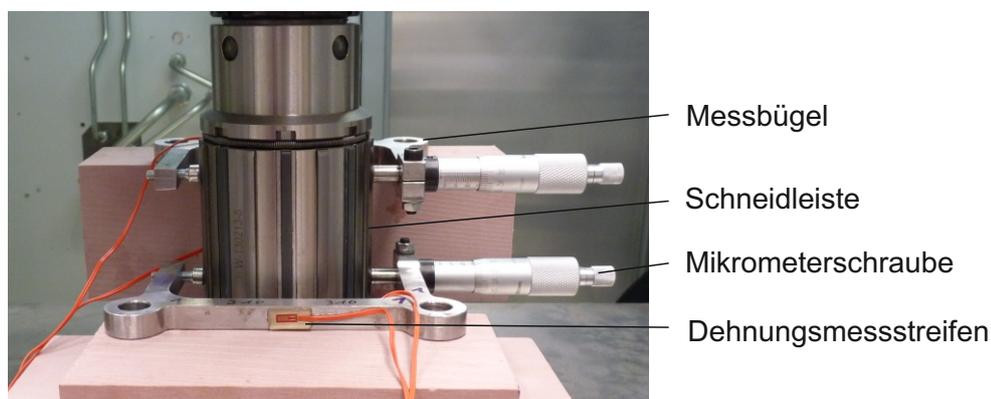


Abbildung 4.21: Anordnung der Messbügel zur Bestimmung von  $F_r$

Über das Anfahren definierter Aufweitdrücke und Aufweitmomente durch die hydrostatische und elektromechanische Aufweitung können die Signale der speicherprogrammierbaren Steuerung definierten Kräften zugeordnet und Kalibrierkurven erstellt werden. Die größten Messabweichungen liegen in der werkzeuginternen Reibung zwischen beispielsweise dem Aufweiskonus und den Leistenträgern. Da der Reibungskoeffizient bei Messung über einem Leistenpaar bei entsprechend höherer Kraft von den Betriebsbedingungen, also entsprechend um den Faktor 4 geringeren Pressungen an den Leistenpaaren, abweichen wird, muss dies bei der Kalibrierung berücksichtigt werden. Daher wurden die Kalibrierkurven für jedes Leistenpaar auch bei geringen Kräften beginnend bei 15 % der hydraulischen Druckaufweitung (HDA) aufgenommen. Dies stellt jedoch nur eine vergleichsweise grobe Annäherung an den wahren Messwert dar. Eine verbesserte Messanordnung müsste exemplarisch für jeden Leistenträger zwei 1-Komponenten Kraftsensoren in einer „Mutterbuchse“ aufweisen. Somit ergeben sich für ein 8-Leisten-Werkzeug 16 radial angeordnete Sensoren, welche zeitgleich die Normalkraft aufnehmen. Diese Anordnung ist jedoch messtechnisch sehr aufwendig, da

alle Sensoren definiert vorgespannt werden müssten und die zu messende Normalkraft sehr gering wäre, was wiederum die Messunsicherheit beeinflusst. Exemplarisch am Beispiel der hydraulischen Druckaufweitung (HDA) soll die Kalibrierung zweier unterschiedlicher Werkzeuge beschrieben werden. Über steuerungsseitige Vorwahl der Druckstufen wurde die jeweils resultierende Anpresskraft an den Messbügeln ermittelt. Folgende Erkenntnisse wurden verifiziert:

- Die Aufweitungskraft beider Messbügel differiert. Dies lässt eine Formabweichung des Konus bzw. der Leistenträger vermuten.
- Bei pulsierender Aufweitung schwankt die maximale Aufweitungskraft. Dies kann auf Stick-Slip-Effekte und geometrische sowie reibungsbehaftete Vorgänge zwischen Leistenträger und Konus hinweisen.
- Die resultierende Aufweitungskraft unterschiedlicher Leistenpaare am identischen Werkzeug schwankt. Somit müssen alle Leistenpaare eines Werkzeuges einzeln vermessen werden, um eine arithmetische Mittelung zu erhalten.
- Mit steigender Lebensdauer ändert sich das Reibverhalten zwischen Leistenträger und Konus.

Es bleibt zu beachten, dass zur Ermittlung der real wirksamen Flächenpressung der Abstand zwischen Honleiste und Werkstückwandung im entlasteten System näherungsweise bestimmt werden muss. Weiterhin muss konstatiert werden, dass Aussagen zur lokal wirksamen Flächenpressung äußerst kritisch betrachtet werden sollten. Dies geht aus der Zylindermakroformabweichung des Werkstückes, der vergleichsweise großen Leistenüberdeckung mit Formabweichungen des Zustellkonus und daraus resultierenden Lageveränderungen der Schneidleisten sowie der wegabhängigen Aufweitungskraftschwankung bei hydrostatischer Aufweitung in Berücksichtigung der vorab beschriebenen Erkenntnisse hervor.

### **Schnittkraftmessung**

Der Honprozess stellt vor dem Hintergrund der Einrichtung einer Kraftmesstechnik eine Vielzahl von Restriktionen. Primär wirken im Honprozess neben dem Läppen, Polieren und wenigen Schleifoperationen geringe Prozesskräfte bzw. Schnittkräfte am gesamten Werkzeug im Bereich von  $100 \text{ N} < F_c < 300 \text{ N}$ . Weiterhin stellt der sehr hohe Durchsatz von Kühlschmiermedium mit einem daraus resultierenden hohen Temperaturgradienten

sehr hohe Anforderungen an die Lagerung piezoelektrischer Kraftmesssensorik, da die thermische Dehnung die mechanische Dehnung stark überlagert. Die werkstückseitige Kraftmessung geht aus der Komplexität des Werkzeugaufbaus (Abb. 4.20) hervor. Als zusätzliche Forderung geht die Ortsauflösung der Schnittkraft mit ein. Diese kann beim Einsatz starr gelagerter Werkzeuge und bei der Anschnitterkennung sinnvoll sein. Entsprechend den Randbedingungen wurde eine Messplattform konzipiert, welche im definierten Abstand zur Wirkfläche mit einer hohen und somit thermisch stabilen Masse versehen wurde [Karp13b] (Abb.4.22).

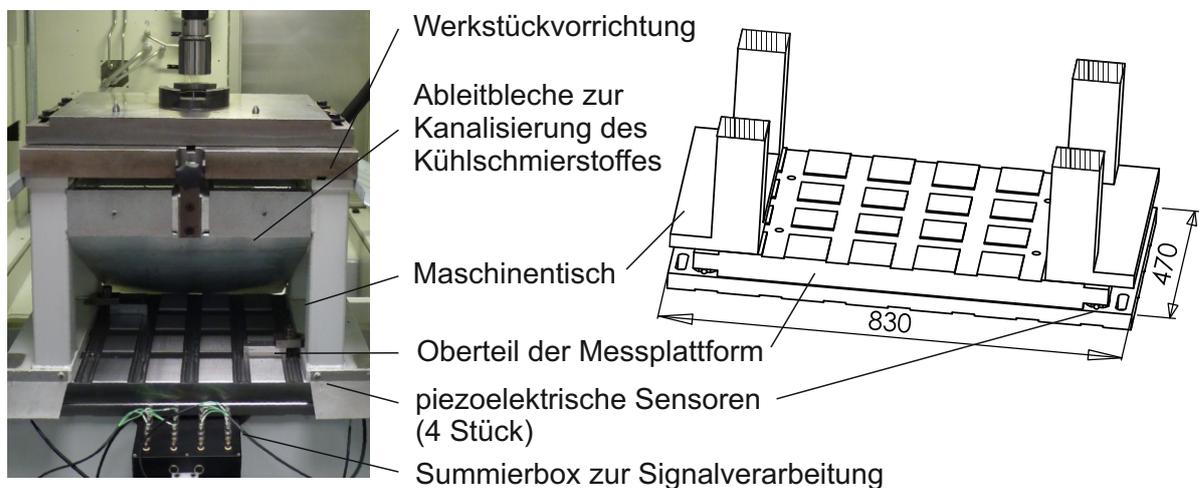


Abbildung 4.22: Messplattform zur Schnittkraftmessung beim Honen

Die Messung der Schnittkraft an unterschiedlichen Honwerkzeugen mit verschiedenen Schneidstoffen zeigt deutliche Differenzen (Abb. 4.23). Im Vergleich von Diamant- und Keramikschnidleisten wird deutlich, dass die keramischen Schnidleisten bei ähnlicher Korngröße eine geringere Schnittkraft hervorrufen. Das Konzept beinhaltet vier symmetrisch verteilte 3-Komponenten Kraftmesssensoren mit den Messbereichen in Krafrichtung z (normal zur Plattform) von -30 kN bis +30 kN und in lateraler Krafrichtung von -15 kN bis +15 kN bei einer Empfindlichkeit in Krafrichtung z von -3,7 pC/N. Mit der Umsetzung dieses Konzeptes kann die thermische Drift auf ca. 2 N/min begrenzt werden (Abb. 4.22).

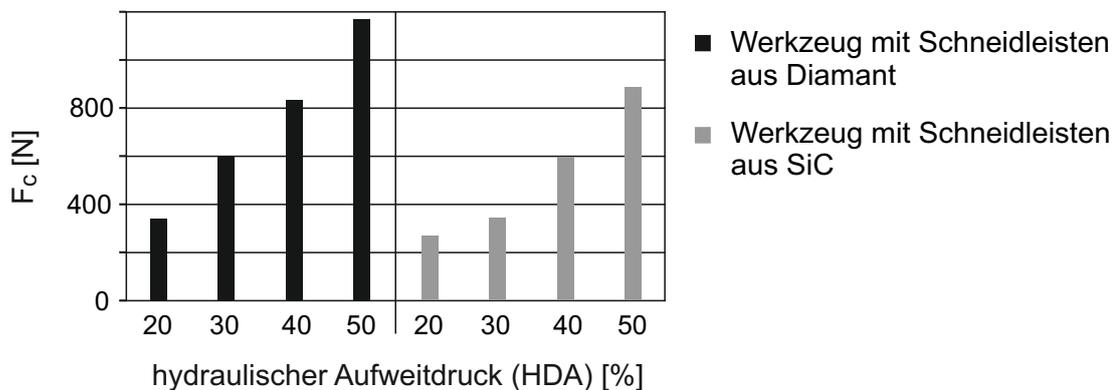


Abbildung 4.23: Schnittkraftmessung an unterschiedlichen Honwerkzeugen

### Komplexitätsreduktion im Messaufbau

Der in Abschnitt 4.3.2 dargestellte Messaufbau zur Bestimmung der radialen Aufweirkraft kann unter Nutzung der Messplattform stark vereinfacht werden. Da der Zustellkonus des Honwerkzeuges (Abb. 4.20) an der unteren Stirnfläche frei zugänglich ist, kann die wirkende Axialkraft normal zur Messplattform durch Auflegen des Werkzeugkonus ermittelt werden. In Kombination mit Messungen zur resultierenden Radialkraft respektive Aufweirkraft  $F_r$  kann der Reibungskoeffizient zwischen Leistenträger und Zustellkonus lastabhängig bestimmt werden. Somit kann die Messung der Axialkraft in Kombination mit Reibungsrichtwerten eine Näherung der wirksamen Aufweirkraft liefern.

## 4.4 Validierung der Charakterisierungsmöglichkeiten der Grenzschicht

Das primäre Problem in der Charakterisierung oberflächennaher Bereiche stellt die im Verhältnis raue Oberflächentopografie dar. Zum einen wird dadurch die Ausprägung der Grenzschicht lokal stark beeinflusst, sodass diese auf lateraler Ebene in eine Vielzahl von Teilbereichen untergliedert ist und zum anderen erschwert das Rauheitsprofil die Zugänglichkeit der Analysemethoden. Die chemische Analyse der Grenzschicht beruht vornehmlich auf spektroskopischen Methoden unterschiedlichster Strahlquellen

und Detektoren bzw. Sonden, welche Informationen zur chemischen Zusammensetzung in qualitativer als auch quantitativer Form liefern können. Zur Analyse der mechanischen Eigenschaften sind primär die Analyse der oberflächennahen Eigenspannungszustände in Form der Gitterdeformationen sowie daraus ableitbare Kenntnisse über Festigkeitsänderungen relevant. Diese können über die Ermittlung von Gitterdehnungen oder einen instrumentierten Eindringversuch mit geometrisch definierten Festkörpern erfolgen.

#### 4.4.1 Röntgendiffraktometrie und Streuvektormessungen

Wie eingangs erwähnt, erfolgt die Ermittlung von Eigenspannungskomponenten anhand der Messung von röntgenographischen Beugungsinterferenzen am Kristallgitter durch das  $\sin^2\psi$ -Verfahren [Spie09]. Hierbei werden elastische Gitterdehnungen von oberflächennahen Festkörperkristallen ermittelt. Die dargestellten Untersuchungen wurden am Produktionstechnischen Zentrum der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Um festzustellen, ob die in durch die Einstrahlbedingungen und die Strahleigenschaften bedingten Messtiefen gemessenen zweiachsigen Eigenspannungszustände Korrelationen zum oberflächennahen Gefügestand zulassen, sind Information über einen möglichen Eigenspannungsgradienten notwendig. Dazu muss in erster Linie die Tiefe der Messstelle  $z$  genauer bestimmt werden (Abb. 4.24). Nach dem BEERschen Gesetz kann die Schwächung der primären Intensität  $I_0$  nach Durchlaufen einer Strecke  $t$  im Inneren eines Werkstoffes näherungsweise mit

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu(E) \cdot t} \quad (4.4)$$

beschrieben werden [Denk08b]. Für die Ermittlung der Messtiefe  $z$  ist der Geometriefaktor  $k$  entscheidend, welcher das geometrische Verhältnis von Primär- und Sekundärstrahl zur Messtiefe  $z$  beschreibt:

$$k = \frac{t}{z} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} \quad (4.5)$$

Somit lässt sich  $z$  näherungsweise mit

$$z = \frac{1}{\mu(E)k} = \frac{1}{2\mu(E) \sin \theta} \quad (4.6)$$

bestimmen. Im vorliegenden Fall und bei der Anwendung von Cr-K $\alpha$  Strahlung bei einer

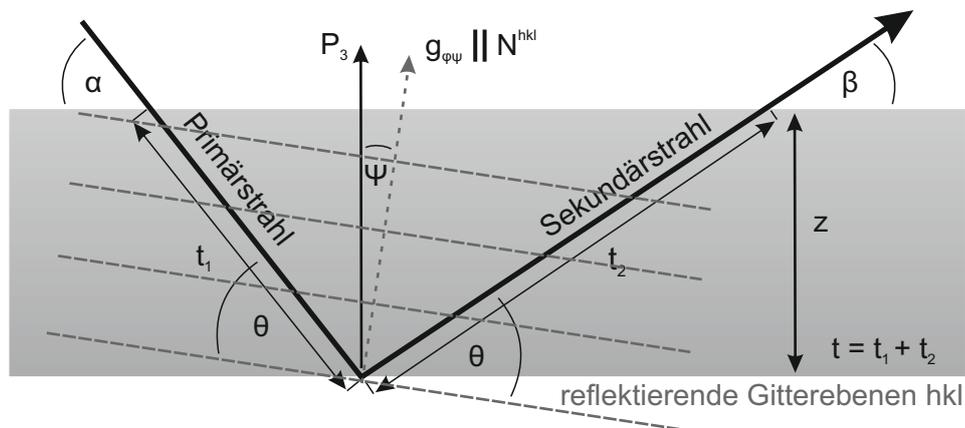


Abbildung 4.24: Eindringgeometrie der Röntgenstrahlung bei kristallinen Werkstoffen [Denk08b]

Anodenspannung von 40 kV kann somit näherungsweise auf eine Messtiefe von  $z = 5 - 7 \mu\text{m}$  geschlossen werden. Dies bestätigen auch Ergebnisse in SPIESS ET AL., die im Ferritbereich mittlere Eindringtiefen von  $z = 5,6 \mu\text{m}$  nachweisen konnten [Spie09]. Zur Bestimmung eines möglichen Eigenspannungsgradienten wurde das Streuvektorverfahren der röntgenographischen Analyse angewendet [Genz99, Genz01]. Da, wie eingangs formuliert, die Eindringtiefe  $z$  vom Gesamtweg der Röntgenstrahlung innerhalb der Probe abhängt, kann über eine Variation der Beugungsgeometrie eine Änderung der Tiefe des Messsignals herbeigeführt werden. Hierbei findet eine Drehung um den Streuvektor  $g_{\phi\psi}$  bei  $2\theta = \text{konstant}$  statt. Dabei bezeichnet  $\eta$  den jeweiligen Winkelbetrag der Drehung um  $g_{\phi\psi}$  in einem Bereich von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$ . Die Ebene, welche aus Primärstrahl PS, Sekundärstrahl SS und Streuvektor aufgespannt wird, steht senkrecht auf der Probenoberfläche. Die Drehung  $\eta$  entspricht somit einer relativen Drehung der benannten Ebene um das Probensystem (Abb. 4.25).

Die Eindringtiefe  $z$  im Streuvektormodus lässt sich bestimmen über die Beziehung

$$z = \frac{\sin^2 \theta - \sin^2 \psi + \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin^2 \eta}{2\mu \sin \theta \cdot \cos \psi}. \quad (4.7)$$

Der lineare Absorptionskoeffizient wird durch  $\mu$  und der Braggwinkel durch  $\theta$  beschrieben.

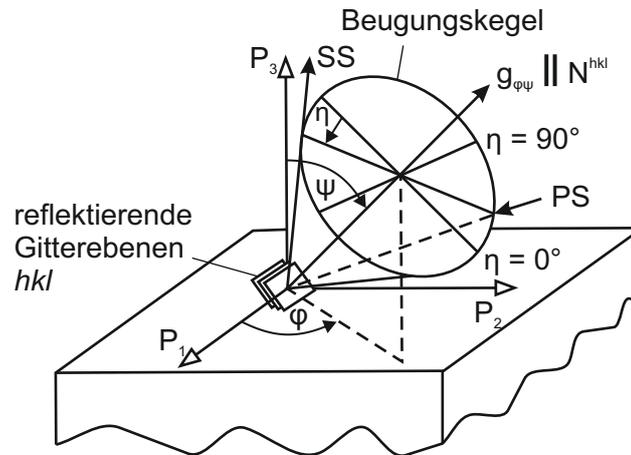


Abbildung 4.25: Beugungsgeometrie der röntgenographischen Eigenspannungsanalyse nach GENZEL

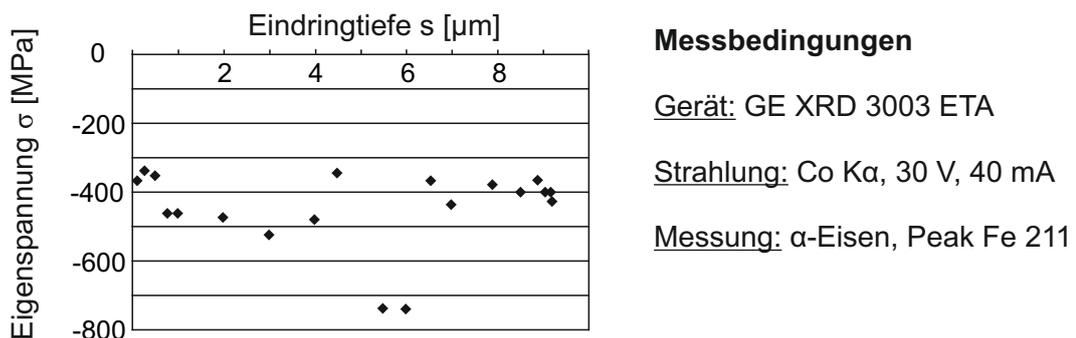


Abbildung 4.26: Ergebnis der Streuvektormessung einer tribologisch belasteten Oberfläche

Die Streuvektormessungen zeigen, dass in dem diesem Verfahren zugänglichen Tiefenbereich von 0 bis ca. 9  $\mu\text{m}$  bei der Anwendung von Co  $K\alpha$ -Strahlung kein steiler Eigenspannungsgradient existiert (Abb. 4.26). Die beiden Ausreißer zwischen 5 und 6  $\mu\text{m}$  Tiefe sind bedingt durch die Nähe des Kippwinkels  $\psi$  zum Kippwinkel der dehnungsfreien Richtung  $\psi^*$ . Sie können vernachlässigt werden (Anhang A.4).

Weitere Untersuchungen zum Eigenspannungsniveau zeigen einen Abfall der fertigungsbedingten Druckspannungen nach dem Einlauf (Abb. 4.27). Dies wird in der Ausprägung der Hauptspannungen und unter Berücksichtigung der Schubkomponenten in

der Vergleichsspannung deutlich. Eine signifikante Unterscheidung beider Einlaufverfahren kann durch die Analyse der Haupt- und Schubspannungskomponenten nicht vollzogen werden. Es zeigt sich lediglich eine Tendenz, welche eine Reduktion von Druckeigenstressungen durch erhöhte tribologische Belastung während des scharfen Einlaufvorganges vermuten lässt. Bei Betrachtung weiterer Bereiche entlang der Lauffläche unterhalb des oberen Totpunktes äußert sich die geringere tribologische Belastung in einer verringerten Anpassung des Druckeigenstressniveaus. In Korrelation zur Verschleißentwicklung in Abbildung 4.3 würde eine Reduktion der Verschleißgeschwindigkeit nach progressivem Einlauf gleichbedeutend mit dem Abfall des Druckspannungsniveaus sein. Dies sollte jedoch kritisch betrachtet werden, da prinzipiell aus einer Reduktion der Festigkeit keine Verschleißminderung resultieren sollte.

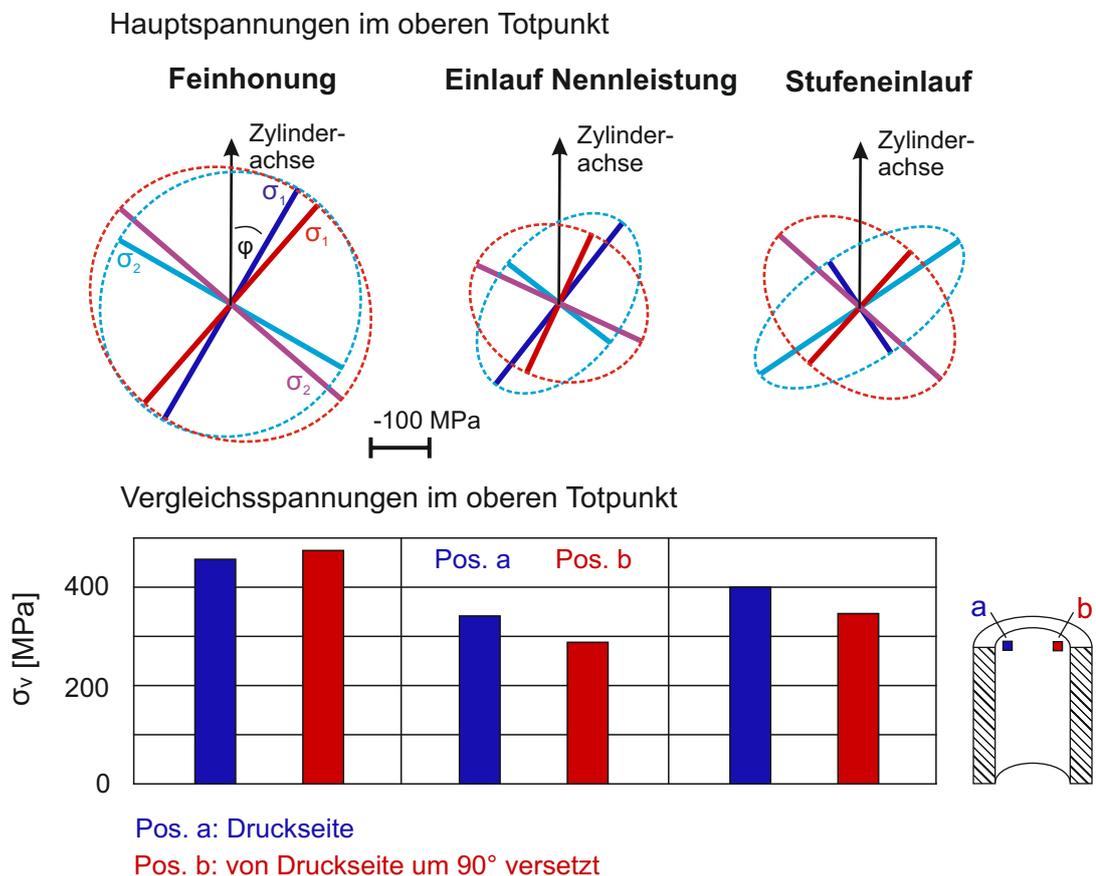


Abbildung 4.27: Hauptspannungen und Vergleichsspannungen im oberen Totpunkt unterschiedlich eingelaufener Zylinderkurbelgehäuse

Die in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Veränderung der Morphologie durch Einwirkung äußerer Bearbeitungskräfte könnte ebenso einen Einfluss auf das tribologische Verhalten ausüben. Daher ist die Ermittlung von Polfiguren ein probates Mittel zur Analyse von belastungsbedingten Texturen. Hierbei wird die Belegungsdichte in Form der Häufigkeitsverteilung bzw. Winkelverteilungsfunktion einer kristallographischen Richtung im Probenkoordinatensystem dargestellt. Die Poldichten werden in Vielfachen einer regellosen Verteilung ausgedrückt (MRD) [Seba01].

Die Abbildung 4.28 zeigt unterschiedliche kristallographische Ausrichtungen der 211-Richtung im kristallographischen Gitter gehonter und im Motorenprüflauf gefahrener Zylinderlaufflächen. Entsprechend der Belastungsrichtung und Belastungsintensität müssten Vorzugsrichtungen beim Honen in Winkeln um  $67^\circ$  und  $113^\circ$  bzw. um  $90^\circ$  versetzt und nach dem Einlauf von  $0^\circ$  und  $180^\circ$  auch  $90^\circ$  versetzt möglich resultieren. Es wird deutlich, dass weder die spanende Bearbeitung noch die tribologische Belastung signifikante Auswirkungen auf die Morphologie haben.

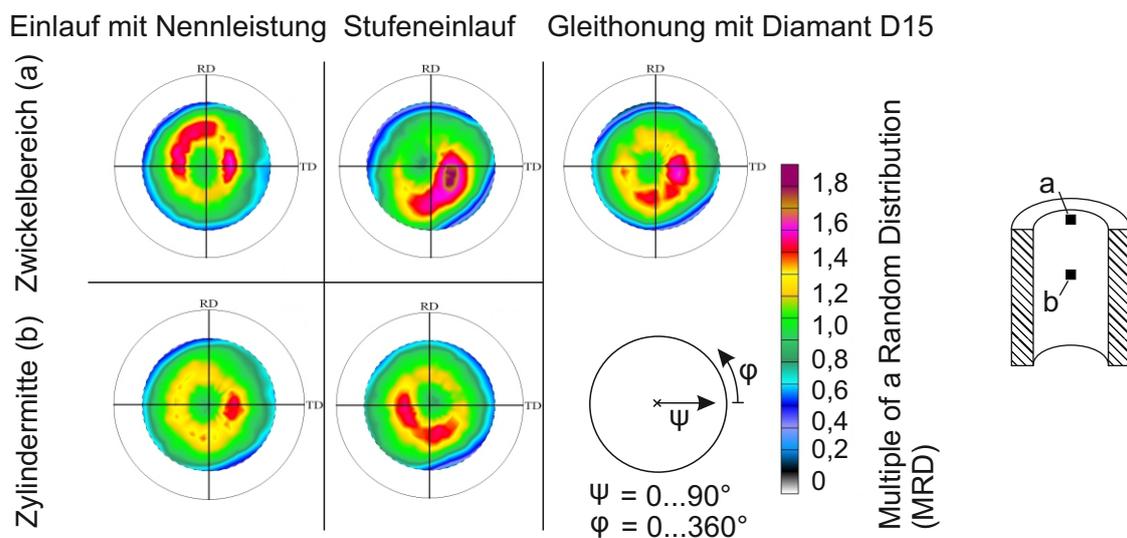
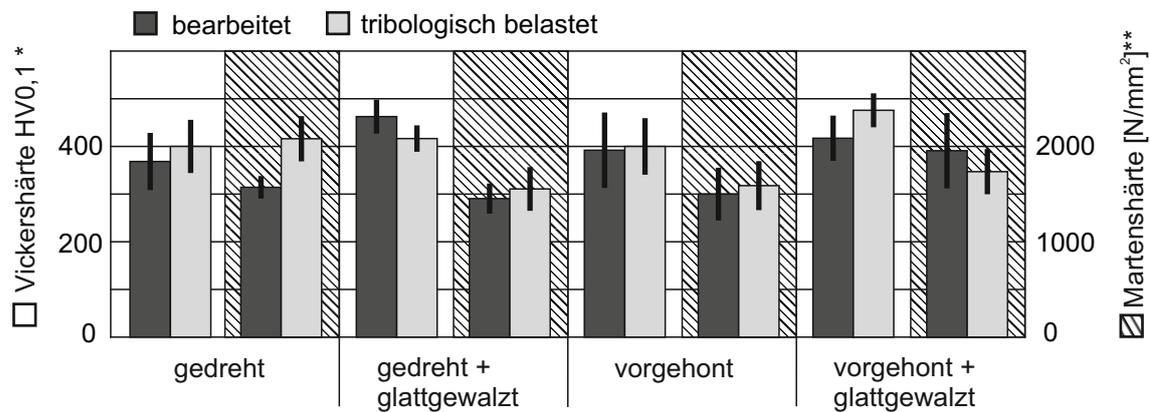


Abbildung 4.28: Polfiguren eines eingelaufenen Aggregats im Vergleich zur Honstruktur

#### 4.4.2 Makrohärte und Nanoindentation

Obwohl die Eignung der Härteprüfung nach Martens und Vickers für die Ermittlung tribologisch induzierter Festigkeitsänderungen aufgrund der großen Messfläche ungeeignet erscheint, sollte dies vorab betrachtet werden. Untersuchungen von SHAKHVOR-

OSTOV ET AL. und SCHERGE ET AL. zeigen eine deutliche Reduktion der Härte infolge der tribologischen Belastung [Shak04, Sche05]. Zur Validierung der Härteprüfverfahren wurden tribologisch belastete Zylinderlaufflächen untersucht. Es konnte keine signifikante bzw. systematische Reduktion der Makrohärte tribologisch belasteter Bauteile detektiert werden (Abb.4.29). Bei Betrachtung des Glattwalzprozesses kann die Härteprüfung in ihrer Auflösungstiefe verwendet werden. Oberflächennahe Festigkeitsänderungen sind jedoch nicht ausreichend durch Makrohärteprüfungen beschreibbar.



\* im Querschliff ca. 50 µm unterhalb der Oberfläche (Vergleichsspannungsmaximum)

\*\* normal zur Oberfläche gemessen

Abbildung 4.29: Vergleich von Härteprüfverfahren an tribologisch belasteten Oberflächen inkl. Standardabweichung

Im Gegensatz zur konventionellen Härteprüfung erfolgt bei der Nanoindentation nicht die geometrische Messung der plastisch verformten Eindringgeometrie, sondern eine kontinuierliche Messung der Eindringkraft und des Eindringweges bei bekannter Indentergeometrie und somit berechenbarer Kontaktfläche. Somit kann eine tiefenaufgelöste Messung von Härte und Elastizitätsmodul erfolgen. Durch kontinuierliche Steifigkeitsmessungen (CSM - Continuous Stiffness Measurement) bei Überlagerung der Anpresskraft mit einer harmonischen Kraftschwingung in Kombination mit den entsprechenden Auslenkungen kann die elastische Deformation, also der E-Modul bzw. die Indentationshärte berechnet werden (Abb. 4.30). Nach SHAKHVOROSTOV ET AL. kann eine Härteänderung infolge unterschiedlicher Reibleistung in Tiefenbereichen von 200 - 400 µm unterhalb der Oberfläche erwartet werden [Shak04]. Die Analysen zeigen zudem eine Reduktion der Härte infolge steigender Reibleistung.

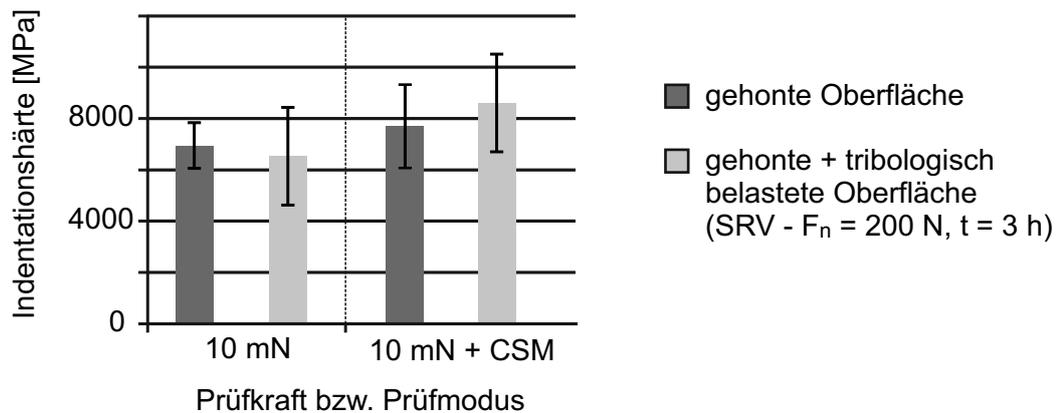


Abbildung 4.30: Indentationshärte unterschiedlich belasteter Bereiche berechnet aus der Prüfkraft pro projizierter Kontaktfläche

Indentationsergebnisse zu gehonten und im Anschluss tribologisch belasteten Laufflächensegmenten zeigen keine signifikanten Veränderungen der Festigkeit nach einer tribologischen Belastung im Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer (SRV). Neben der Oberflächenrauheit kommt hier speziell die Mehrphasigkeit des Werkstoffes zum Tragen, da Graphitlamellen bei geringen Indentationstiefen und -breiten das Messergebnis überdurchschnittlich stark beeinflussen. Ein typischer Berkovich-Indenter hat einen Spitzenradius von ca. 100 nm. Im Vergleich dazu weisen die Graphitlamellen eine Breite bis zu ca. 10  $\mu\text{m}$  auf. Diese werden zwar nicht bewusst fokussiert, liegen jedoch nicht immer sichtbar an der Oberfläche.

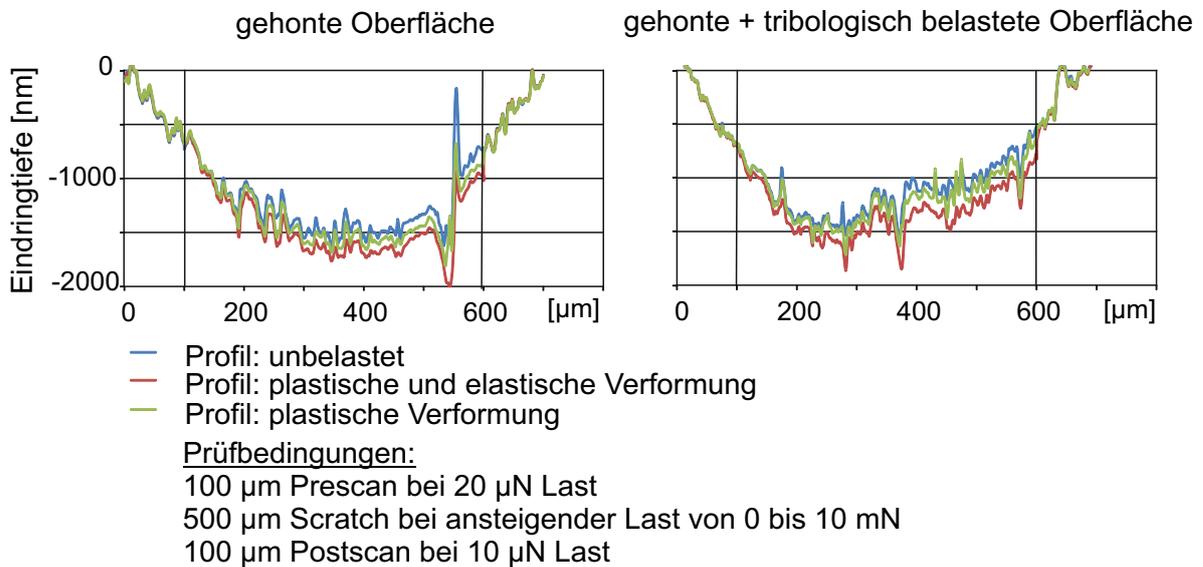
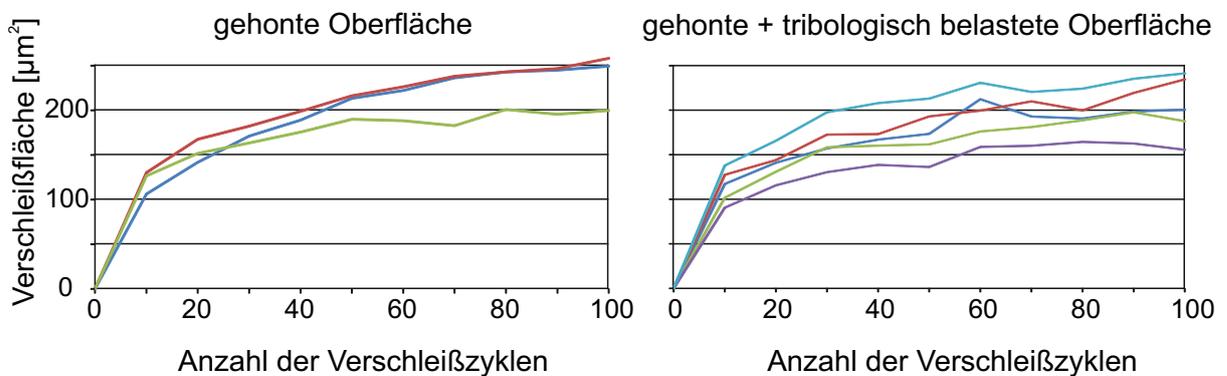


Abbildung 4.31: Kratzversuche zur Ermittlung der Verschleißfestigkeit



Prüfbedingungen:  
 Last: 20 mN  
 Weglänge: 200  $\mu\text{m}$   
 Zyklen: 10 x 10

Die Farbcodierung entspricht unterschiedlichen Abriebspurlagen.

Abbildung 4.32: Abriebversuche zur Ermittlung der Verschleißfestigkeit

Eine weitere Möglichkeit bietet sich in der Durchführung von Untersuchungen zur Verschleißfestigkeit von Oberflächen entsprechend Abbildungen 4.31 und 4.32. Idealer-

weise wären hier Lateralkraftmessungen sinnvoll, welche jedoch bisher technisch nicht fehlerfrei umgesetzt wurden. Zum einen wurde in Kratzversuchen die Last in einer Spur sukzessive erhöht und somit die Verformungstiefe im elastischen und plastischen Bereich bestimmt (Abb. 4.31). Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede zwischen gehontem und tribologisch belastetem Profil erkennbar. Weiterhin wurde gezielt durch Abriebversuche Verschleiß erzeugt und das Verschleißvolumen errechnet (Abb. 4.32). Hier zeigen sich leichte Unterschiede zwischen den betrachteten Oberflächen. So weist die tribologisch belastete Probe einen leicht erhöhten Verschleißwiderstand auf. Dies bestätigt den Effekt des Einlaufens, muss aber immer unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Topografien bewertet werden.

#### **4.4.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)**

Einen sehr groben Einblick in die chemische Gestalt in Kombination mit der Morphologie der Grenzschicht kann mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit Mikrosonden zur energiedispersiven Röntgenspektroskopie erlangt werden. Durch die Detektion von elementspezifischen Röntgenquanten können quantitative Aussagen zum oberflächennahen Elementgehalt gemacht werden. Hierbei sind laterale Auflösungen von ca. 1  $\mu\text{m}$  und Tiefenaufösungen von ca. 5  $\mu\text{m}$  möglich [Gobi04]. Zur Charakterisierung äußerer Grenzschichten ist die Auflösung im Tiefenbereich zu gering (Abb. 4.33). Es zeigt sich jedoch schon durch diese Untersuchungen der Effekt der mechanischen Vermischung und des Eintrages chemischer Elemente durch tribologische Belastung. Im hochbelasteten Plateaubereich werden Additivelemente des Schmierstoffs bis in Bereiche um 5  $\mu\text{m}$  in den Grundwerkstoff eingetragen. Die Konzentrationstiefenverteilung von Sauerstoff kann analog Abbildung 1.2 als Indikator der tribologischen Belastungsintensität definiert werden.

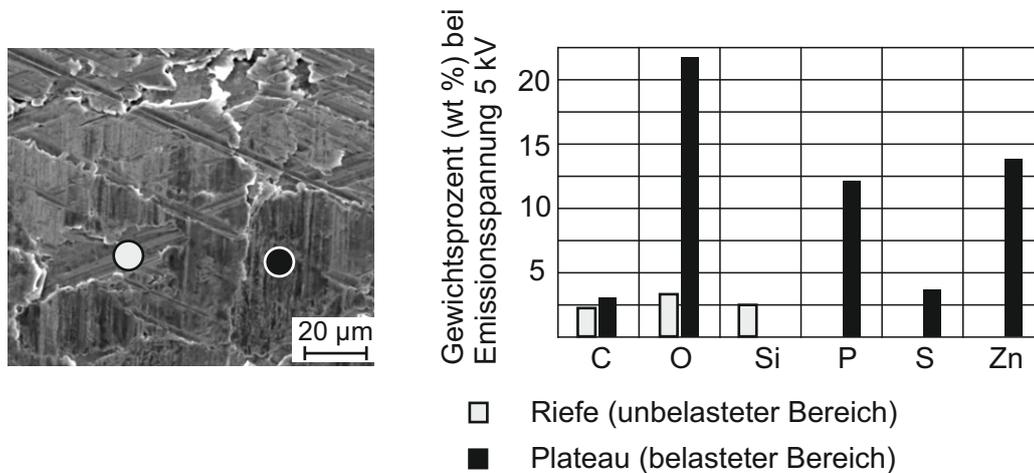
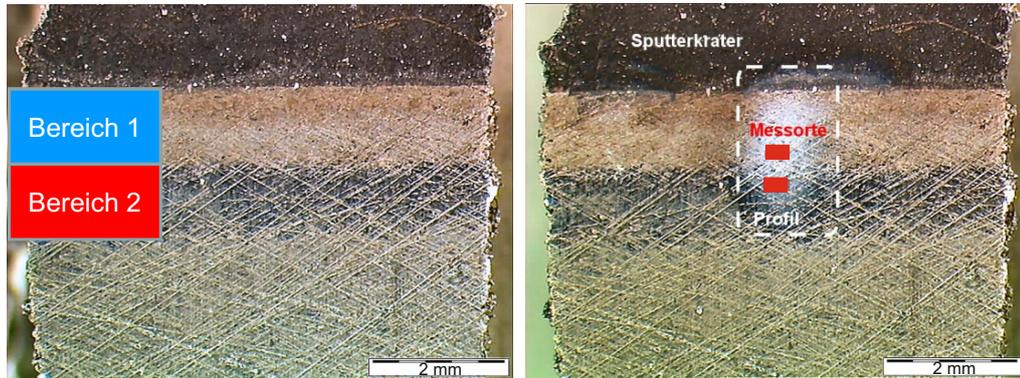


Abbildung 4.33: Oberflächenanalyse mittels EDX in unterschiedlich tribologisch belasteten Bereichen

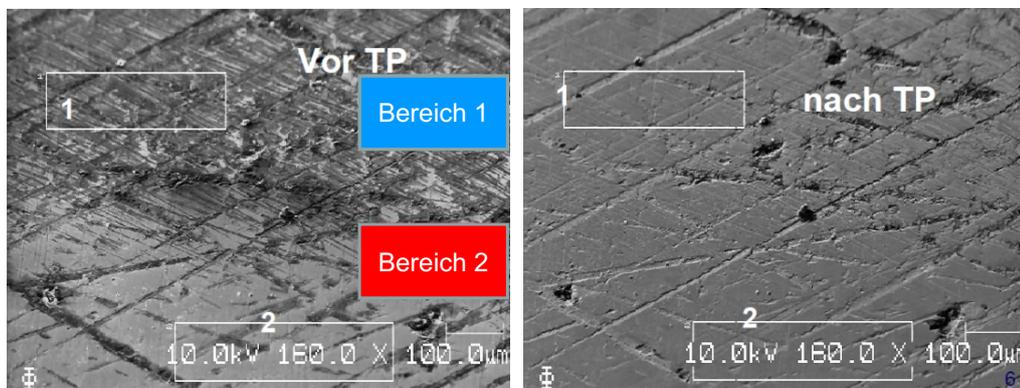
#### 4.4.4 Elektronenspektroskopie (AES und XPS)

Zu den am weitesten verbreiteten elektronenspektroskopischen Analyseverfahren gehört neben der Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (XPS) die Augerelektronen-Spektroskopie (AES). Hierbei werden durch Elektronenstrahlanregung Auger-Elektronen mit für bestimmte Atomsorten charakteristischer Energie emittiert. Die Austrittstiefe der Auger-Elektronen hängt von deren Energie ab und kann für 100 eV im Bereich von 0,5 nm und für 2.000 eV im Bereich von 3 nm liegen [Kehr98]. Im Vergleich zu massenspektroskopischen Analyseverfahren, welche eine integrale Elementkonzentration liefern, kann die Elementzusammensetzung in der AES punktuell erfolgen. Zudem können Veränderungen der Peakform im differenzierten Augerspektrum auch Aufschlüsse über chemische Bindungsverhältnisse an der freien Oberfläche liefern. Durch zusätzliches Sputtern, also Festkörperzerstäubung mittels Ionen, kann eine Tiefenverteilung ermittelt werden. Zur Bestimmung der Sputtertiefe werden Referenzmaterialien, z.B.  $Ta_2O_5$ , nahe der Messfläche platziert, welche die optischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Sputtertiefe ändern und somit Tiefeninformationen preisgeben. Diese Tiefenbestimmung kann nur relativ erfolgen, da die Sputtertiefe immer als Funktion des Grundmaterials zu betrachten ist und daher in keinen absoluten Maßstäben angegeben werden kann. Ebenso stellt die Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (XPS) ein

probates, oberflächensensitives Verfahren der atomar-chemischen Analytik im AES-ähnlichen Empfindlichkeitsbereich von 0,1 - 1 Atomprozent (at %) dar. Beide Verfahren können chemisch-atomare Informationen aus Tiefenbereichen zwischen 1 - 5 nm liefern. Die Oberflächensensitivität der XPS wird durch die Austrittstiefe der Photoelektronen in wenigen Atomlagen an der Oberfläche bestimmt. Die Quantifizierung des Signales bzw. der ermittelten Peaks erfolgt über theoretisch berechneten bzw. an Eichproben ermittelten Empfindlichkeitsfaktoren. Bei der Erstellung eines Tiefenprofils durch sukzessives Sputtern und Messen der Probe muss beachtet werden, dass durch das Sputtern eine physikalisch bedingte Anreicherung schwerer Elemente an der Oberfläche stattfindet. Dies manipuliert die stöchiometrische Zusammensetzung der Oberfläche, welche wiederum durch elektronenspektroskopische Analysen dementsprechend wiedergegeben wird. Massenspektroskopische Analyseverfahren (Abschnitt 4.4.5), welche die Stöchiometrie des gesamten Teilchenflusses analysieren, kompensieren diese Erscheinung und liefern daher definiertere Aussagen zur Konzentration chemischer Elemente. Die AES-Analyse eines Zwickelbereichs (Abb. 4.34) des betrachteten, eingelaufenen Aggregates zeigt zwei unterschiedliche Bereiche. Der Zwickel kann in den Bereich des maximalen Verschleißes in der Kontaktzone des Kolbenringes (Bereich 2) und eine Kontaktzone mit dem Kolbensteg oberhalb (Bereich 1) unterteilt werden. Die AES-Analyse im Bereich 1 zeigt eine deutliche Kohlenstoffabdeckung in Korrelation mit einer erhöhten Sauerstoff- und Kalziumkonzentration. Im Bereich 2 wird hingegen nur eine dünne Oxidschicht mit deutlich weniger Kalzium detektiert. Neben Schwefel ist Kalzium ein Hauptadditiv des tribologischen Zwischenstoffs. Weitere Additivelemente, wie Zink und Phosphor, werden aufgrund der untersuchungsbedingten Nachweisgrenze im atomaren Prozentbereich nicht sicher nachgewiesen.



Lichtmikroskopie-Bilder des Zwickelbereichs vor und nach dem AES-Tiefenprofil (TP)



SEM-Bilder der AES-Analysepositionen vor und nach dem Tiefenprofil (TP)

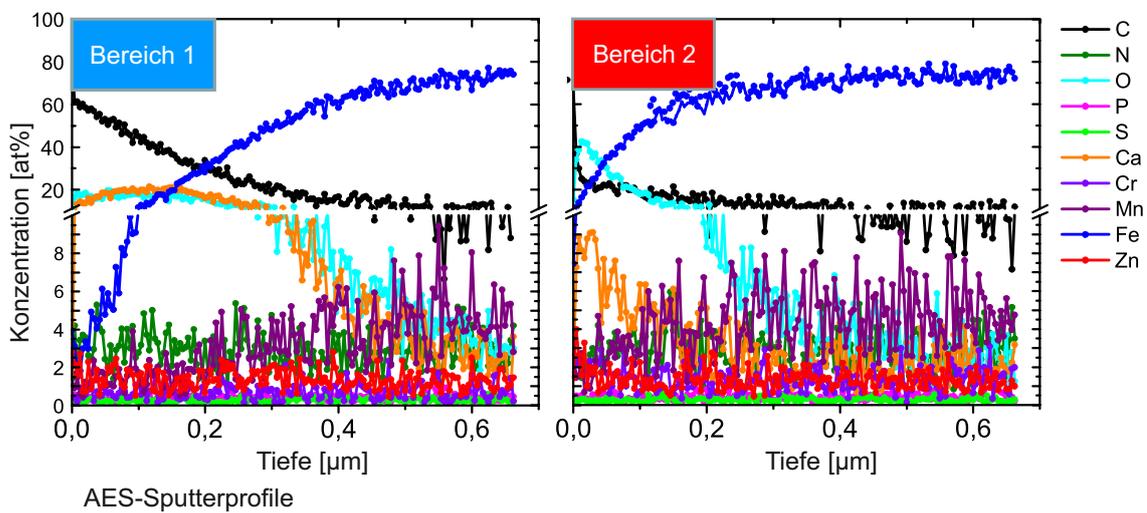


Abbildung 4.34: AES-Analysen im Zwickelbereich eines optimiert eingelaufenen Aggregates (Vgl. Abb. 4.3)

#### 4.4.5 Massenspektroskopie (SIMS und SNMS)

Massenspektroskopische Verfahren, wie die Sekundärneutralteilchen-Massenspektroskopie (SNMS) und Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) detektieren aus einer Oberfläche durch externen, gerasterten Ionenbeschuss abgetragene Teilchen entsprechend deren Masse und Ladung und können somit eine tiefenaufgelöste Zusammensetzung des Festkörpers liefern. Zur Ionisierung wird die Probenoberfläche mit Ionen, welche z.B. aus Edelgasen stammen, unter einem flachen Einfallswinkel beschossen. Die quantitative Tiefenauflösung ist im einstelligen Nanometerbereich und bei Nutzung der Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry ToF-SIMS) bis in Bereiche um 1 nm, also den ersten zwei bis drei Monolagen des Festkörpers, möglich [Grad06]. Somit können laterale Molekülionenverteilungen graphisch dargestellt werden. Dabei wird in definierten zeitlichen Takten die Oberfläche beschossen. Im Gegensatz zu Quadrupol-Massenspektrometern kann daher der Beschußzeitpunkt als Flugzeitbeginn definiert werden und auf einer durch Feldeinflüsse gekrümmten Bahn die Flugzeit der Ionen gemessen werden. In der Sekundärneutralteilchen-Massenspektroskopie werden die abgetragenen Neutralteilchen durch Plasma oder Elektronenstrahl ionisiert und in einen Massenfilter gelenkt. Da die neutralen Teilchen (Atome) nahezu den gesamten Fluss der ionenzerstäubten Teilchen ausmachen, ist SNMS empfindlicher und weniger matrixabhängig. Dies bedeutet, dass durch die Entkopplung von Emission und Ionisierung die störenden Matrixeffekte eliminiert werden. Matrixeffekte ergeben sich primär aus der Abhängigkeit der elementspezifischen Ionisierungswahrscheinlichkeit von der entsprechenden Oberflächenstöchiometrie. Beispielhaft wird durch die Anwesenheit von Sauerstoff an der Probenoberfläche eine Steigerung der elementspezifischen Ionisierungswahrscheinlichkeit um Faktor 0,1 erzielt [Kohl96]. Eine absolute Konzentrationsermittlung ist mit SIMS im Vergleich zur AES nur schwer möglich, da die Ionisierung der Elemente abhängig von deren Bindung ist. Es ändert sich in Abhängigkeit der angewandten Analyseverfahren die Stöchiometrie. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, mehrere komplementäre Analyseverfahren parallel einzusetzen. Dies zeigt die vergleichende Betrachtung der Messungen aus den Abbildungen 4.35 und 4.34 an der selben Messstelle. Es zeigen sich verfahrensbedingt deutlich unterschiedliche Elementkonzentrationen, jedoch prinzipiell ähnliche Konzentrationsgradienten. Der tribologisch hoch belastete Bereich 2 im Zentrum des Zylinderzwickels unterscheidet sich primär vom Bereich 1 in den Konzentrationsgradienten von Kalzium, Phosphor und Schwefel. Diese Elemente sind im Zentrum des Zwickels weniger stark in Oberflächennähe nachzuweisen. Eine um-

fassendere Bewertung der chemischen Zusammensetzung muss unter Betrachtung verschiedener Belastungszustände entsprechend Abschnitt 5.4 erfolgen. Die dargestellten Untersuchungen zur chemischen Analyse wurden am Institut für Oberflächen- und Schichtanalytik GmbH Kaiserslautern durchgeführt.

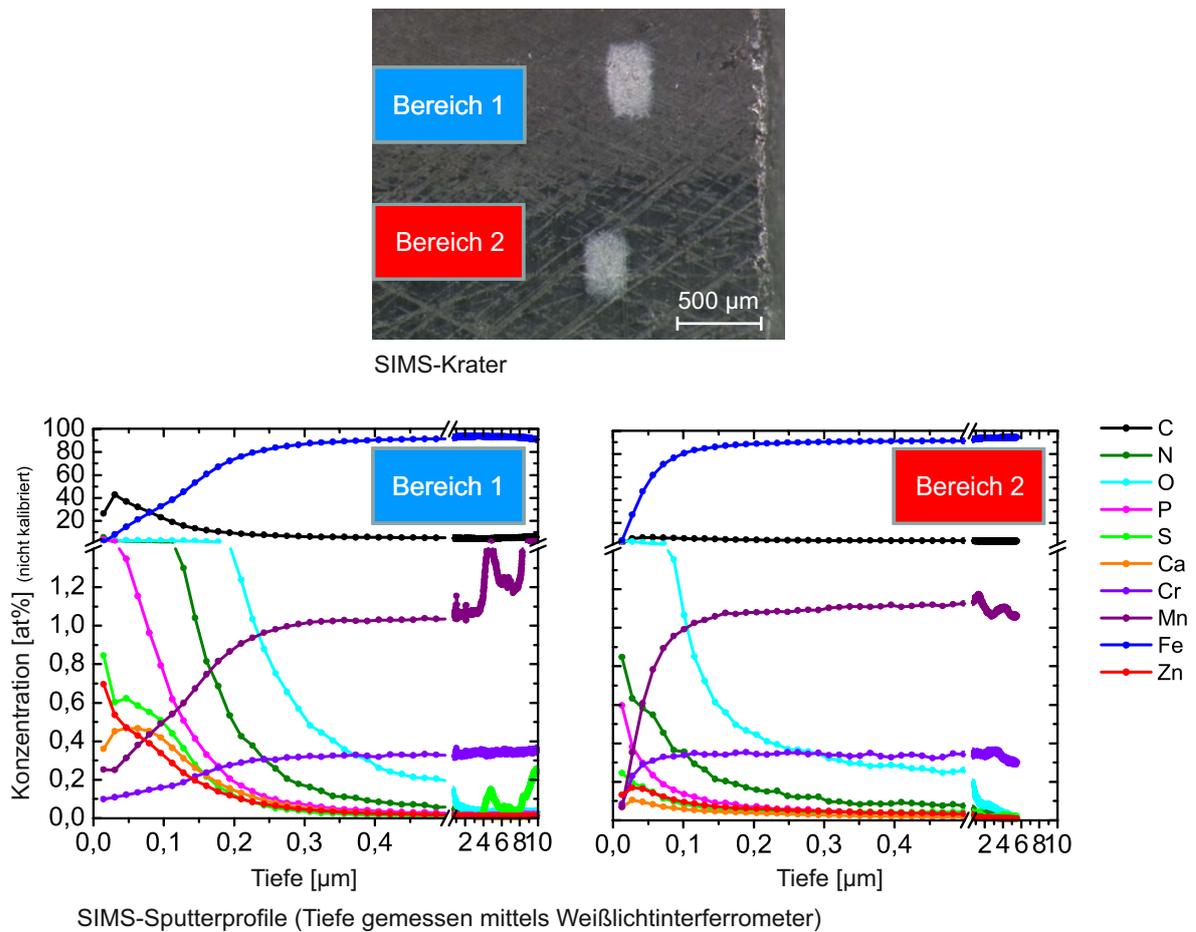


Abbildung 4.35: SIMS-Analyse im Zwickelbereich eines optimiert eingelaufenen Aggregates

# 5 Darstellung der Ergebnisse

## 5.1 Entwicklung alternativer Prozesse zur Strukturierung von Laufflächen

Da die Vorteile einer definierten Struktur aufgrund komplexer Fertigungsprozesse nicht immer wirtschaftlich in der Großserienfertigung umgesetzt werden können, bestand der Anspruch ein robustes und wirtschaftliches Verfahren zu beschreiben. Die wirtschaftlichen Nachteile des Laserstrukturierungsprozesses liegen primär in:

- den hohen Investitionskosten, bedingt durch die Komplexität und Präzision der Anlagen zur Strahlerzeugung,
- den erhöhten Energiekosten, bedingt durch den Wirkungsgrad, welcher bei Diodenlasern bei maximal 50 % liegt,
- einem zusätzlichen Platzbedarf in der Produktion mit erhöhten Arbeitsschutzanforderungen,
- der Erzeugung von Aufschmelzungen am Rand der Struktur, welche bei der Bearbeitung von Eisenwerkstoffen durch schnelle Abkühlung Härtungsprozessen unterliegen und
- der Anforderung in eine, entsprechend der Fokusslage des Lasers, präzise Strahlführung mit geringen Rundlaufabweichungen des Werkzeuges.

Die Ausbildung sprödharter Aufschmelzungen führt bei einer nachfolgenden Finish-Honoperation zu erhöhtem Werkzeugverschleiß. Eine Kompensation der aufgeführten Nachteile kann exemplarisch durch spanabhebende Prozesse, wie dem achsparallelen Drehfräsen durchgeführt werden [Denk12]. Eine weitere Reduktion der Komplexität des Werkzeuges bieten mechanische Umformverfahren, wie das Glattwalzen. Analog dem Rändelverfahren nach DIN 8583-5 besteht die Möglichkeit, die geforderte Geometrie der Oberfläche der Zylinderbohrung über eine Matrize aufzuprägen [DIN 03b]. In

Kombination mit einer entsprechenden Werkzeugkinematik kann die Ausrichtung der Strukturen verändert werden. Die Grundlage bildet eine mit Positivstrukturen versehene Walze, welche aus Hartmetall gefertigt ist und geometrisch definierte Kavitäten auf die Zylinderlauffläche prägt. Da die in der Praxis angewandten Strukturen entsprechend klein dimensioniert sind, müssen diese über ein präzises Schleifverfahren auf die Lauffläche der Walze appliziert werden. Um die Eignung dieses Verfahrens zu verifizieren, wurden Analogieversuche in der Außenbearbeitung von Wellen durchgeführt. Einen vielversprechenden Ansatz bietet die Möglichkeit über dieses Verfahren definierte, keilförmige Strukturen zu applizieren. Im Gegensatz zur Laserstruktur kann ein Walzprofil schräg abfallende Kantengeometrien erzeugen, welche nachweislich den hydrodynamischen Druckaufbau und somit die Gleiteigenschaften begünstigen (Abb. 5.1) [Nanb08]. Deutlich wird dies am Beispiel des sich verengenden Schmierpaltes am Gleitlager. Des Weiteren bietet dieses Konzept des Mikrorändels die Möglichkeit der Reduktion von Fertigungsprozessschritten durch Kombination von Bearbeitungsprozessen, beispielsweise der Substitution der Finish-Honoperation durch eine Glattwalzbearbeitung.

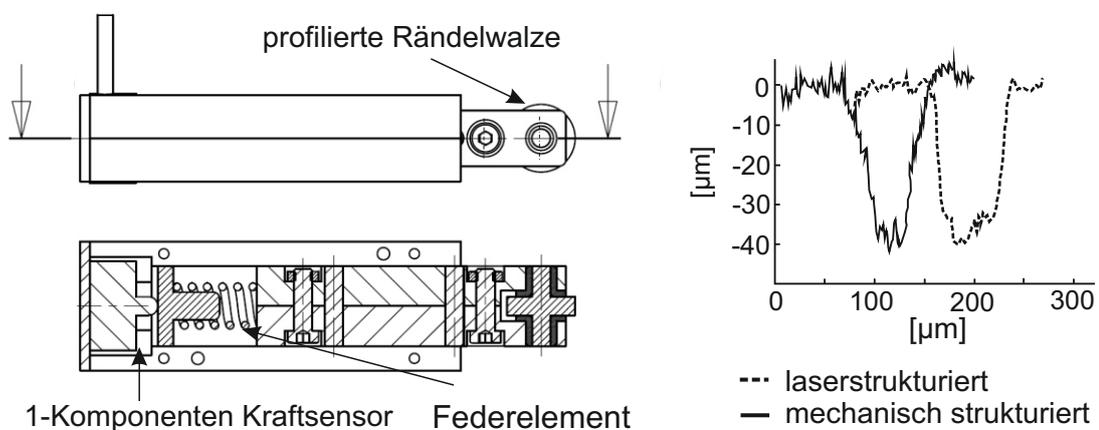


Abbildung 5.1: Links: Ausgangskonzept des Mikrorändelns, Rechts: Vergleich der Profilschnitte der Laser- und Rändelstruktur

Über eine profilierte/strukturierte Hartmetallwalze, welche hydraulisch auf die Werkstückoberfläche gepresst wird, kann ein definiertes Profil zur Schmierstoffspeicherung erzeugt werden (Abb. 5.2) [Karp11]. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeugkonzept mit der integrierten Funktion des Glattwalzens. Neben der aktiven Strukturierung mittels einer profilierten Walze führen zwei axial vorauslaufend, unstrukturierte Walzen eine Glattwalzbearbeitung und somit eine Einebnung der Profilspitzen aus [SA10]. Die

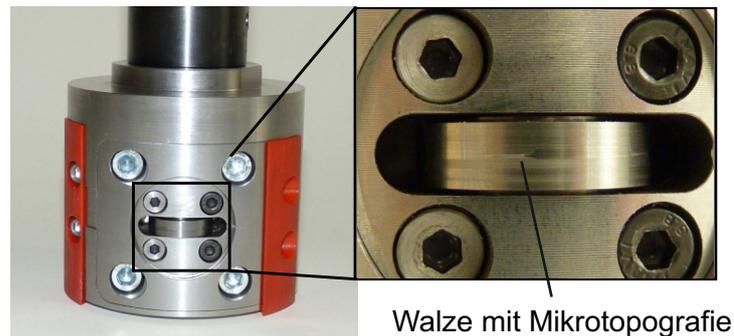


Abbildung 5.2: Mechanisches Werkzeug zur Mikrostrukturierung von Bohrungen

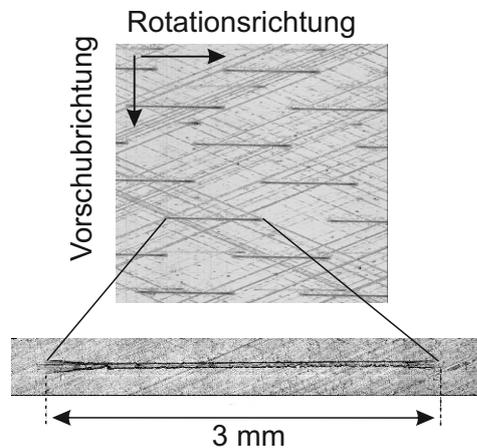


Abbildung 5.3: Mikrostruktur mit leichten Aufwürfen an der einlaufenden Flanke

Abbildung 5.2 zeigt den Bearbeitungskopf mit der Strukturierungswalze, welche parallel zu den unstrukturierten Walzen stufenlos und kraftgebunden zugestellt werden kann. Da die spindelseitige Anbindung des Werkzeuges über eine Gelenk- oder Biegestange realisiert wird, positioniert sich der Werkzeugkörper bei anliegendem Hydraulikdruck zentrisch in der Bohrung. Somit können einerseits Profiltiefe und laterale Profilausdehnung angepasst werden und andererseits radiale Formabweichungen kompensiert werden. Literaturangaben zufolge liegt die Bearbeitungszeit für die Strukturierung eines kompletten Zylinders mittels Laser vom Durchmesser  $d = 80$  mm und der Länge von  $l = 150$  mm im Bereich von  $t = 25$  s [Lens03]. In Voruntersuchungen war es möglich, über ein mechanisches Umformwerkzeug eine Prozesszeit von unter 10 s zu realisieren. Das Arbeitsergebnis entsprechend Abbildung 5.3 weist noch leichte Deformationen an der einlaufenden Flanke auf. Diese sind jedoch durch eine optimierte Walzengeometrie

zu verringern bzw. im Vergleich zu Schmelzaufwürfen nicht gehärtet und somit leicht zu entfernen. Eine weitere Optimierung der Anpresskinematik wurde in der Analyse einer elektromagnetischen Zustellung durchgeführt. Diese bietet Vorteile in der Erzeugung der Gegenkraft zur Fixierung der Walze am Werkzeugumfang und ermöglicht den modularen Einsatz dieses Werkzeuges [BA13].

Das vorgestellte Mikrorändelwerkzeug ermöglicht die Strukturierung tribologisch hoch beanspruchter Bereiche und beeinflusst somit das tribologische Verhalten. Eine erste Validierung dieser hydrodynamischen Effekte kann im SRV-Versuch erfolgen. Die durch das Mikrorändeln erzeugten Strukturen unterscheiden sich primär in deren Struktur-dichte (Abb. 5.5), Tabelle 5.1), da die Strukturgeometrie durch das Werkzeug konstant gehalten wird. Entsprechend der Einstellung der Prozessparameter kann die Struktur-dichte in der Fläche frei gewählt werden (Abb. 5.4).

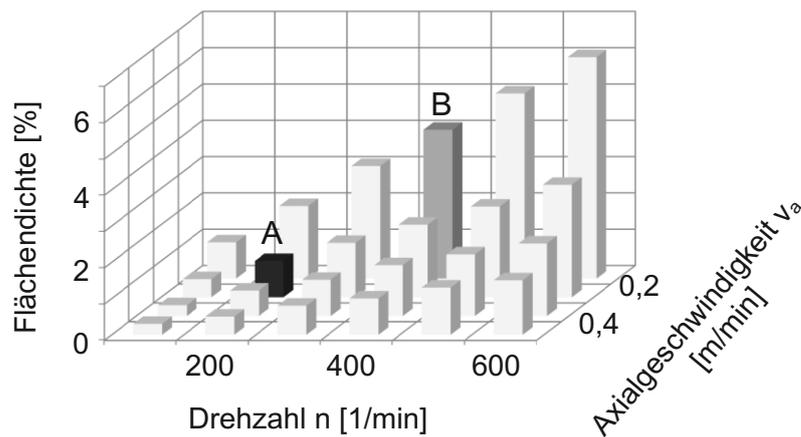


Abbildung 5.4: Flächendichte der Mikrostrukturen dargestellt über Drehzahl und axialer Vorschubgeschwindigkeit

Ein adäquater Prozessdruck wurde im Bereich von  $p = 14 \text{ N/mm}^2$  gewählt, was einer mittleren Flächenpressung  $p_W = 551 \text{ N/mm}^2$  entspricht und empirisch in Vorversuchen ermittelt wurde.

Tabelle 5.1: Struktur-dichte und Prozessparameter des Mikrorändelns

Struktur	Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	$v_{Hub}$ [m/min]	Flächendichte [%]
A	200	0,2	1,0
B	400	0,1	4,1

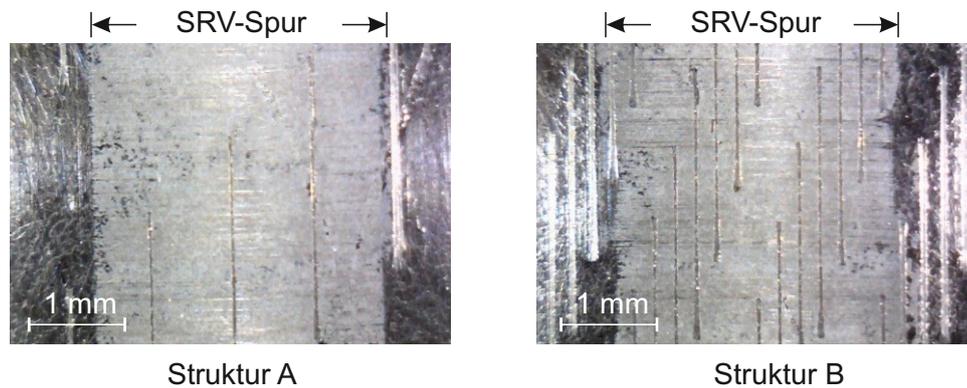


Abbildung 5.5: Tribologisch belastete Mikrorändelstruktur

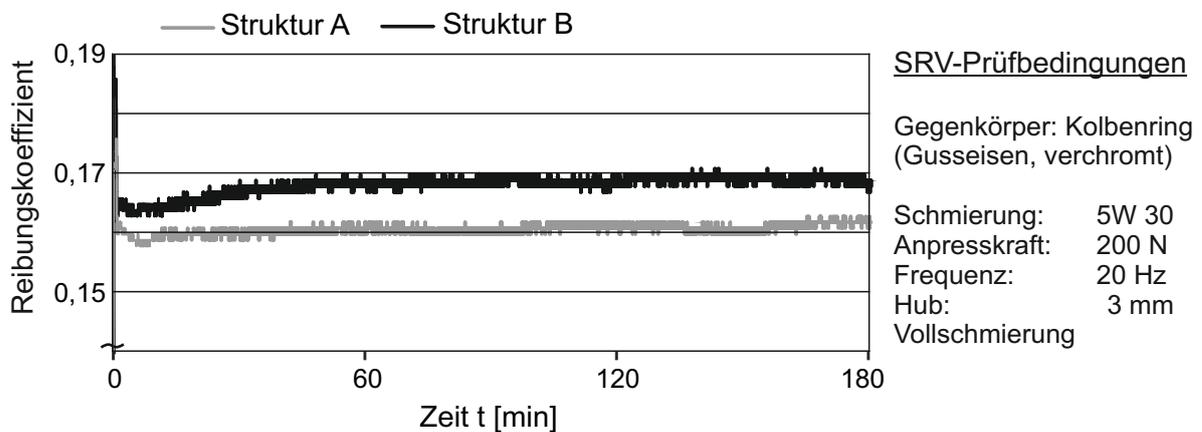


Abbildung 5.6: Ergebnisse der SRV-Prüfung strukturierter Laufflächen

Der zeitliche Verlauf des Reibungskoeffizienten im SRV unterscheidet sich deutlich von allen gehonten Oberflächen (Abb. 4.17) in der primären Einlaufphase. Im durchgeführten Versuchsumfang von ca. 130 SRV-Prüfläufen à mind. 3 Stunden Laufzeit konnte dieser Verlauf der Reibkraft nur bei strukturierten Proben dargestellt werden. Es wird im vorliegenden Fall entsprechend Abbildung 5.6, welcher einer Mittelung aus je 5 SRV-Versuchen entspricht, kein degressiver Reibungsverlauf innerhalb der ersten 60 bis 90 Minuten nach Versuchsbeginn beobachtet. Da aufgrund vergleichsweise hoher Reibkräfte hydrodynamische Effekte vernachlässigbar scheinen, muss die Betrachtung differenzierter erfolgen. Ein Einlauf dieses tribologischen Systems kann folglich nicht konstatiert werden. Inwieweit dieser Verlauf auf die weitere Laufzeit extrapoliert werden kann bleibt offen, da dies mit einer Verschleißgeschwindigkeit korreliert werden muss. Eine mögliche Erklärung kann auf der Struktur und der Strukturdichte basieren.

Diese können als ein Partikelfänger wirken und somit den abrasiven Verschleiß durch losgelöstes Material mindern. Eine hohe Strukturdichte bewirkt eine erhöhte Reibkraft. Bezogen auf die Gesamtfläche hat Struktur B gegenüber A eine um 3% verringerte effektive Kontaktfläche somit erhöhten Kontaktdruck, der in einer 6%igen Zunahme des Reibungskoeffizienten resultiert.

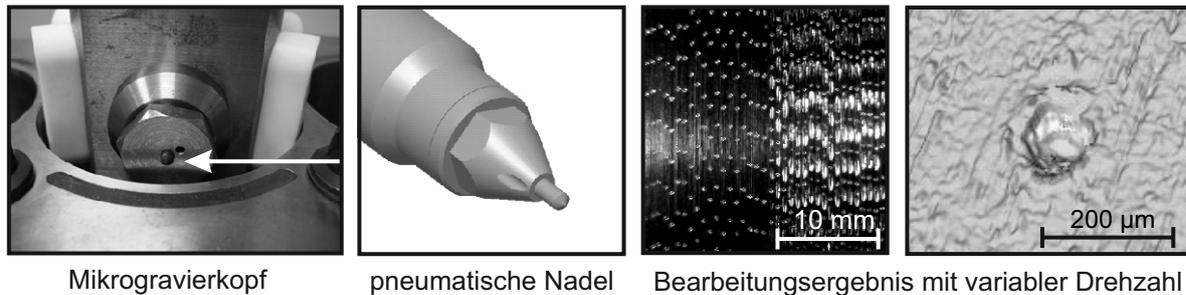


Abbildung 5.7: Mikrogravierwerkzeug und Darstellung entsprechender Arbeitsergebnisse

Als weiteres Strukturierungsverfahren wurde das Mikrogravieren untersucht [SA11]. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeug, welches eine Hartmetallnadel mit definierter Spitzengeometrie pneumatisch auf eine Oberfläche einwirken lässt (Abb. 5.7). Die Eignung dieser Kinematik zur Erzeugung von definierten Kavitäten konnte bisher nur eingeschränkt belegt werden, da die Spitzengeometrie entscheidend für die Ausprägung der Kavitäten und der Aufwürfe ist. Ein stumpfer Winkel reduziert die Höhe der Aufwürfe, da die Fläche des beanspruchten Materialvolumens zunimmt und somit der Gradient des Umformgrades von der Strukturmitte zum Rand abnimmt. Die resultierende Bearbeitungszeit einer Bohrung des Durchmessers  $d = 80 \text{ mm}$  bei einer Strukturierungshöhe (Zylinderhöhe des strukturierten Bereiches) von  $h = 30 \text{ mm}$  beträgt  $t = 19 \text{ s}$  und ergibt sich aus der Frequenz von  $f = 100 \text{ Hz}$  sowie dem Strukturabstand von  $\Delta s = 2 \text{ mm}$ . Im Gegensatz zum Mikrorändelverfahren benötigt dieses Verfahren eine exakte Ausrichtung des Werkzeuges zum Werkstück, da Taumelabweichungen nicht kompensiert werden können.

## 5.2 Mechanische Grenzschichteigenschaften und tribologisches Verhalten in Modellversuchen

Unter der Berücksichtigung des Ansatzes, dass die durch das Endbearbeitungsverfahren hervorgerufenen Werkstoffdeformationen das tribologische Verhalten von Bauteilen beeinflussen, wird eine gezielte Modifikation der inneren Grenzschicht durch die Endbearbeitung angestrebt. Diesbezüglich sind im Vorfeld Betrachtungen zur mechanischen Wirkungsweise von spanenden Fertigungsverfahren mit undefinierter Schneide entsprechend Abschnitt 2.4.1 sinnvoll, welche auch die Zugänglichkeit von Messverfahren auf gehobenen Strukturen validieren. Der primäre Fokus in Betrachtungen zu mechanischen Grenzschichtveränderungen liegt auf der zerstörungsfreien röntgendiffraktometrischen Eigenspannungsanalyse. Wie exemplarisch in KARPUSCHEWSKI gezeigt, lassen sich Veränderungen der Zerspanleistung respektive Schleifleistung  $P_c$  in der Ausprägung oberflächennaher Eigenspannungszustände wiederfinden, wobei sich die Schleifleistung  $P_c$  als Produkt aus Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und Tangentialkraft  $F_t$  ergibt [Karp01]. Bei konstanten Bedingungen ergibt sich somit, wie in Abschnitt 4.3.2 dargelegt, eine direkte Proportionalität von Tangentialkraft  $F_t$ , der entsprechenden Schleifleistung  $P_c$  und der Korngröße. In wie weit dies auf Prozessbedingungen des Honens herabskaliert werden kann, zeigt die nachfolgende Untersuchung. Proben aus GJL250 wurden einer Planschleifbearbeitung mit Schleifscheiben aus SiC geringer Korngröße entsprechend Abbildung 5.8 unterzogen und im Anschluss röntgendiffraktometrisch analysiert. In Betrachtung der azimutalen Eigenspannungszustände aus Abbildung 5.8 muss demnach bei geringen Schnitttiefen  $a_p$  und Tangentialkraftkomponenten  $F_t$  infolge geringer Korngrößen eine Abweichung der von KARPUSCHEWSKI beschriebenen Spannungsverläufe konstatiert werden [Karp01]. Obwohl die Korngrößen der Schleifmittel signifikante Unterschiede aufweisen und alle weiteren Bearbeitungsparameter als konstant zu betrachten sind, kann kein signifikanter Zusammenhang zum Eigenspannungszustand ermittelt werden. Der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Eindringcharakteristik der Röntgenstrahlung kann in Betrachtung der arithmetischen Mittenrauwerte relativiert werden. Es zeigt sich jedoch, dass die gemessenen Schubspannungskomponenten parallel zur Bearbeitungsrichtung erhöht sind, was wiederum die Erkenntnisse aus Abschnitt 2.2.1 bestätigt. Somit scheinen folglich die Änderungen in der Lateralkraftkomponente zu gering, um Auswirkungen auf den Eigenspannungszustand zu bewirken. Diese Erkenntnis wird im weiteren Versuchsspektrum noch intensiver beleuchtet.

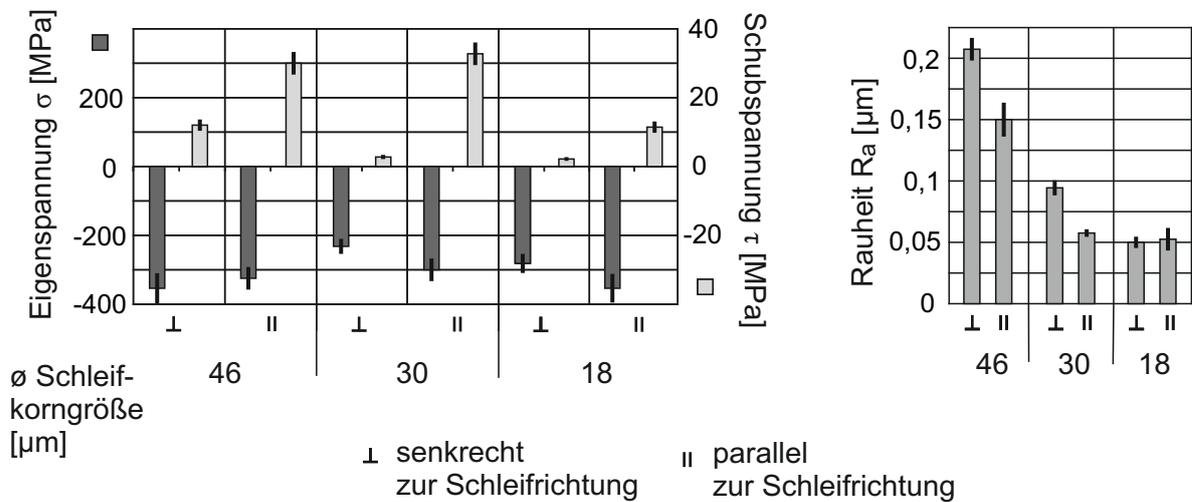


Abbildung 5.8: Oberflächennahe Eigenspannungen plangeschliffener Proben

Im Anschluss erfolgt eine gezielte Veränderung der SRV-Proben, welche aus Zylinderkurbelgehäusen entnommen wurden. Auf Basis einer Plateauhonung bzw. Gleithonung wurden die Proben mit nachfolgenden Verfahren behandelt:

- *Bürsten mit Iosem Korn und Rosshaarborsten* (Abschnitt 4.1.3)

- Maschine: Bürstmaschine MB-M der Firma Gerber,
- Planpolieren mit rotierendem Bürstkopf in tangentialer Richtung zur Zylinderachse der konkaven SRV-Probe,
- Polierzeit  $t = 5$  min.

Ziel: Reduktion der Schleifleistung und somit der Deformation,

- *Elektrolytisches Ätzen*

- Elektrolytisches Polieren,
- Elektrolyt: A-2 Fa. Struers;  $U = 60 \text{ V/cm}^2$ ;  $I = 20 \text{ A/cm}^2$ ,

- Bearbeitungszeit:  $t = 4 \times 15$  s.

Ziel: chemischer Werkstoffabtrag zur Freilegung unverformten Gefüges,

- *Tieftemperatur-Nasseisstrahlen (TNS)* [Karp13a]

- Luftdüsendurchmesser: 4 mm,
- Eistemperatur:  $-140$  °C,
- Strahldüsendurchmesser: 10 mm,
- Strahldruck:  $p = 1,5$  N/mm<sup>2</sup>,
- Bearbeitungsdauer:  $t = 80$  s.

Ziel: Untersuchungen zum Einfluss tiefkalter Strahlmedien auf mechanische Gefügeveränderungen,

- *thermische Behandlung/Spannungsarmglühen*

- Hochwärmen: Aufheizgeschwindigkeit 70-100 K/h ,
- Halten der Glüh Temperatur von  $550$  °C für  $t = 2$  h,
- Ofenabkühlung: Abkühlgeschwindigkeit 20 - 50 K/h bis auf  $250$  °C.

Ziel: Erzeugung eines „neutralen“ Gefüges mit sehr geringen Eigenspannungen durch Spannungsarmglühen.

Somit soll die Beeinflussung oberflächennaher Bereiche und Topografien durch SRV-Prüfungen dargelegt werden. Prinzipiell stellt sich ein objektiver Zusammenhang von niedrigen Druckeigenspannungen und hohem Reibungskoeffizienten dar (Abb. 5.9). Durch ein Spannungsarmglühen werden nahezu alle werkstoffinternen Gefügeverspannungen ohne signifikante Veränderung der topografischen Struktur abgebaut. Es bildet sich eine dünne Oxidschicht, welche zu Beginn der tribologischen Versuche rasch entfernt wird. Somit zeigt dieser Versuch sehr präzise den Einfluss der mechanischen Gefügeeigenschaften auf die Ausprägung der Reibkraft.

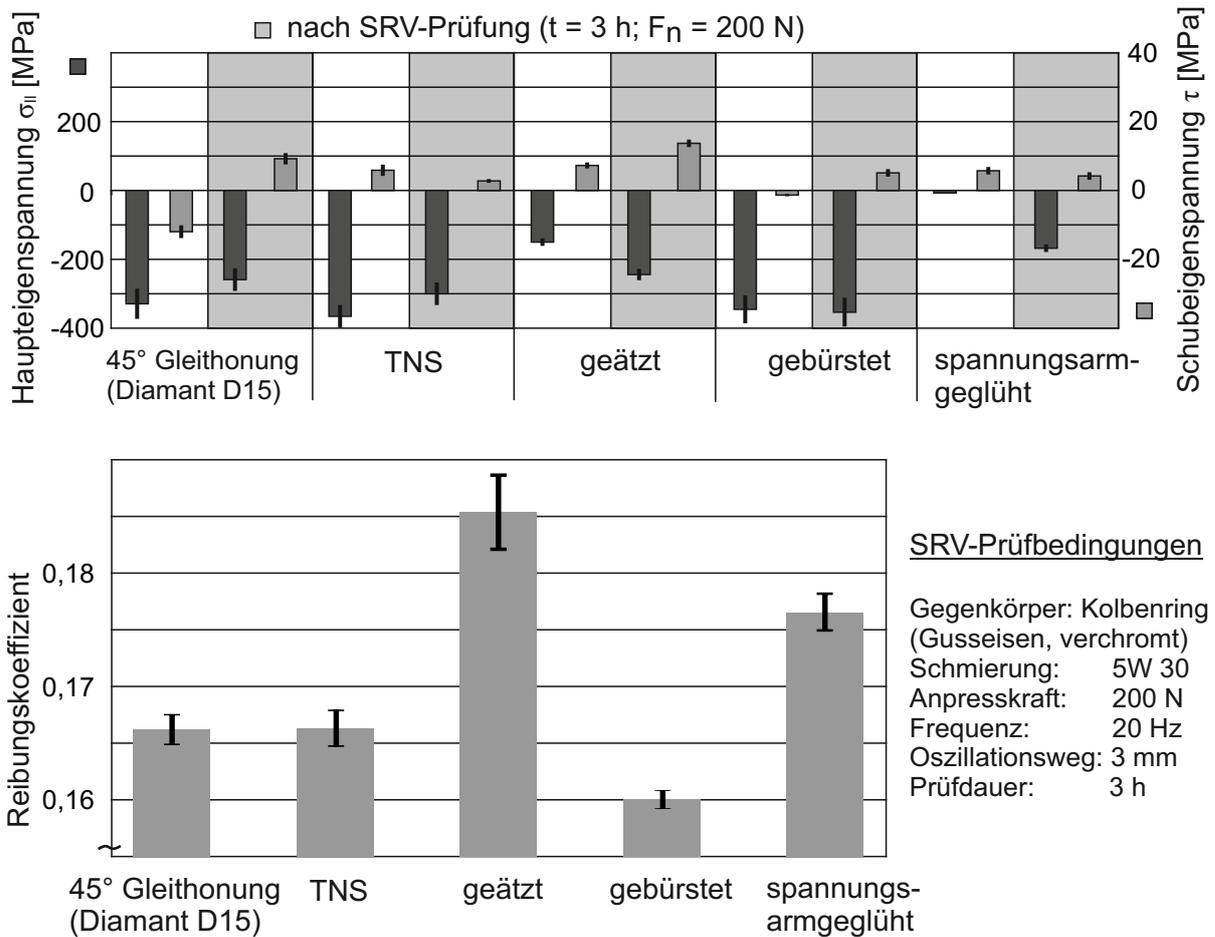


Abbildung 5.9: Oberflächennahe Eigenspannungen und Reibungskoeffizienten im SRV nach unterschiedlichen Präparationen

Daraus erwächst die Erkenntnis, dass ein niedriges Eigenspannungsniveau bzw. niedrige Druckeigenspannungen eine erhöhte Reibkraft bedingen. So beschreibt FLEISCHER die Festkörperreibungsmechanismen primär als Deformation und Adhäsion [Flei76]:

$$W_{fs} = W_{fs,def} + W_{fs,adh}. \quad (5.1)$$

Mit der Reduktion des Eigenspannungsniveaus und somit der mechanischen Gitterverspannung geht eine Reduktion der Härte einher, welche zum Anstieg der Deformationskomponente der Reibarbeit  $W_{fs}$  führt. Über die Änderung der Adhäsionskomponente können infolge des Spannungsarmglühens nur vage Aussagen getroffen werden. Mit der Annahme der Passivierung durch Bildung einer Oxidschicht wird prinzipiell der adhäsive Aufbau molekularer Bindungen von Grund- und Gegenkörper vermindert.

Da die Oxidschichten jedoch mechanischen Belastungen nicht standhalten, sind diese für das tribologische Verhalten im vorliegenden Versuch primär nicht relevant. Es zeigt sich vielmehr, dass durch einen Bürstprozess Druckeigenspannungen in das Werkstück eingebracht werden, welche in Kombination mit topografischen Änderungen eine positive Wirkung auf das tribologische Verhalten ausüben. Die durch das Tieftemperatur-Nasseisstrahlen (TNS) umgesetzte kinetische und thermische Energie scheint zur Erzeugung struktureller Veränderungen zu gering. Dieses, am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung entwickelte Verfahren, basiert auf hochharten und tiefkalten Eispartikeln, welche pneumatisch beschleunigt werden. Somit dominieren bezüglich der mechanischen Wirkung theoretisch zwei Mechanismen: die Verfestigung des Gefüges durch die Erzeugung von Druckeigenspannungen infolge der kinetischen Energie des Strahlmediums und die Steigerung der Druckeigenspannungen durch die Behinderung der thermischen Dehnung bei Erwärmung des Werkstückes nach der Bearbeitung. Diese Effekte wurden jedoch nur marginal wirksam.

### 5.3 Modifikationen der Endbearbeitung und das tribologische Verhalten (Versuchsgruppe 1)

Im nächsten Schritt werden explizit Endbearbeitungsverfahren für Zylinderlaufflächen auf deren Auswirkungen auf das tribologische Verhalten der Kolbenring/Zylinderpaarung untersucht. Die Anwendung des Bürst- und Glattwalzverfahrens bildet die Randbereiche der Prozessparameter Schnittkraft und Anpresskraft ab. So erzeugen diese Verfahren eine sehr geringe bzw. hohe Tangentialkraft- und Axialkraftkomponente respektive Schnittkräfte bei minimalen bzw. maximalen Normalkräften/Anpresskräften. Die Versuchsmatrix beinhaltet die Variation der letzten Bearbeitungsstufe hinsichtlich der hervorgerufenen Schnittkraft. So werden zwei unterschiedliche Schneidstoffe beim Langhubhonen, das Bürstverfahren mit losem Korn (Abschnitt 4.1.3) und das Glattwalzen (Abschnitt 4.1.4) als umformendes Verfahren untersucht. Wie in Abbildung 1.2 ersichtlich wird, kommt dem Honen mit keramischen Schneidstoffen bei niedrigen Schnittkräften eine große Bedeutung zu. Die einzelnen Verfahren können hinsichtlich der erzeugten Deformationen näherungsweise wie folgt beschrieben werden:

Honen (D2 bzw. K2)	- laterale Deformationen ↑, normale Deformationen ↓
Glattwalzen	- laterale Deformationen ↑, normale Deformationen ↑
Bürsten	- laterale Deformationen ↓, normale Deformationen ↓

Daraus ergibt sich im ersten Schritt folgende Versuchsmatrix (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Matrix der Prozessparameter der Endbearbeitung

	<b>Schneidstoff</b>	<b>Bindung</b>	<b>Korngröße</b>	<b>Anpressdruck</b>	<b>Kontaktzeit (≅Hübe)</b>
Honen D1	Diamant	metallisch	15 $\mu\text{m}$	0,15 N/mm <sup>2</sup>	50
Honen D2	Diamant	metallisch	15 $\mu\text{m}$	1,6 N/mm <sup>2</sup>	10
Honen K1	SiC	keramisch	10 $\mu\text{m}$	0,21 N/mm <sup>2</sup>	20
Honen K2	SiC	keramisch	10 $\mu\text{m}$	1,5 N/mm <sup>2</sup>	10
Bürsten	Diamant	(Rosshaar)	< 15 $\mu\text{m}$	-	3500
Glattwalzen	(Hartmetall)	-	-	21 kN/cm <sup>2</sup>	200

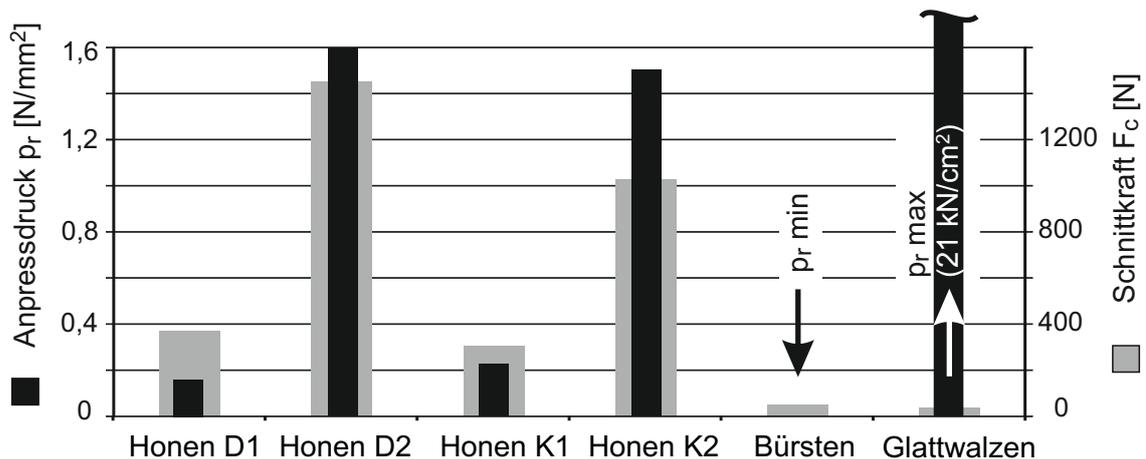


Abbildung 5.10: Korrelation zwischen Schnittkraft und Anpressdruck beim Honen mit hydraulischer Aufweitung

Den Untersuchungen liegt eine durch das Vorhonen mit Diamantkörnern der Größe 107  $\mu\text{m}$  bearbeitete Buchse des Werkstoffes GJL250 zu Grunde. Als Schneidstoffe der Honleisten wurden SiC-Keramik SC7 800 der Firma Atlantic und metallisch gebundener Diamant vom Schneidstoff D15/118/X33/75 der Firma Nagel verwendet. Die Anzahl der Kontaktzyklen beim Honen entspricht der durch die Werkzeuggeometrie bestimmten Werkstückrauheit in einem definierten Toleranzfeld. Beim Bürsten und Glattwalzen liegt der Fokus auf der Reduzierung von Spitzen- und Kernrautiefe. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang das Messergebnis des Anpressdrucks der Schneidleisten. Dieser ist im Vergleich zu diversen Publikationen der Vergangenheit, wie FLORES

und FRITZ ET AL., verhältnismäßig gering. Die Abweichungen können aus veränderten Schneidleistengeometrien und Prozessparametern im industriellen Umfeld resultieren [Flor92, Frit08]. Die Messung der Schnittkraft, bestehend aus tangentialer und axialer Komponente, verdeutlicht in Relation zum Anpressdruck nochmals die Unterschiede in der mechanischen Prozesswirkung der einzelnen Verfahren (Abb. 5.10). Beide Honverfahren (K und D) weisen eine theoretische Pressfläche von 2560 mm<sup>2</sup> auf. Die leichten Abweichungen im Anpressdruck  $p_r$  bei identischem Hydraulikdruck resultieren aus dem mechanischen Aufbau der Werkzeuge. Bei vergleichbarer Schnitttiefe rufen keramische Schneidstoffe mit leicht geringeren Korngrößen und deutlich unterschiedlichem Aufbau im Vergleich zu metallisch gebundenem Diamant eine geringere Schnittkraft hervor und führen somit bei gleichen Prozessparametern zu kleineren Deformationen im Werkstoff. Dies wird anhand einer detaillierten Schneidstoffbetrachtung (Abb. 4.5) mit der Ausprägung der Abrasivmedien und des Binders ersichtlich. Die im Vergleich kleinsten Einflüsse auf oberflächennahe Strukturen ruft das Bürstverfahren bei minimaler Anpress- und Schnittkraft hervor. Das Glattwalzen wird durch eine im Vergleich sehr hohe Anpresskraft bei sehr kleiner Kraftkomponente in Umfangsrichtung charakterisiert. Jedoch führt die Abwälzbewegung des Werkzeuges zu lateralen Deformationen in Bearbeitungsrichtung. Die topografischen Eigenschaften der erzeugten Strukturen differieren. Daher sind Analysen von genormten Oberflächenkennwerten aufgrund der Anisotropie der Strukturen schwierig (Abb.5.11). Neben den Zielstrukturen treten auch kleinere Ausbrüche und Poren zum Vorschein. Diese sind dem mehrphasigen Werkstoff immanent. Im Vergleich generieren Keramikschneidleisten die geringste Oberflächenrauheit und somit eine große reale Pressfläche. Ein Einfluss der Anpresskraft beim Honen auf die Werkstücktopografie wird deutlich. Der Werkstoffabtrag beim gewählten Bürstverfahren ist sehr ungleichmäßig und somit die tragende Struktur sehr ungleichförmig. Dies resultiert aus einer wechselnden Zusammensetzung der Abrasivmedien und zeigt die Bedeutung von Kühlschmierstoffen zum Abtransport von Spänen auf. Die Prozesskraft beim Glattwalzen ist für eine topografische Anpassung des Profils an die Zielstruktur zu gering. Eine Steigerung der Anpresskraft führt entsprechend im Vorfeld durchgeführter Untersuchungen zu Schädigungen im Werkstoff [Karp12].

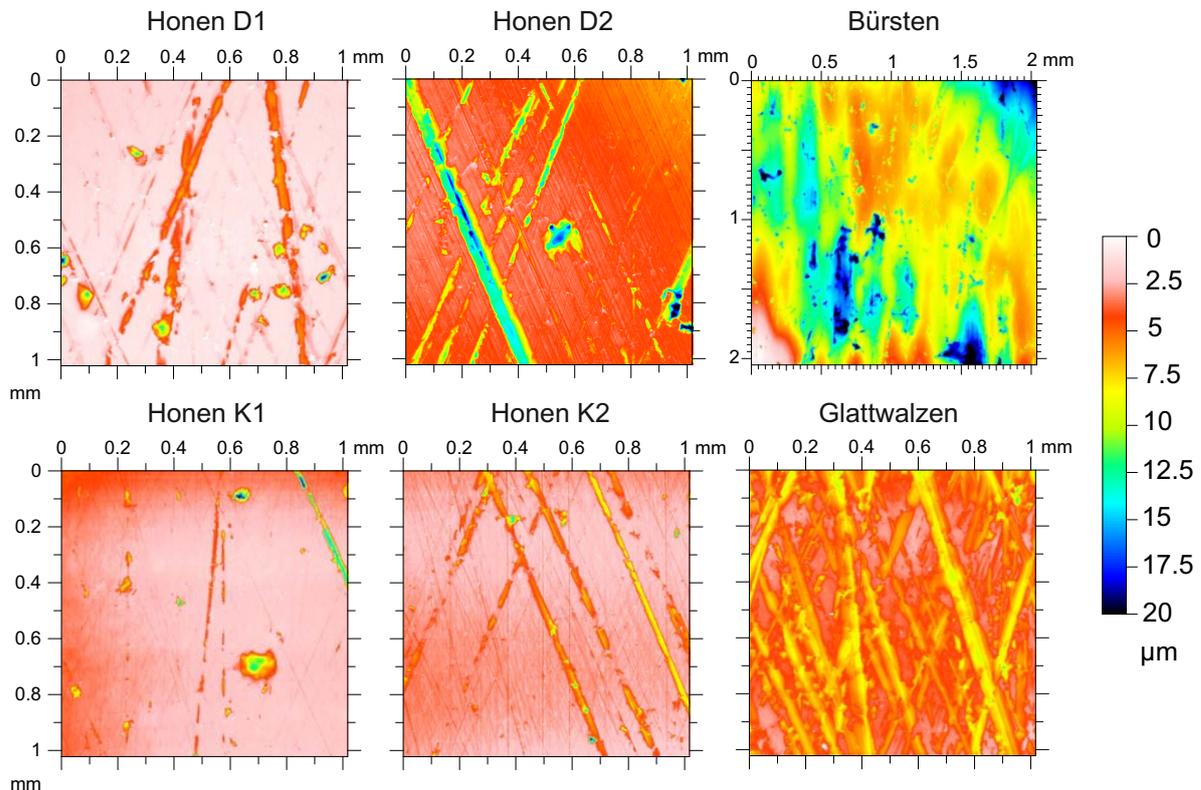


Abbildung 5.11: Taktill gemessene 3D Oberflächenprofile

### 5.3.1 Tribologische Bewertung

Zur Analyse der tribologischen Eigenschaften der gefertigten Zylinderlaufflächen sind Untersuchungen in einem Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer in erster Näherung sinnvoll. Unter identischen Versuchsbedingungen und einer Stichprobenanzahl von 5 Segmenten pro Finishverfahren wird ersichtlich, dass die Oberflächenrauheit nicht unmittelbar einen Einfluss auf den Reibungskoeffizienten ausübt (Abb. 5.12). Die keramisch gehonten Segmente weisen bei reduzierter Rauheit jedoch einen leicht geringeren Reibwert auf. Ein Rückschluss auf die reale Pressfläche in Bezug auf Reibung konnte nicht nachgewiesen werden. Eine exemplarische Verringerung des lokalen Anpressdrucks steht einer Erhöhung der adhäsiven und abrasiven Komponente der Reibkraft gegenüber. Somit rühren die reibungsmindernden Effekte aus einer Grenzschichtbildung im Misch- und Grenzreibungsgebiet her. Diese werden somit durch eine geringe Schnittkraft während der Endbearbeitung positiv unterstützt. Die tribologischen Auswirkungen

der Bürstbearbeitung sollten differenziert betrachtet werden, da die Makrostruktur einen Einfluss ausübt.

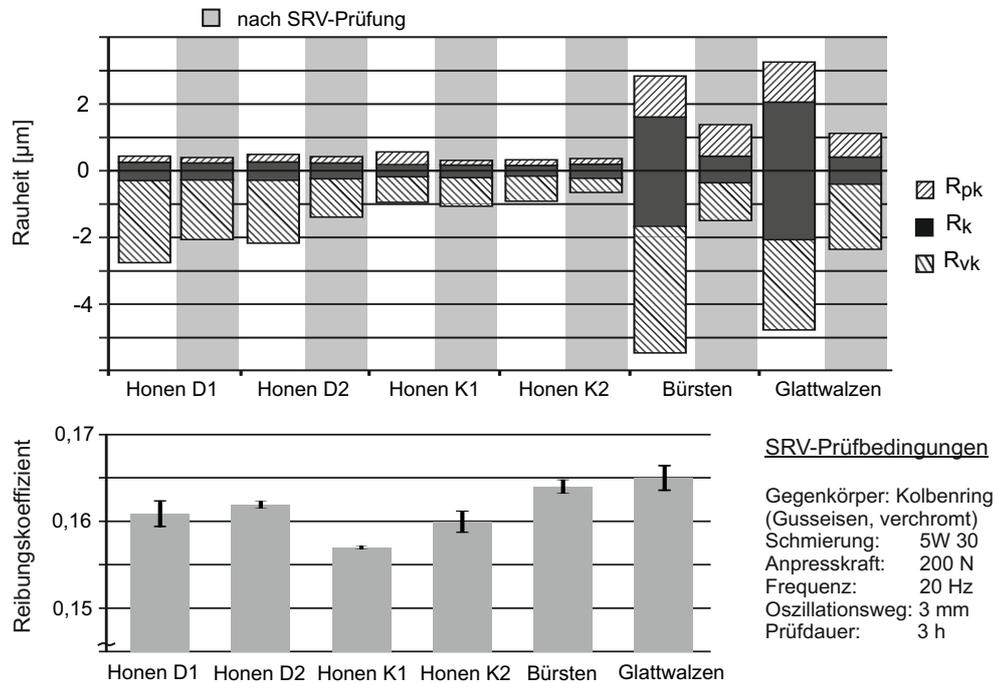


Abbildung 5.12: Ergebnisse der SRV-Prüfung

### 5.3.2 Bewertung der mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften der inneren Grenzschichten werden Betrachtungen von azimutalen Eigenspannungszuständen durchgeführt (Abb. 5.13). Relevant für oberflächennahe Veränderungen sind Schubspannungen und vollständige laterale Hauptspannungsrichtungen und Intensitäten. Diese können Indikatoren für die mechanische Beanspruchung oberflächennaher Bereiche sein und somit in direkter Wechselwirkung mit Bildungsmechanismen der äußeren Grenzschicht stehen. Weitere Analysemethoden können Nano- und Mikrohärteprüfungen sowie chemische Analysen darstellen. Die Analyse der Eigenspannungen im Anschluss an die Finishbearbeitung sowie nach tribologischer Belastung zeigt keine eindeutige Korrelation zwischen geringen Prozesskräften und geringen Deformationen der Grenzschicht. Abbildung 5.13 zeigt die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  in Bezug auf die Bearbeitungsrichtungen nach dem jeweiligen Bearbeitungsprozess und im Anschluss an die tribologische Belastung.

Die gebürsteten Proben weisen zwar die geringsten Hauptspannungen auf, jedoch bei deutlich erhöhten Schubspannungen, was wiederum den Betrag der Vergleichsspannung erhöht. Im Vergleich der Honprozesse scheint die Grenzschicht nach der Bearbeitung mit Diamantleisten trotz höherer Schnittkräfte weniger stark deformiert. Eine mögliche Erklärung liegt im Aufbau der Schneidleiste. Im Vergleich zum Diamant weist die Keramik eine höhere Schneidkorndichte und höhere Bindungshärte auf, wodurch der Werkstoff in der Fläche höher belastet wird. Die geringeren Schnittkräfte der Keramikleisten lassen im Gegenzug eine geringere Schnitttiefe vermuten bei erhöhter friktiver Flächenbelastung.

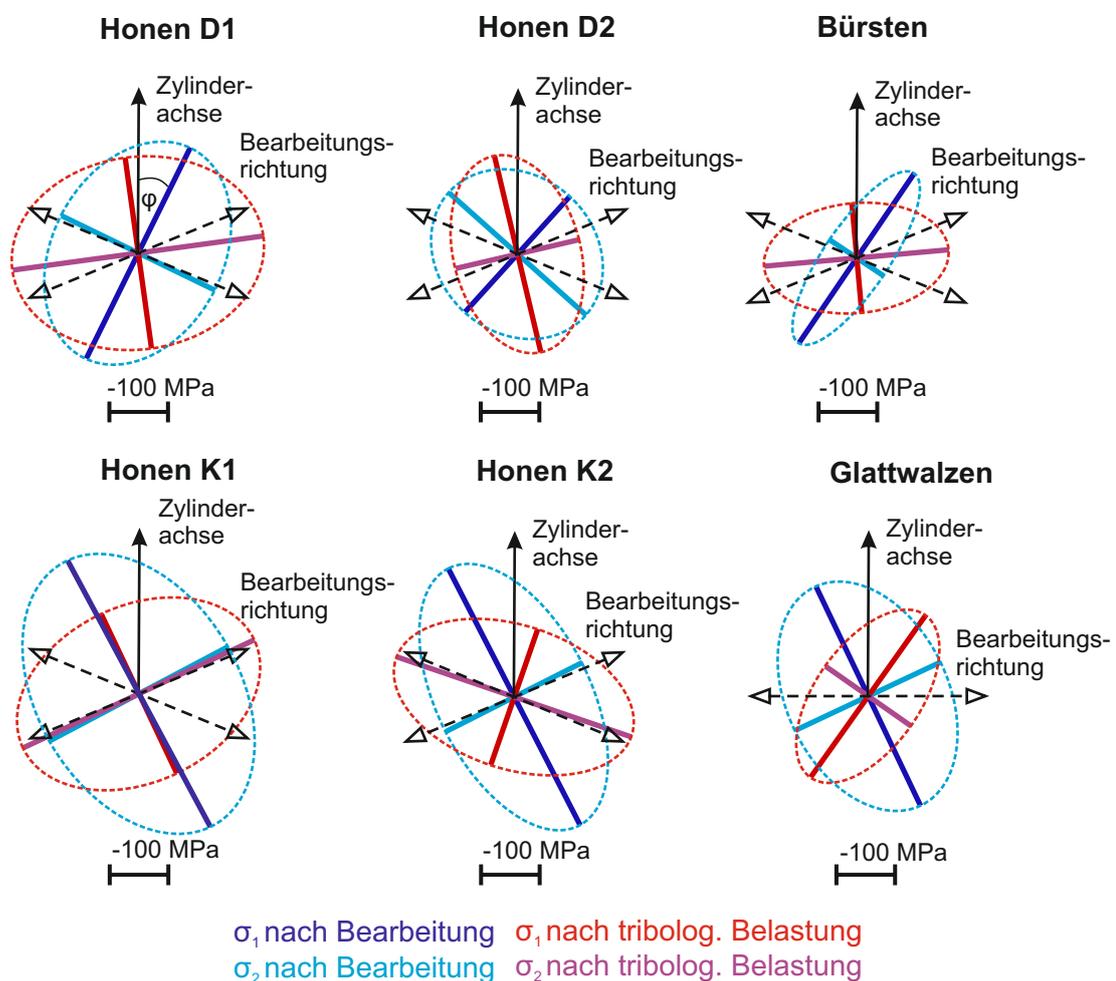


Abbildung 5.13: Laterale Hauptspannungen nach der Bearbeitung und nach der tribologischen Belastung

Da die Eigenspannungsinformationen röntgenographisch anhand des  $\sin^2\Psi$ -Verfahrens ermittelt und somit in einer Tiefe von  $5,6\ \mu\text{m}$  entsprechend der Eindringtiefe der  $\text{Co} - K\alpha$  Strahlung detektiert wurden, sind oberflächennormale Eigenspannungsgradienten wahrscheinlich. Diese werden im Nachgang mittels abtragenden Verfahren für größere Informationstiefen ermittelt (Abb. 5.14). Es wird deutlich, dass die Identifikation des Eigenspannungsmaximums in Form der Vergleichsspannung nicht eindeutig zu realisieren zu sein scheint. Unter Berücksichtigung der statischen Betriebsbedingungen (lediglich Hertz'sche Pressung) des tribologischen Systems müsste entsprechend Abbildung A.1 in Anlage A.1 das werkstoffinterne Spannungsmaximum während der äußeren Belastung durch den Kolbenring in einer Tiefe  $z = 60\ \mu\text{m}$  liegen. Entsprechend der Abbildung 2.5 bewegt sich jedoch das Spannungsmaximum mit steigender Scherbeanspruchung zur Werkstoffoberfläche und somit befindet sich die Messtiefe von ca.  $30\ \mu\text{m}$  in diesem fokussierten Bereich:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}. \quad (5.2)$$

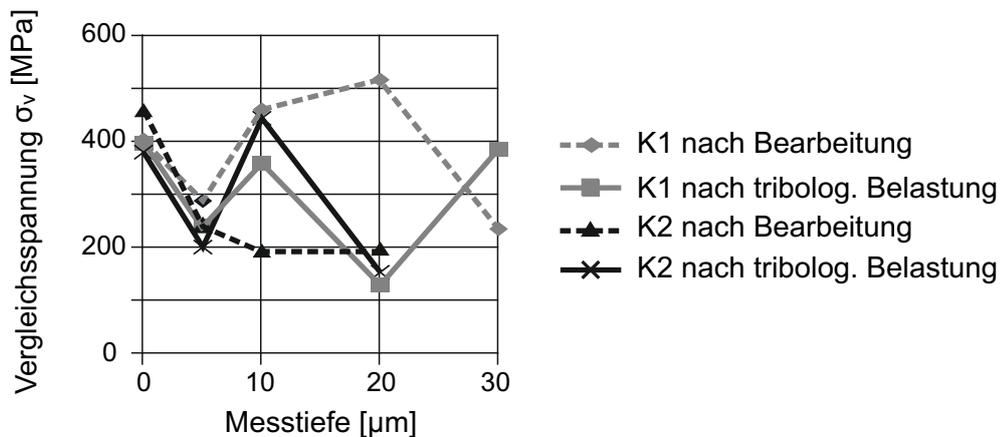


Abbildung 5.14: Tiefenprofil der Vergleichsspannungen nach der Bearbeitung und nach der tribologischen Belastung der keramisch gehonten Oberfläche

Bei Betrachtung der Auswirkungen der tribologischen Belastung auf die Martenshärte wird deutlich, dass sich nach dieser die Messwerte unabhängig von dem Ausgangszustand in einem Bereich von  $HM = 2000 \pm 150\ \text{N/mm}^2$  nivellieren (Abb. 5.15). Der initiale Wert variiert hingegen stark je nach Art der Endbearbeitung, lässt aber keine Korrelation zu den Schnittkräften zu. Die Unterschiede bei den gehonten Oberflächen lassen sich ausschließlich auf die Disparität der Schneidmittel zurückführen. Die Verwendung von Keramikhonleisten induziert dabei scheinbar eine Verfestigung der

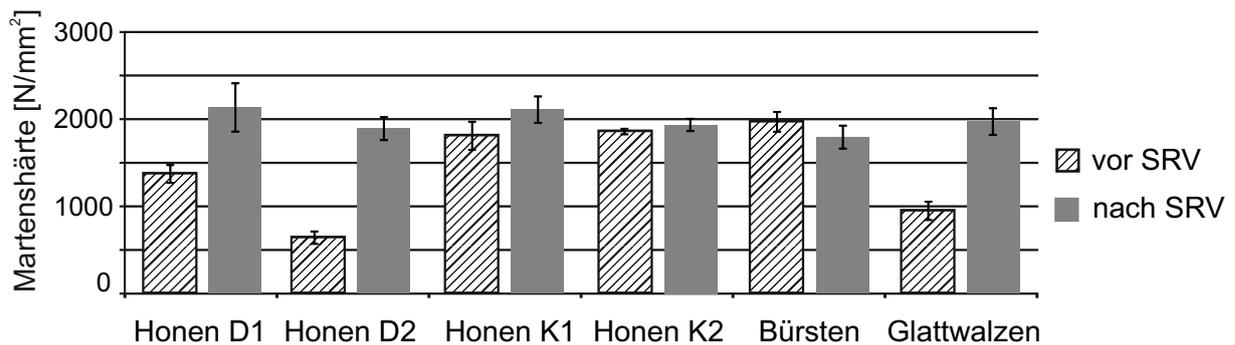


Abbildung 5.15: Martenshärte vor und nach dem tribologischen Test

Randzone, was im Vergleich einen positiven Effekt auf das tribologische Verhalten hat. Mikrohärtmessungen lassen jedoch nur begrenzt Informationen über die Festigkeit der Grenzschicht zu, da die Indentationstiefe bei oberflächennormaler Indentation weit oberhalb der Grenzschichtdicke liegt und somit der Informationsgehalt zur Festigkeit der Grenzschicht im Grundgefüge untergeht (Abschnitt 4.4.2). Nanoindentationsuntersuchungen bieten hingegen den Vorteil einer geringeren Indentationstiefe im Bereich weniger Nanometer. Hier kommt jedoch die im Vergleich raue Oberflächentopografie nachteilig zum Tragen, was die Eindringcharakteristik des geometrisch definierten Prüfkörpers (Berkovich-Diamant) negativ beeinflusst.

## 5.4 Erweiterung der fertigungstechnischen Variationen (Versuchsgruppe 2)

Aus den in Abschnitt 5.3.2 dargelegten Erkenntnissen lassen sich weitere Untersuchungsschwerpunkte definieren. Einerseits rückt der Fokus neben dem Einsatz von keramischen Schneidleisten näher in Richtung der Konditionierung mittels modifiziertem Honwerkzeug (Abschnitt 4.1.5) und zum anderen sollten die Eigenschaften weiterer Bürstverfahren überprüft werden (Abschnitt 4.1.3). Als Referenz dienen neben den mit R bezeichneten Diamant-Fluidstrahl-Glätthonprozess der Serienfertigung weiterhin keramisch (Schneidstoff: SC7 400 der Firma Atlantic) und mit Diamant (Schneidstoff: D15/118/X33/75 der Firma Nagel) gehonte Oberflächen. Zur besseren Vergleichbarkeit, trotz unterschiedlicher Morphologie der Schneidstoffe, wurde eine Schneidkorngröße beider Schneidstoffe von ca. 15  $\mu\text{m}$  gewählt. In einer anschließenden Präparati-

on durch die Verfahren Bürsten und Konditionieren erfolgt die maßgebliche Anpassung der Grenzschichtcharakteristik (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Matrix der Prozessparameter der Endbearbeitung der Versuchsreihe 2

Bez.	Honverfahren Schneidstoff	Anpressdruck [N/mm <sup>2</sup> ]	Präparation	Spezifikation
R	Diamant	-	-	Fluidstrahlhonung
D1	Diamant	0,15	-	-
D2	Diamant	1,6	-	-
D2-KoMo	Diamant	1,6	Konditionierung	Motorenöl
K1	Keramik	0,21	-	-
K2	Keramik	1,5	-	-
K1-BüSt	Keramik	0,21	Bürsten	Stahldraht
K1-BüAn	Keramik	0,21	Bürsten	Anderlon
K1-KoHo	Keramik	0,21	Konditionierung	Honöl
K1-KoMo	Keramik	0,21	Konditionierung	Motorenöl

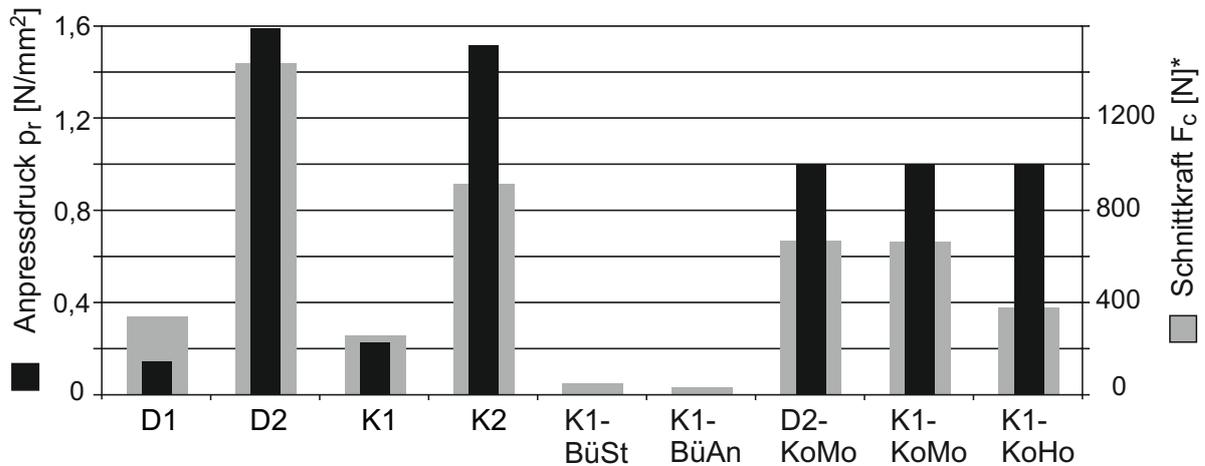
Eine weitere Variationsmöglichkeit beim Einsatz eines Konditionierwerkzeuges bildet der Schmierstoff. Dieser kann dementsprechend stark auf die Funktionalitäten des Motorenöls angepasst werden. Zum Nachweis des dissipationsbedingten Eintrags chemischer Elemente in oberflächennahe Werkstoffbereiche ist Honöl aufgrund der geringen Additivierung ungeeignet. Bei der Verwendung von Motorenöl kann stöchiometrisch auf die Additive Schwefel, Kalzium, Zink und Phosphor fokussiert werden (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Additive des Motoren- und Honöls in [mg/kg]

	Kalzium	Zink	Phosphor	Schwefel
Motorenöl	1320	800	700	2020
Honöl	4	13	160	28

In Betrachtung der Prozesskräfte (Abb. 5.16) äußert sich die niedrigere Viskosität des Honöles gegenüber dem Motorenöl bei Raumtemperatur in einer deutlich reduzierten Reibkraft. Interessanter Weise sinkt die Schnittkraft bei Verwendung einer keramischen Schneidleiste mit leicht erhöhter Korngröße (800 mesh → 400 mesh) im Vergleich zur Abbildung 5.10.

Nach elektrochemischer Präparation wurden die Oberflächen im SRV-Prüfstand entsprechend Abbildung 5.17 untersucht. Zur besseren Vergleichbarkeit von je 6 Proben



\* Schnittkraft bzw. Tangentialkraft bei Belastung unter einem Honwinkel von  $45^\circ$   
 Hubgeschwindigkeit  $v_H = 20$  m/min  
 Drehzahl  $n = 190$  U/min

Abbildung 5.16: Korrelation zwischen Schnittkraft und Anpressdruck beim Honen in der Versuchsgruppe 2

der einzelnen Variationen erfolgt eine Mittelung der Messwerte pro Variation und eine Regression der Mittelwerte durch eine logarithmisch-lineare Funktion. Diese ist im Gegensatz zu einem Polynom besser zur Extrapolation geeignet. Somit kann einerseits der Betrag und zeitliche Verlauf der Reibung und zum anderen deren Steigung zum Ende des Versuchszeitraumes bewertet werden. Analog zu den Versuchen in Abschnitt 5.3 weisen im SRV-Versuch die keramisch gehonten Oberflächen auch bei leicht erhöhter Korngröße den geringsten Reibungskoeffizienten ohne signifikant progressiven Verlauf am Ende der Versuchszeit auf. Trotz des sehr sensitiven Versuchsaufbaues im SRV zeigen die Ergebnisse aus Abbildung 5.17 eine gewisse Ähnlichkeit zu Erkenntnissen aus dem vorangegangenen Versuchsspektrum. Die konditionierten Proben weisen einen vergleichbaren, leicht progressiven Verlauf des Reibungskoeffizienten auf. Somit kann ein erwarteter Unterschied in der chemischen Grenzschichtcharakteristik nicht im Reibverhalten verdeutlicht werden. Im Vergleich zur keramisch gehonten Grundstruktur kann das Bürsten keine signifikanten Änderungen im tribologischen Verhalten bewirken.

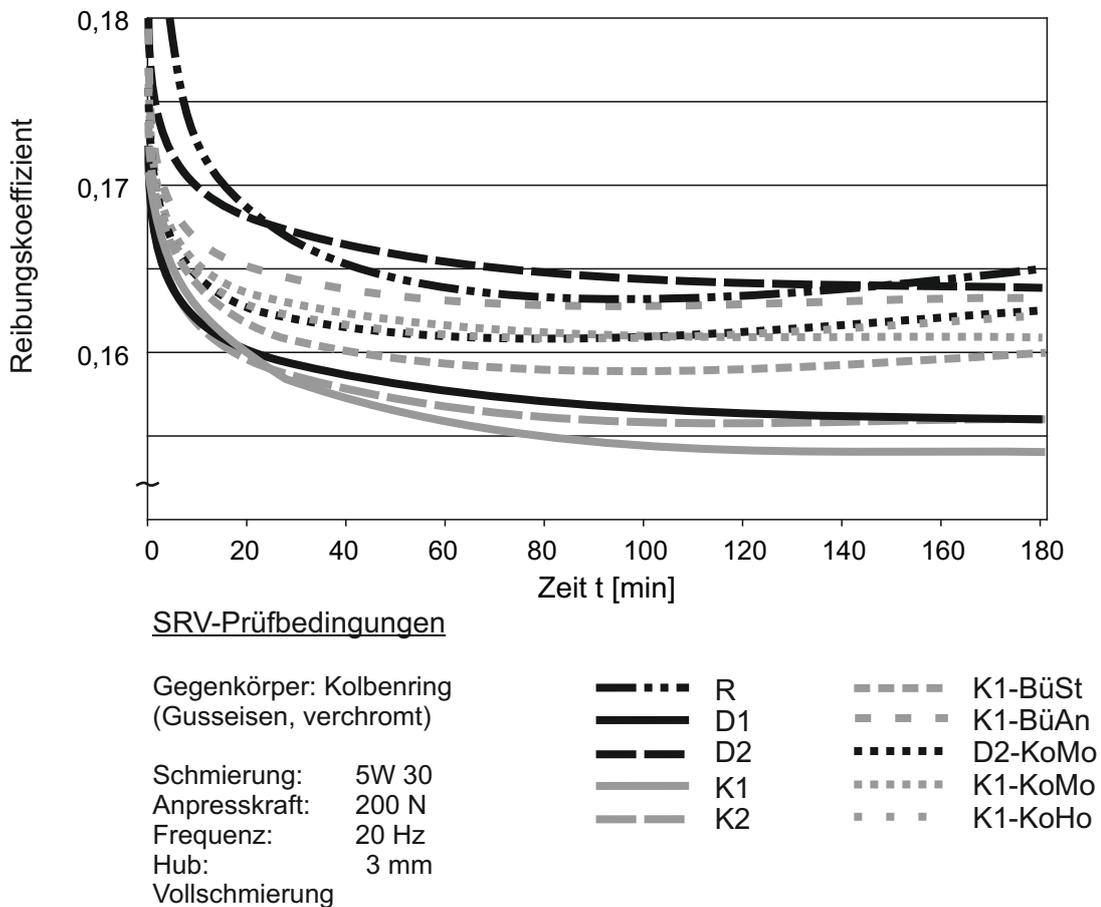


Abbildung 5.17: Verlauf des Reibungskoeffizienten der Versuchsgruppe 2

### 5.4.1 Oberflächenstrukturanalyse

Die Abbildung 5.18 zeigt die Ausprägung der Oberflächen nach den einzelnen Endbearbeitungsprozessen. Die taktil im Schrittabstand von  $1\ \mu\text{m}$  erfassten Daten wurden lediglich mit einem Polynom des Grades 2 gefiltert, um ausreichend Informationen zum realen Profil abbilden zu können. Im Vergleich zur Keramikhonung erscheint die Honstruktur der Diamanthonung bei vergleichbaren Bearbeitungsparametern unregelmäßiger. Der Honwinkel der D1-Honung variiert sehr stark. Eine Erhöhung des Anpressdrucks bewirkt bei der Diamanthonung im Gegensatz zur Keramikhonung eine Reduktion der Strukturtiefe, was auch in der Analyse der Traganteilkennwerte ersichtlich wird (Abb. 5.19). Die konditionierten Oberflächen weisen eine vergleichsweise zerklüftete Oberfläche mit Riefen aus abgelöstem Material auf. Die Spitzenhöhe des

Profils konnte durch Kontakt mit den Konditionierleisten nicht reduziert werden, sodass die Tragstruktur negativ beeinflusst wurde, was sich auch auf das tribologische Verhalten auswirkt (Vergleich Abb. 5.17). Das vereinzelt Auftreten von Mikroausbrüchen nach dem Bürsten oder Konditionieren muss näher analysiert werden (Abb. 5.21).

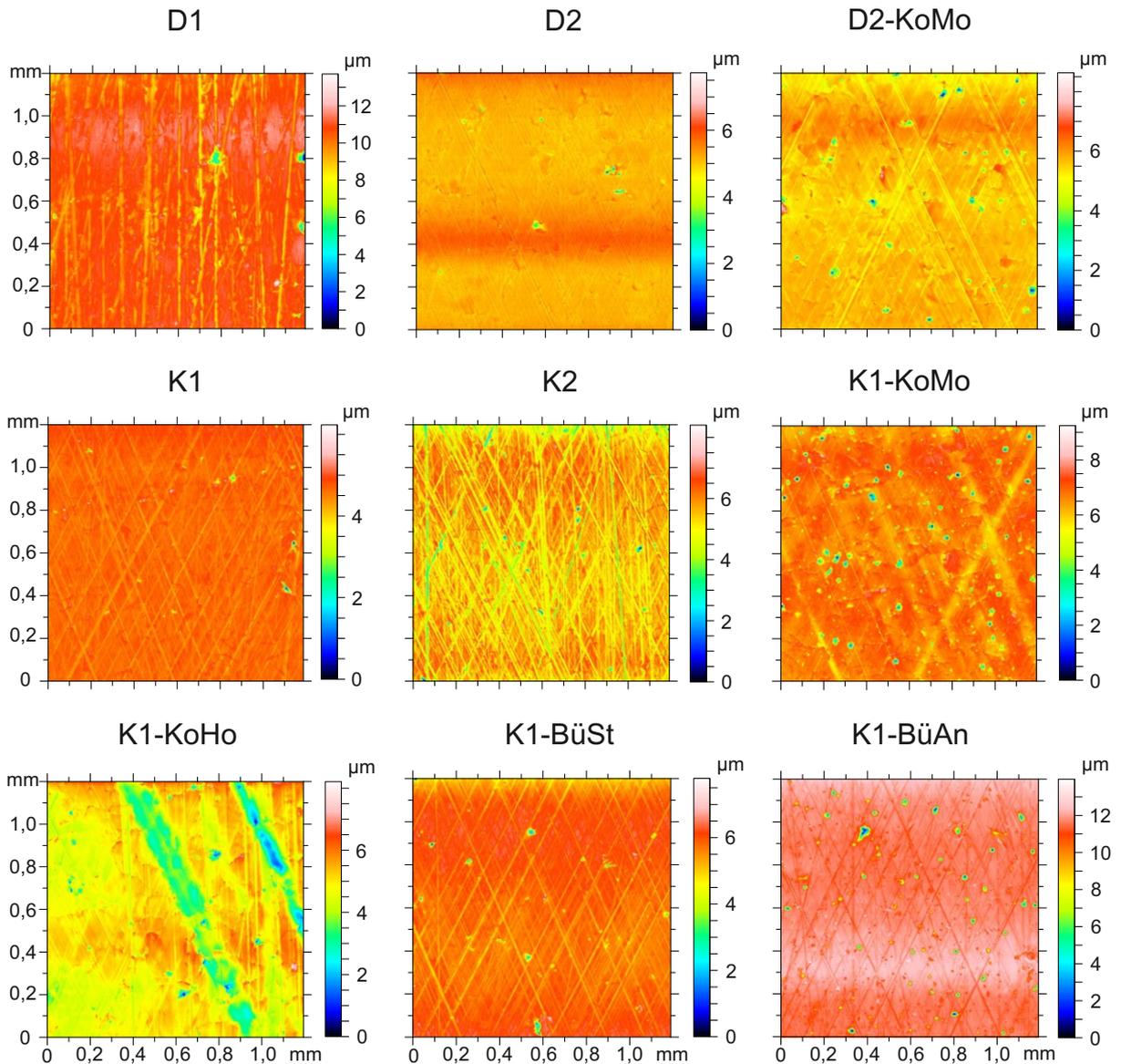


Abbildung 5.18: Taktill gemessene Oberflächen nach der Bearbeitung der Versuchsgruppe 2

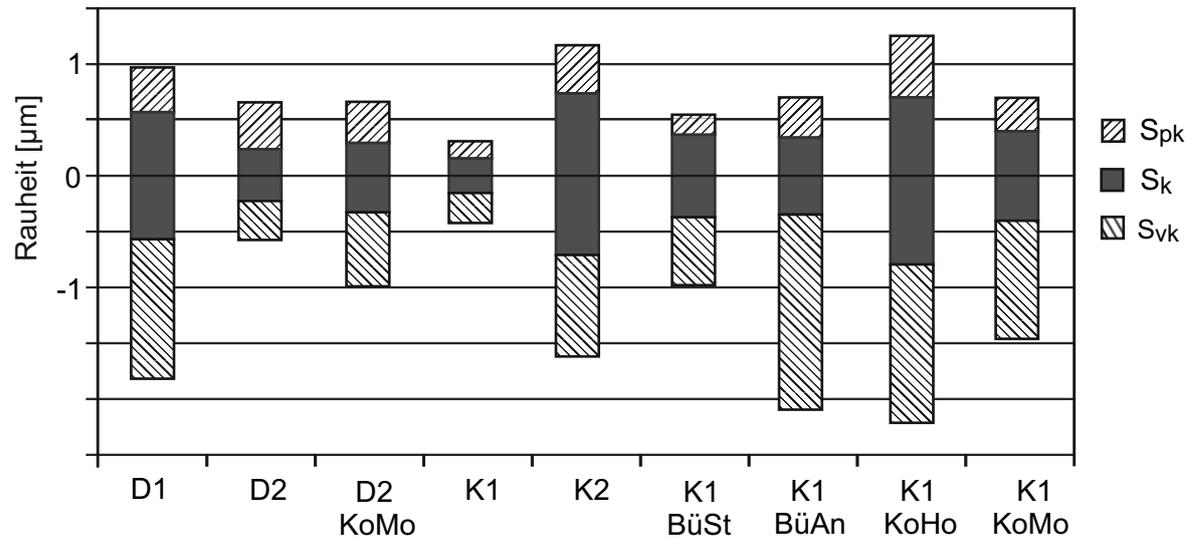


Abbildung 5.19: 3D Traganteilkennwerte der taktil gemessenen Oberflächen nach der Bearbeitung der Versuchsgruppe 2

In Betrachtung der Elektronenbilder aus Abbildung 5.20 zeigen sich die aus den Topografiemessungen ersichtlichen Unterschiede in der Oberflächengestalt im Detail. So zeigt die keramisch gehonte Oberfläche K1 ein sehr sauber geschnittenes Profil ohne große plastische Deformationen und Schuppenbildung auf. Bei Erhöhung der Anpresskraft (Probe K2 Abb. 5.20) steigt der Anteil an plastisch verformtem Material im Bereich der Profilsitzen. Dies führt zur Bildung von Verschuppungen, welche als sogenannter Blechmantel sich über die Profilliefen schieben. Die Diamanthonung D2 wird im vorliegenden Fall durch ein vergleichsweise glattes Profil mit plastisch deformierten Spitzenbereichen charakterisiert. Welche Mechanismen in diesem Fall zu dieser atypischen Oberflächenprägung führten kann nicht eindeutig bestimmt werden. Es kann vermutet werden, dass eine Veränderung am Schneidstoff stattgefunden hat, welche den Bereich der Schneidstoffselbstschärfung tangierte.

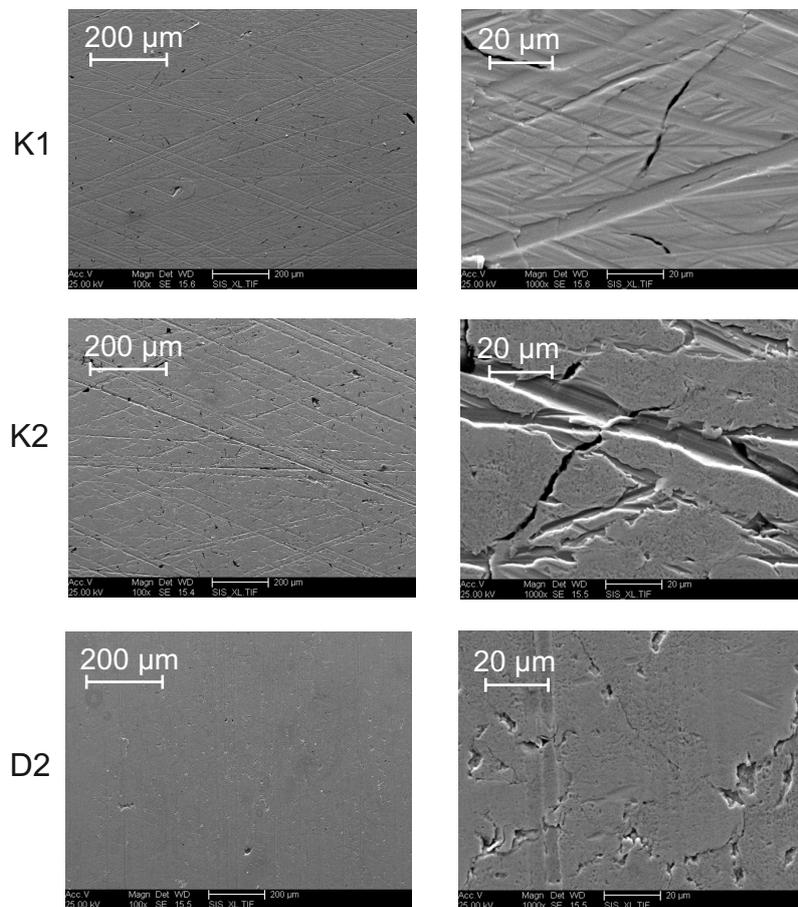


Abbildung 5.20: Sekundärelektronenbilder ausgewählter Topografien

Zur Analyse der aus Abbildung 5.18 ersichtlichen Mikroirregularitäten der konditionierten Proben wurden Sekundär- und Rückstreuelektronenaufnahmen der Oberfläche angefertigt (Abb. 5.21). Diese zeigen eine Art oxidische Struktur mit überlagerten Anhaftungen aus einem Material höherer Dichte. Die zackige Kontur der Strukturgrenzen lässt auf einen korrosiven Vorgang schließen. Die EDX-Analyse in diesen Bereichen zeigt vermehrt Sauerstoff und einen Anteil an Schwefel und vereinzelt Zink, welcher dem KSS zugeordnet werden kann. Im Vergleich der Konditionierverfahren sind diese Mikroirregularitäten bei der Verwendung von Motorenöl kleiner und feiner verteilt. Ein ursächlicher Zusammenhang könnte ebenso in der Verwendung unterschiedlicher Dielektrika (Abschnitt 4.2.1) und/ oder unterschiedlichem Probenhandling zu finden sein. So wurde im Zuge der Optimierung des Präparationsprozesses auf eine Maschine

neuerer Technologie zurückgegriffen, welche mit deionisiertem Wasser arbeitete. In der Analyse der Untersuchungen muss dies berücksichtigt werden.

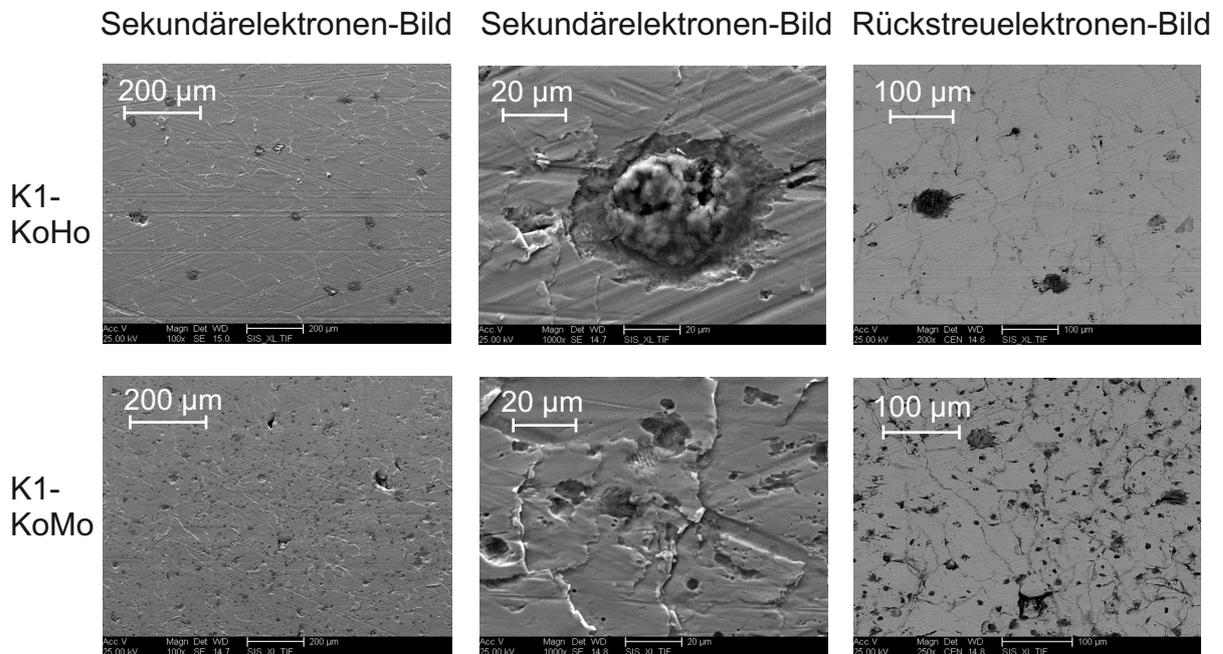


Abbildung 5.21: Sekundärelektronen- und Rückstreuелеktronenbilder ausgewählter Topografien

#### 5.4.2 Chemische Analyse der Grenzschicht

Zur chemischen Analyse der Grenzschichten wurde aufgrund der lateralen Inhomogenitäten der untersuchten Oberflächen vorzugsweise die Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) angewendet, welche eine integrale Elementkonzentration in die Werkstofftiefe liefert. Um eine Korrelation der unterschiedlich endbearbeiteten Oberflächen zum Realprozess (vgl. Abschnitt 4.4) herzustellen, wurden neben den Variationen der Versuchsgruppe 2 auch Proben mit unterschiedlicher Einlaufbelastung sowie fluidstrahlglättgehonte Oberflächen betrachtet. Die Elementkonzentration von Additiven in den Grenzschichten der Zylinder der befeuert betriebenen 4-Zylinder-Motoren nach dem Nennleistungseinlauf ist im oberflächennahen Bereich im Vergleich zum Einlauf mit stufenförmig steigender Leistung größer (Abb. 5.22). Dies korreliert mit der geringeren Verschleißrate des Nennleistungseinlaufs entsprechend Abbildung 4.3. Nach BER-

LET und MACH scheint neben der Elementkonzentration auch der Gradient der Elementverteilung in die Tiefe einen Einfluss auf das tribologische Verhalten auszuüben [Mach03, Berl09]. Eine dünne tribologisch wirksame Grenzschicht mit hoher Additivkonzentration ist wesentlich für eine niedrige Verschleißgeschwindigkeit.

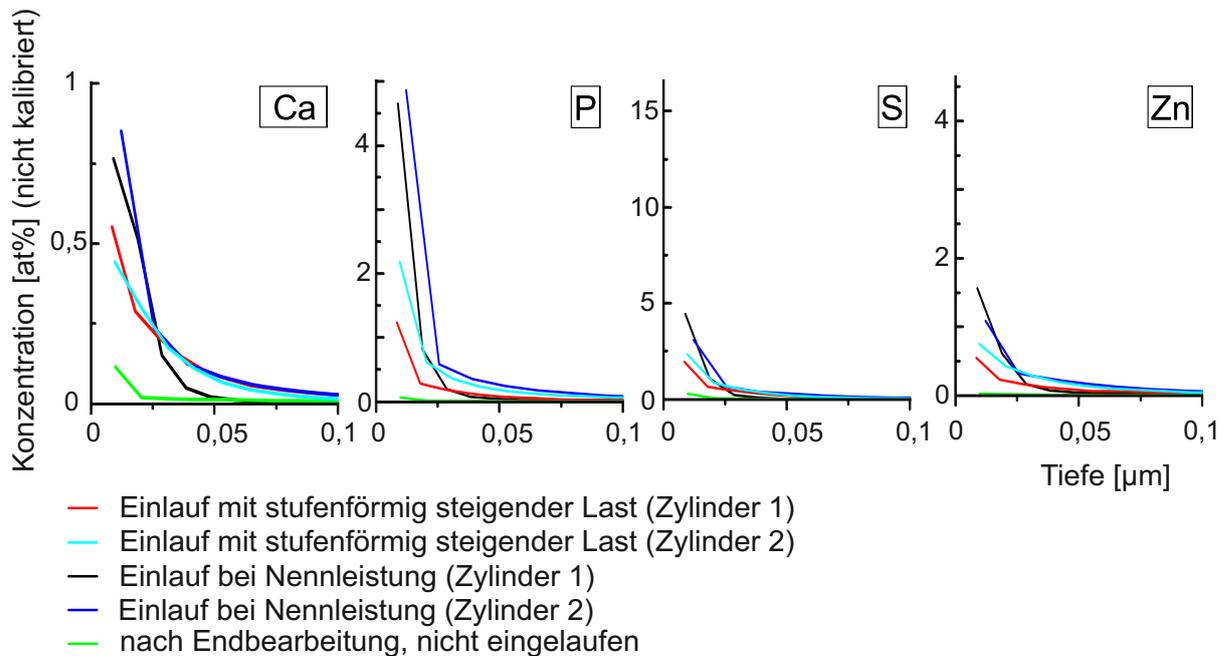


Abbildung 5.22: SIMS-Tiefenprofil im Zylinderzwickel nach unterschiedlichen Einlaufprogrammen und im endbearbeiteten Zustand

Die Grenzschichtdicke scheint somit als ein Indikator zur Validierung der Verschleißbeständigkeit von tribotechnischen Systemen sinnvoll. Als wesentliches Maß zur Bestimmung der Grenzschichtdicke kann die Durchmischungstiefe von Sauerstoff herangezogen werden (Abb. 5.23). Es wird deutlich, dass nach der tribologischen Belastung im SRV-Tribometer Grenzschichtdicken im Bereich um 200 nm vorliegen.

In Abbildung 5.24 sind die Additivelementkonzentrationen spezieller Bearbeitungsvariationen in Kombination mit SRV-Versuchen dargestellt. Auffällig ist (analog Abbildung 5.23), dass die Grenzschichtdicken wesentlich größer sind als die im befeuerten Motor. Dies kann entsprechend Abschnitt 2.1.3 primär auf die Reaktionszeit zurückgeführt werden. Neben einer konstant minimalen Schmierstofftemperatur von 130 °C und einem ausreichend großen Schmierstoffvolumen sind die lokalen Kontaktzeiten und somit Reaktionszeiten im SRV-Tribometer größer. Dies zeigt wiederum, dass der Näherungs- bzw. Abstraktionsgrad von Tribosystemen nicht beliebig hoch gewählt wer-

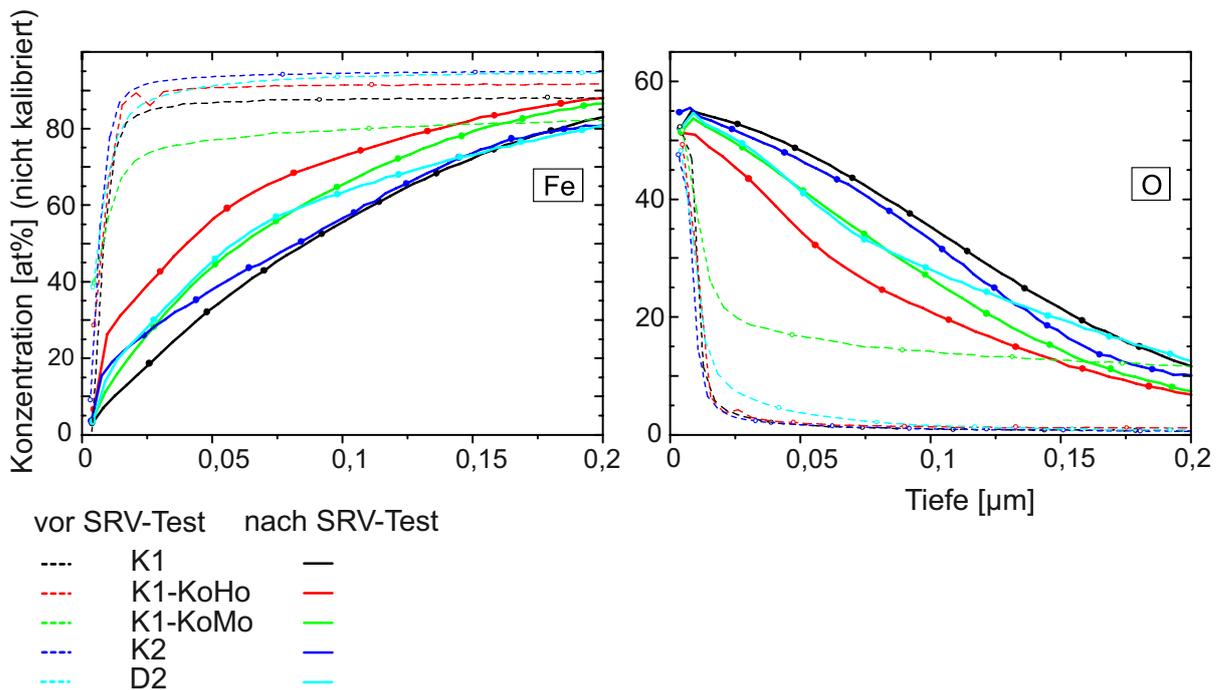


Abbildung 5.23: SIMS-Tiefenprofile und Grenzschichtdicke nach unterschiedlicher Endbearbeitung

den kann und dementsprechend die SRV-Prüfung aus chemischer Sicht weit vom realen Tribosystem Kolbenring/Zylinder entfernt ist.

Bei den Konzentrationsverteilungen ähnelt die der konditionierten Probe K1-KoHo denen aus dem befeuerten Motor am meisten. Bei K1 führen der geringe Anpressdruck beim Honen und der relativ geringe Reibleistungseintrag im SRV-Versuch zu dicken Grenzschichten mit hohen Additivelementkonzentrationen. Höhere Anpressdrücke beim Diamantschneidstoff (D2) sowie der additive Prozess in K1-KoHo in der Endbearbeitung erhöhen die in die Oberfläche eingebrachte Reibleistung und führen somit beim SRV-Versuch zu geringeren Grenzschichtdicken. Zudem nähern sich in beiden Fällen die Gradienten der Additivelementkonzentrationen in die Grenzschichttiefe denen im befeuerten Motor nach dem Einlauf an (vgl. Konzentrationsverläufe in Abbildung 5.22). Das Tribosystem mit der keramisch gehonten Probe K1 zeigt zwar die geringste Reibung (Abb. 5.17), könnte aber wegen der großen Abweichungen zum optimalen chemischen Grenzschichtaufbau beim Nennleistungseinlauf (Abb. 5.22) eine geringere Verschleißfestigkeit aufweisen. Demgegenüber ist es wahrscheinlich, dass die konditionierte Probe K1-KoHo wegen der größeren Ähnlichkeit der Grenzschicht zur op-

timalen Grenzschicht eine bessere Verschleißfestigkeit besitzt. An dieser Stelle sind Verschleißuntersuchungen zwingend notwendig. Grundsätzlich muss aus den vorliegenden Ergebnissen geschlussfolgert werden, dass ein Einlauf, speziell in chemischer Natur, nicht durch ein Endbearbeitungsverfahren substituiert werden kann. Dies wird in der geringen Grenzschichtdicke, auch nach initialer tribologischer Belastung durch ein Konditionierwerkzeug mit Motorenöl (K1-KoMo), deutlich. Eine Vorkonditionierung der Oberfläche in Abstimmung mit der initialen Belastung des Tribosystems ist jedoch möglich.

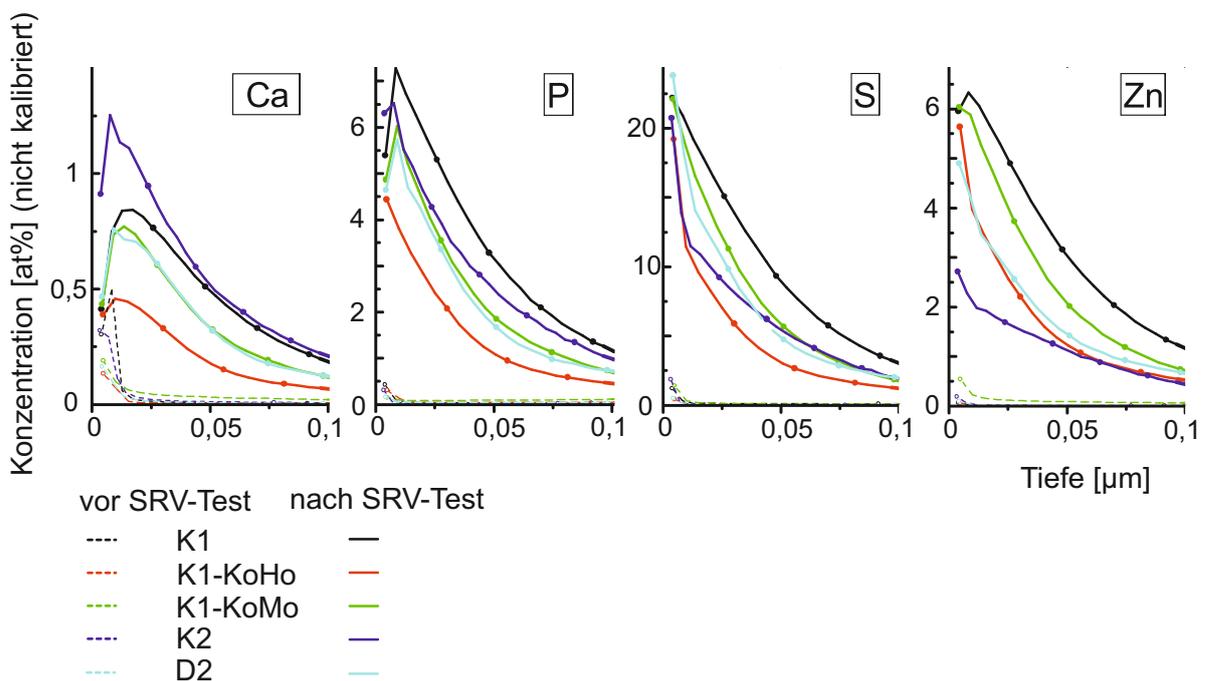


Abbildung 5.24: SIMS-Tiefenprofil nach unterschiedlicher Endbearbeitung

Eine großflächigere, laterale Betrachtung der Oberfläche im Bereich von ca. 700 x 400 µm liefert die XPS-Analyse. Diese zeigt speziell bei den Variationen K2 und K1-KoHo, welche mit hoher Anpresskraft keramisch gehont bzw. mit Honöl konditioniert wurden, im Vergleich eine deutlich geringere Additivkonzentration nach der tribologischen Belastung auf. Dies kann wiederum auf die laterale Inhomogenität der Probenoberfläche zurückgeführt werden, was prinzipiell, auch in Betrachtung der SIMS-Analysen, eine Unterscheidung der Einzelproben schwierig gestaltet.

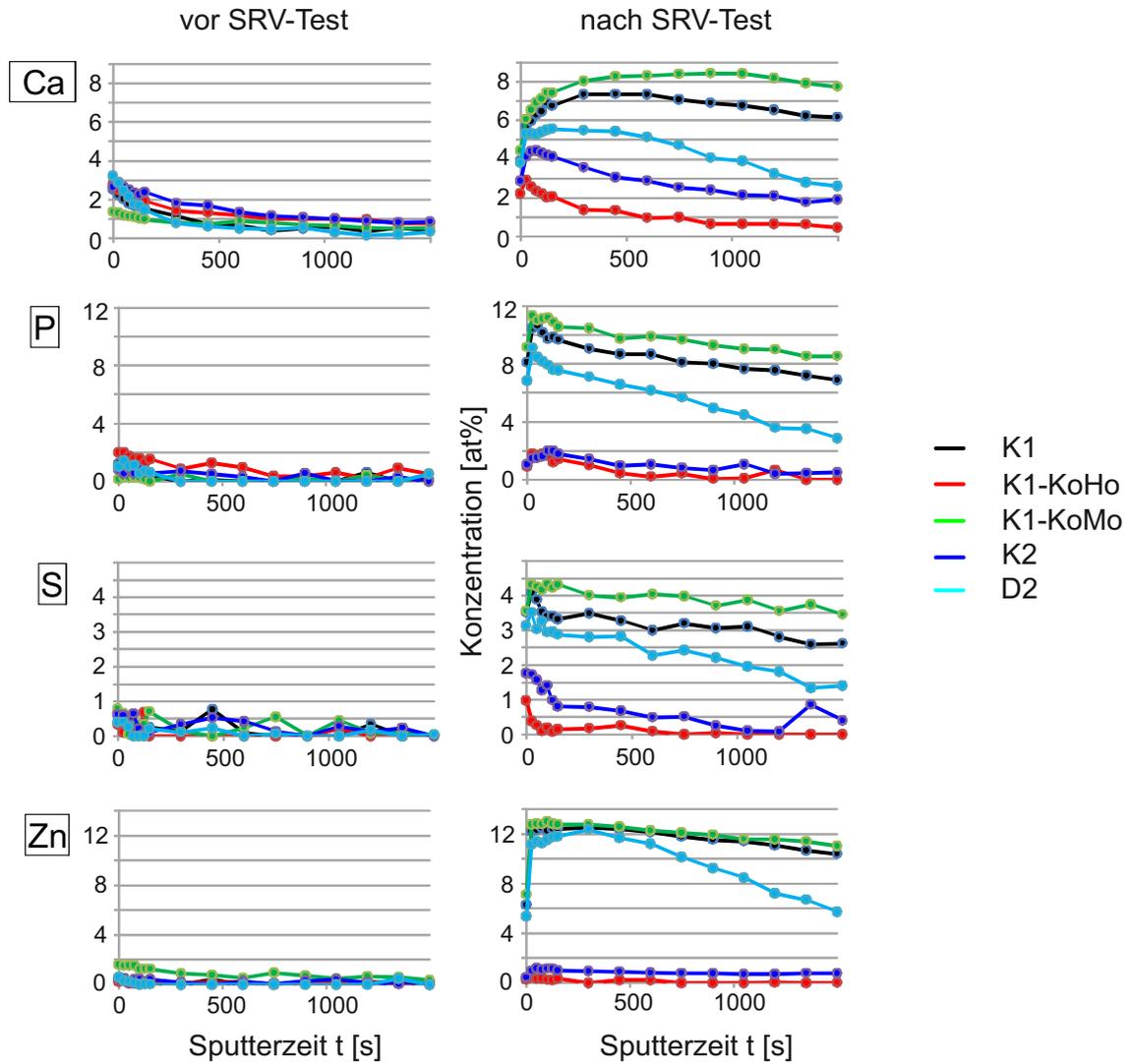


Abbildung 5.25: XPS-Tiefenprofil nach unterschiedlicher Endbearbeitung

## 6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden neben Betrachtungen zur Konditionierung von Lauf­flächen auch alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung definierter Schmierstoff­speicher vorgestellt. Auf Basis von Umform- und Prägeverfahren können effektiv Struk­turen im oberen Totpunkt appliziert werden, deren wirtschaftlicher und funktionaler Nut­zen in den beschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten belegt wurde. In diesem Zusam­menhang konnte bei strukturierten Lauf­flächen ein zu gehonten Oberflächen deutlich verschiedenes Einlaufverhalten konstatiert werden, dessen Einfluss auf das fortschrei­rende Reibungs- und Verschleißverhalten des Systems Kolbenring/Zylinderlauf­fläche untersucht werden sollte.

Weiterhin wurden unterschiedliche Technologien und Validierungsmöglichkeiten zur Kon­ditionierung von Zylinderlauf­flächen erarbeitet. Die durchgeführten Prozesskraftmes­ungen beim Honprozess zeigen die Problematik in der Bestimmung der lokalen An­presskräfte und der daraus resultierenden Schnittkräfte auf. Die zur Prozesssteuerung verwendbaren Daten bilden daher nur eine Mittelung, welche jedoch einen ersten An­satz zur kraftgesteuerten Honbearbeitung liefern kann. Dies scheint in Betrachtung der Erkenntnisse zum Einfluss der Prozesskräfte auf das tribologische Verhalten der Bau­teile eine praktikable Bearbeitungsoption in der letzten Honstufe zu sein. Durch die Verwendung keramischer Schneidstoffe in verhältnismäßig harter Bindung kann, wie in früheren Arbeiten untermauert, eine Reduktion des Reibungskoeffizienten im Motorbe­trieb erreicht werden. Im Zuge der Reduktion der Normalkraft und somit der Schnittkraft treten diese Effekte stärker in den Vordergrund. Die Verwendung keramischer Schneid­stoffe und generell die Bearbeitung mit niedrigen Prozesskräften sollte in Bezug auf eine Reibungsreduktion neben der Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit des Honprozesses stärker verfolgt werden.

Die Bewertung des Arbeitsergebnisses anhand der mechanischen Gefügeeigenschaf­ten des Werkstückes kann nur eingeschränkt durchgeführt werden. Zwar konnte entge­gen den Erkenntnissen von BERLET die Eignung von Druckspannungen im Vergleich zu spannungsärmeren Zuständen zur Reduktion der Reibung im Modellversuch belegt werden, jedoch fehlt an dieser Stelle die Verifizierung durch den Realversuch [Ber109].

Es wurde nachgewiesen, dass speziell die Finishverfahren mit den geringsten Prozesskräften verhältnismäßig hohe Druckspannungen bei erhöhten Schubspannungen im oberflächennahen Bereich hervorrufen. Die in BÖHM beschriebenen positiven Einflüsse einer geringen Deformationstiefe auf das tribologische Verhalten des tribotechnischen Systems Kolbenring/Zylinderlauffläche konnten durch Analogiebetrachtungen in Bezug auf Reibung nicht nachvollzogen werden [Böhm12]. Jedoch zeigen Verschleißuntersuchungen in diesem Kontext positive Ergebnisse bei steilen Konzentrationsgradienten. Die mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht stehen in permanenter Wechselwirkung mit chemischen Veränderungen, was eine Reduktion der Betrachtungen auf Gefügedeformationen erschwert.

Durch den Einsatz eines Konditionierwerkzeuges wurden Irregularitäten an der Werkstückoberfläche hervorgerufen, deren Bildungsmechanismen nicht eindeutig konstruiert werden konnten. Mit hoher Sicherheit beeinflussen diese korrosiv veränderten Bereiche das Reibungs- und Verschleißverhalten des tribotechnischen Systems. Daher scheint eine detaillierte Analyse zukünftig sinnvoll. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen auf den Einsatz von Konditionierleisten aus Kunststoff, welche nachweislich Verschuppungen nach dem Honen reduzieren und somit das Reib- und Verschleißverhalten des tribologischen Systems auch während des Einlaufes positiv beeinflussen. Inwieweit dieser Ansatz durch den polymeren Aufbau der Leisten zur chemischen Konditionierung beitragen kann, bleibt offen. Eine komplette Verlagerung des Einlaufes in die Fertigung scheint entsprechend den Ergebnissen der chemischen Grenzschichtanalyse nicht möglich, da die tribologisch wirksame Grenzschichtdicke nach der Endbearbeitung deutlich geringer als nach der tribologischen Belastung ist. Aus diesem Grund muss eine fertigungstechnische Konditionierung immer im Kontext der initialen tribologischen Belastung gesehen werden. Weiterhin sind tribologische Analogieversuche, speziell im Bereich von verbrennungsmotorischen Betrachtungen, in der Aussagekraft zur Bildung von chemisch veränderten Grenzschichten stark eingeschränkt. Daher bildet bei Betrachtungen zur tribologischen Grenzschicht ein 1-Zylinderprüfmotor die erste sinnvolle Näherung zum Realsystem.

Unter dem Gesichtspunkt der Reduktion von Fertigungskosten erscheint das Glattwalzen als geeignete Alternative in der Bearbeitung von Laufflächen. Insbesondere die Kombination mit den entwickelten Strukturierverfahren bietet Möglichkeiten der Reduktion der Grenz- und Mischreibung im Bereich des oberen Totpunktes. Zur Durchführung von Vorkonditionierprozessen ist das Glattwalzen aufgrund der zu geringen friktiven Leistungsumsetzung nicht geeignet.

## 7 Ausblick

Als vielversprechender Ansatz zur mechanischen Charakterisierung der Grenzschicht muss die Lateralkraftmessung bei Nanoindentation betrachtet werden. Durch dieses Verfahren können Scherfestigkeiten oberflächennaher Schichten ermittelt werden bzw. Gradienten der Scherfestigkeit analysiert werden. Diese Kenntnisse ermöglichen Rückschlüsse auf das tribologische Verhalten des Bauteiles unter Berücksichtigung der Kontaktbedingungen.

Da die dargestellten Ergebnisse nur unzureichend die Einflüsse aus Makroform und Mikrotextur widerspiegeln, sind Untersuchungen zur Trennung der Einzeleffekte sowie Wechselwirkungen sinnvoll. Die Charakteristik der Grenzschichten muss als Funktion der Makro- und Mikrogeometrie betrachtet werden, während wiederum diese 3 Faktoren Funktionsgrößen von Verschleiß und Reibung darstellen. Daher sollte der funktionale Zusammenhang dieser 3 Faktoren analysiert werden. Als probates Mittel würde eine Tribometeranordnung mit definiert gelagertem Linienkontakt von einer Welle auf einer rotierenden Scheibe genügen. Die Makro- und Mikrogeometrie der definitionsgemäß planen Scheibe gilt es in der Ebene zu modifizieren, um somit beschreibbare Kontaktverhältnisse bei konstanter, projizierter Linienlage des Kontaktes zu erhalten. Bei konstanter Last und Kinematik lassen sich somit Grenzschichteigenschaften lokal von veränderten Topografie- und Makroformen darstellen. Als kritische, technologische Anforderung muss in diesem Aufbau die definierte Positionierung von Grund- und Gegenkörper bei kraftschlüssiger Verbindung gesehen werden. Eine Erweiterung dieser Prüfanordnung kann die sequenzielle Verwendung mehrerer Prüfkörper und weiterer Bewegungsachsen darstellen, sodass ein Finishprozess direkt mit einem Einlaufprozess korreliert werden kann. Dem Finishelement müsste eine oszillierende Bewegung radial zur Scheibe übergeordnet werden, um eine Art Mikrofinishprozess bzw. Kurzhubhohonprozess abzubilden. Die hohe Komplexität dieser Versuchseinrichtung muss durch eine entsprechend aufwendige Analytik in Form von In-Prozessmesstechnik von Kräften, ggf. Topografie, und Post-Prozessmesstechnik zur Grenzschichtcharakterisierung ergänzt werden. Nur durch diese umfangreiche Betrachtungsweise wird die Bewertung der Funktionalität von Grenzschichten als Funktion von Geometriefaktoren ermöglicht

und somit das Optimierungspotential zur Verringerung von Reibung und Verschleiß erschlossen. Weiterführende Forschungen sollten die Übertragbarkeit der Erkenntnisse und Wechselwirkungen auf das Realsystem vertiefen. Als erste Näherung sind Korrelationen zu einem geschleppten und/oder befeuerten Einzylinder-Reibungsmotor in Verbindung mit einer Verschleißmessung möglich. Die Vorteile dieser Technologie liegen im geringen Abstraktionsgrad zum Realsystem bei verbesserter Zugänglichkeit für Messtechnik und der Beschreibung von Makroformen und -verformungen.

Mit dem Ziel der Implementierung von Einlaufprozessschritten in die Fertigung könnte bei Fokussierung auf Verschleißbetrachtungen gezielt der Bereich des oberen Umkehrpunktes bzw. des Zylinderwickles betrachtet werden, da in diesem Bereich die maximalen Verschleißgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Hier bieten sich Konditionierverfahren mit entsprechender Kolbenringkinematik an. Durch eine hochfrequente, friktive Belastung im oberen Umkehrpunkt könnten somit ähnlich steile Additivkonzentrationsgradienten wie nach einem „scharfen Einlauf“ erzeugt werden. Bei Betrachtung der Einlaufcharakteristik nach Abbildung 7.1 wird deutlich, dass effektiv eine Einlaufzeit von  $t = 0,6$  h zur Bildung einer stabilen Grenzschicht genügt. Wird zusätzlich noch die axiale Kontaktlänge auf den oberen Umkehrpunkt reduziert, kann dies im Verhältnis von 5 mm zu 150 mm die Prozesszeit der Konditionierung während der Endbearbeitung auf ca. 1 Minute verkürzen und somit der additive Konditionierungsprozess in einem wirtschaftlichen Prozessfenster platziert werden.

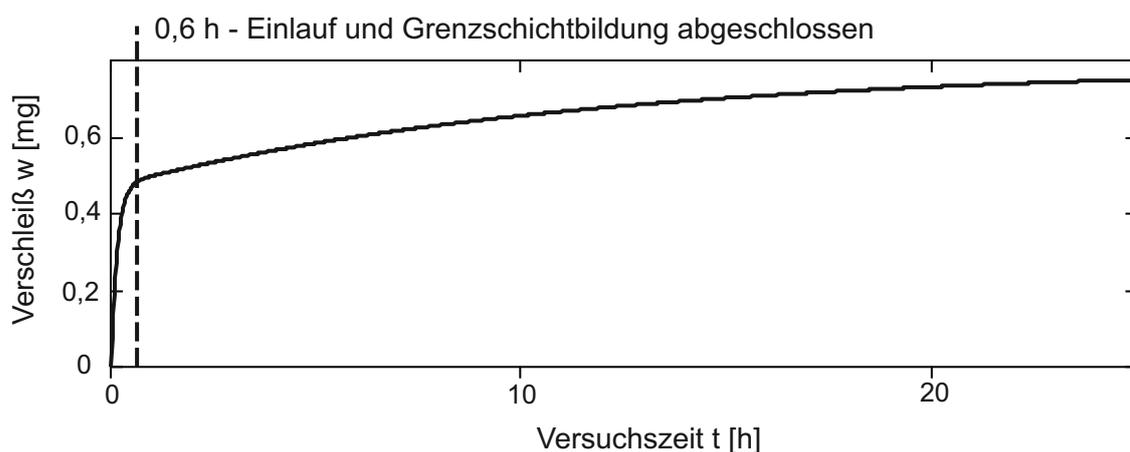


Abbildung 7.1: Approximiertes Ende des Einlaufvorganges entsprechend der Verschleißcharakteristik nach Abbildung 4.3

# Literaturverzeichnis

- [Abbo33] ABBOTT, E. J. UND FIRESTONE, F. A.: Specifying surface quality. In: *Mechanical Engineering* 55 (1933), S. 569–572
- [Abel03] ABELN, T: Laserstrukturierung - Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. In: *VDI Berichte 1810* (2003)
- [Ande08] ANDERBERG, C.; JOHANSSON, S.; NILSSON, P. H.; OHLSSON, R. UND ROSEN, B.-G.: New cylinder liner surfaces for low oil consumption. In: *Tribology International* 41 (2008), S. 854 – 859
- [Ande09] ANDERBERG, C.; PAWLUS, P.; ROSEN, B.-G. UND THOMAS, T. R.: Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), S. 1936–1942
- [Arch53] ARCHARD, J. F.: Contact and rubbing of flat surfaces. In: *J. Appl. Phys.* 24 (1953)
- [Auri13] AURICH, J.C.; LINKE, B.; HAUSCHILD, M.; CARRELLA, M. UND KIRSCH, B.: Sustainability of abrasive processes. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62, Issue 2 (2013), S. 653–672
- [Bart10] BARTEL, D: *Simulation von Tribosystemen - Grundlagen und Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag, Habilitationsschrift, 2010
- [Berl09] BERLET, P.: *Einfluss spanender Endbearbeitungen mit geometrisch unbestimmten Schneiden auf tribologische Funktionsflächen im Motorenbau sowie auf Reibung und Verschleiß*, Universität Kassel, Diss., 2009
- [Berl10] BERLET, P.; KEHRWALD, B.; DIENWIEBEL, M. UND SCHERGE, M.: Reibungsreduzierung durch energetisch optimierte Endbearbeitung von Zylindern und Kurbelwelle. In: *VDI-Berichte Nr. 2109* (2010), S. 147 – 158

- [Bern06] BERNIS, H. UND THEISEN, W.: Eisenwerkstoffe-Stahl und Gusseisen. In: *Springer Verlag* (2006), Nr. ISBN 978-3-540-79955-9
- [Böhm03] BÖHME, J.; FRÖHLICH, A. UND DOERR, J.: Motorblöcke aus Aluminium oder Gusseisen. In: *VDI - Berichte. Gießtechnik im Motorenbau - Anforderungen der Automobilindustrie* (2003), S. 1–25
- [Böhm12] BÖHM, J.; MICHEL, M.; BEHR, T.; HAHN, M. UND SCHWEICKERT, S.: Nanoslides - Die Weiterführung der konsequenten Optimierung von Zylinderlaufbahnen bei Mercedes Benz. In: *VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel* (2012)
- [Bähr13] BÄHRE, D. UND SCHMITT, CH.: An Approach to the Calculation of Process Forces during the Precision Honing of Small Bores. In: *Procedia CIRP 7 - Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems, Elsevier* (2013), S. 282–287
- [Blau05] BLAU, P.J.: On the nature of running-in. In: *Tribology International 38, Elsevier* (2005), S. 1007–1012
- [Bölt10] BÖLTER, J.: *Auswirkungen von Ruß im Schmieröl von DI-Dieselmotoren auf das tribologische Verhalten und Tribomutation von hochbelasteten Motor-komponenten*, Universität Karlsruhe, Diss., 2010
- [BMBF13] BMBF VERBUNDPROJEKT SMARTSURF: Funktionale Laser-Mikrostrukturierung zur Verschleiß- und Verbrauchsreduktion an hochbeanspruchten Bauteiloberflächen / PTKA, Karlsruher Institut für Technologie. 2013. – Forschungsbericht
- [Brin02] BRINKMANN, S.: *Funktionsorientierte Beurteilung von Zylinderlaufflächen durch 3-dimensionale Oberflächenmesstechnik*, Universität Hannover, Diss., 2002
- [Brin11] BRINKSMEIER, E.; GLÄBE, R.; KLOCKE, F.; LUCCA, D. A.: Process Signatures - an Alternative Approach to Predicting Functional Workpiece Properties. In: *1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Procedia Engineering 19, Elsevier* (2011), S. 44–52

- [Büsc03] BÜSCHER, R. UND FISCHER, A.: Metallurgical Aspects of Sliding Wear of fcc Materials for Medical Applications. In: *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co* (2003)
- [Byel08] BYELYAYEV, O.: *Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung*, Universität Magdeburg, Diss., 2008
- [Corr10] CORRAL, J.V. und Salcedo M. I.B.; Calvet C. I.B.; Calvet: Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50 (2010), S. 621–629
- [Czic03] CZICHOS, H. UND HABIG, K.-H.: *Tribologie Handbuch*. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 2003
- [Czic10] CZICHOS, H. UND HABIG, K.-H.: *Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010
- [Denk08a] DENKENA, B.; KÄSTNER, J.; KNOLL, G.; BRANDT, S.; BACH, F.-W.; DRÖSSLER, B. ; RELTHMEIER, E. UND BRETSCHNEIDER, M.: Mikrostrukturierung funktionaler Oberflächen. Auslegung, Fertigung und Charakterisierung von Mikrostrukturen zur tribologischen Funktionalisierung von Oberflächen. In: *wt Werkstattstechnik online* Jahrgang 98 H.6 (2008), S. 486–497
- [Denk08b] DENKS, I. A.: *Entwicklung einer Methodik zur Erfassung randschichtnaher Eigenspannungsverteilungen in polykristallinen Werkstoffen mittels energie-dispersiver Diffraktion*, Universität Kassel, Diss., 2008
- [Denk11] DENKENA, B. UND TÖNSHOFF, H.K.: *Spanen. Grundlagen. 3. Auflage*. Springer-Verlag Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2011
- [Denk12] DENKENA, B.; ULMER, H.; DINKELACKER, F. UND KÄSTNER, J.: Tribologische Optimierung von Zylinderlaufbuchsen durch spanend eingebrachte Mikroschmieraschen. In: *53. Tribologie-Fachtagung, Göttingen* Bd. 1, 2012
- [Dete08] DETERS, L.: Kapitel: Reibung, Verschleiß und Schmierung. In: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2008), S. 1–68

- [Dete09] DETERS, L.; BLAU, A.; REPPHUN, G.; MAY, U. UND BARTEL, D.: Experimental approach for the transferability of results between different testing levels for tribocontacts. In: *GfT Tribologie-Fachtagung, Göttingen 1* (2009), S. 17/1–17/10
- [Dete11] DETERS, L. UND BARTEL, D.: Tribologische Prüfung von Werkstoffen im Automobilbau. In: *Expertentreff „Neue Materialien“*, Magdeburg, 2011
- [Dimk09] DIMKOVSKI, Z.; ANDERBERG, C.; ROSEN, B.-G.; OHLSSON, R. UND THOMASA, T. R.: Quantification of the cold worked material inside the deep grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear. In: *Wear* (2009), S. 2253–2242
- [Dimk10] DIMKOVSKI, Z.; ANDERBERG, C.; OHLSSON, R. UND ROSEN, B.-G.: Characterisation of worn cylinder liner surfaces by segmentation of honing and wear scratches. In: *Wear* (2010), S. 548–552
- [DIN 93] DIN 50323-3: *Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen - Dokument zurückgezogen*. 1993
- [DIN 03a] DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. 2003
- [DIN 03b] DIN 8583-5: *Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 5: Eindrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 2003
- [DIN 03c] DIN 8589-14: *Fertigungsverfahren Spanen, Teil 14: Honen*. 2003
- [Dröd13] DRÖDER, K.; HOFFMEISTER, H.-W.; SCHWEIG, F.; GROSSE, T.; SPITZNAGEL, T.; WIENS, A. UND FLORES, G.: Bearbeitungsstrategien beim Formhonen von Zylinderkurbelgehäusen. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Vulkan Verlag, Essen* (2013), S. 302–318
- [Eige95] EIGENMANN, B. UND MACHERAUCH, E.: Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen. In: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* 26 (1995), S. 148–160
- [Etsi99] ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. UND HALPERIN, G.: Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces. In: *Tribological Transactions* 42 (1999), S. 511–516

- [Fill07] FILLOT, N.; IORDANOFF, I. UND BERTHIER, Y: Wear modelling and the third body concept. In: *Wear* 262 (2007), S. 949–957
- [Flei76] FLEISCHER, G: Energiebilanzierung der Festkörperreibung als Grundlage zur energetischen Verschleißberechnung Teil I-III. In: *Schmierungstechnik* 7 (1976), S. 225–230
- [Flei90] FLEISCHER, G.: Zur Energetik der Reibung. In: *Wissenschaftliche Zeitung der TH Otto von Guericke Magdeburg* 34 (1990)
- [Flor92] FLORES, G: *Grundlagen und Anwendung des Honens*. Vulkan-Verlag GmbH Essen, 1992
- [Frit08] FRITZ, A.-H. UND SCHULZE, G.: *Fertigungstechnik. 8. Auflage*. Springer Berlin-Heidelberg, 2008
- [Genz99] GENZEL, Ch.: A self-consistent method for X-ray diffraction analysis of multi-axial residual-stress fields in the near-surface region of polycrystalline materials. In: *Journal for Applied Crystallography* 32 (1999), S. 770–778
- [Genz01] GENZEL, Ch: *Entwicklung eines Mess-und Auswerteverfahrens zur röntgenographischen Analyse des Eigenspannungszustandes im Oberflächenbereich vielkristalliner Werkstoffe*, Humboldt-Universität Berlin, Diss., 2001
- [Gerl61] GERLACH, H.-H.: *Das Glattwalzen von Gusseisen*, Technische Hochschule Braunschweig, Diss., 1961
- [Geza05] GEZARZICK, W.: UV-Photonen-Laseranlage optimiert die Motorenfertigung. In: *VDI - Berichte* 147 06 (2005), S. 23
- [Gobi04] GOBIN, O.: *Darstellung und Charakterisierung fester Stoffe*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [Grad06] GRADOWSKI, M. v.: *Charakterisierung von plasmafunktionalisierten Oberflächen mittels ToF-SIMS und multivariaten Analysemethoden*, Universität Mainz, Diss., 2006
- [Hami66] HAMILTON, D.B.; WALOWIT, J.A. UND ALLEN, C.M: A Theory of Lubrication by Microasperities. In: *ASME J. Basic Eng.* 88(1) (1966), S. 177–185

- [Hami83] HAMILTON, G.M.: Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 197C (1983), S. 52–59
- [Herc09] HERCKE, T.: Umfassende 3D-Oberflächenbewertung von Honstrukturen. In: *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* Jahrgang 70 (2009), S. 760–765
- [Heub03] HEUBERGER, A.; LAGEMANN, V.; CHU SUY, F.; GASTHUBER, H.; FÜSSER, H.J. UND KRATZSCH, A.: Mikrohydrodynamik und Festkörperkontakt - Betrachtungen am Beispiel des Tribosystems Kolben-Kolbenring-Zylinderlaufbahn. In: *VDI-Berichte 1764* (2003)
- [Heub07] HEUBERGER, A.: *Neue Werkstoffe und Oberflächengestaltung bei Zylinderlaufbahnen zur Absenkung der Reibung der Kolbengruppe bei Verbrennungsmotoren*, Universität Kassel, Diss., 2007
- [Hoen09] HOEN, T.; SCHMID, J. UND STUMPF, W.: Weniger Verschleiß und Ölverbrauch durch Spiralgleithonen bei Deutz-Motoren. In: *MTZ* Jahrgang 70 (04/ 2009), S. 324–329
- [Hoff04] HOFFMEISTER, H.-W. UND MENZE, B.: Einsatz von Sensorik beim Honen und Regelung von Honprozessen. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren* 61 (2004), S. 261–279
- [Holm09] HOLMBERG, K. UND MATTHEWS, A. ; BRISCOE, B. J. (Hrsg.): *Coatings Tribology*. Elsevier Science, 2009
- [Horn10] HORN, W.: Von der zeit- zur kostenoptimierten Fertigung. In: *Schmalkalder Werkzeugtagung*, 2010
- [ISO196a] ISO12085: *Geometrical Product Specifications - Surface texture: Profile method - Motif parameters*. 1996
- [ISO196b] ISO13565-2: *Geometrical Product Specifications - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve*. 1996
- [Jeng96] JENG, Y.-R.: Impact of Plateau Surfaces on Tribological Performance. In: *Tribology Transactions* 39 (1996), S. 354–361
- [John85] JOHNSON, K. L.: Contact Mechanics. In: *Cambridge University Press* (1985)

- [Junk12] JUNKER, T.; SCHUBERT, A.; DROSSEL, W.-G.; SCHNEIDER, J. UND ULLRICH, M.: Hochdynamische Oberflächenkonturierung von Zylinderlaufbahnen mittels mechatronischer Komponente. In: *VDI-Berichte Nr. 2163, Zylinderlaufbahn, Kolben Pleuel, Düsseldorf* (2012), S. 133–145
- [Karp01] KARPUSCHEWSKI, B. ; VDI, Fortschritt-Berichte (Hrsg.): *Sensoren zur Prozessüberwachung beim Spanen*. VDI Verlag, Habilitationsschrift, 2001
- [Karp11] KARPUSCHEWSKI, B. UND WELZEL, F.: Mikrostrukturierung von Zylinderbohrungen. In: *VDI-Z Integrierte Produktion Special Werkzeuge, Springer VDI Verlag 1* (2011), S. 54–57
- [Karp12] KARPUSCHEWSKI, B.; PIEPER, H.-J.; WELZEL, F. UND RISSE, K.: Alternative strategies in finishing cylinder running surfaces. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology 61/1* (2012), S. 559–562
- [Karp13a] KARPUSCHEWSKI, B.; EMMER, T. UND PETZEL, M.: Cryogenic wet-ice blasting - Process conditions and possibilities. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology 62* (2013), S. 316–322
- [Karp13b] KARPUSCHEWSKI, B.; RISSE, K. UND WELZEL, F.: Zerspankraftuntersuchungen bei der Finishbearbeitung von Zylinderlauflächen. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Vulkan Verlag, Essen* (2013), S. 319–332
- [Karr09] KARRAR, E.: *Untersuchungen zum Reibungsverhalten und Ölverbrauch der Kolbengruppe von Verbrennungsmotoren*, RWTH Aachen, Diss., 2009
- [Kehr93] KEHRWALD, B. UND GERVÉ, A.: Neuere Modellvorstellungen in der Tribologie – Tribomutation an Zahnflanken und anderen Maschinenteilen. In: *Kurzbericht ZF 1/93, Vorschlag für ein FVA-Vorhaben, Arbeitspapier für die ZF Zahnradfabrik Friedrichshafen AG* (1993)
- [Kehr98] KEHRWALD, B.: *Untersuchung der Vorgänge in tribologischen Systemen während des Einlaufs*, Universität Karlsruhe, Diss., 1998
- [Kehr99] KEHRWALD, B. UND KOPNARSKI, M.: Untersuchung der Vorgänge im tribologischen Systemen während des Einlaufs. In: *Abschlussbericht Vorhaben Nr. 616, FVV, Heft 677* (1999)

- [Klin99] KLINK, U. UND FLORES, G.: Laser-Strukturieren von Zylinderlaufflächen. In: *9. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium* (1999)
- [Kloc05] KLOCKE, F. UND KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren 2. Schleifen, Honen, Läppen, neu bearbeitete Auflage*. Springer Heidelberg, 2005
- [Kloc06] KLOCKE, F. UND KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. Springer Heidelberg, 2006
- [Köni54] KÖNIG, H.: Glattwalzen. In: *Das Industrieblatt. Dt. Fachzeitschrift u. Fachbuchverlag* (1954)
- [Kohl96] KOHLRAUSCH, F.: Struktur und Eigenschaften der Materie, Kapitel 8.4. In: *Praktische Physik Band 2* (1996), S. 717–749
- [Krag73] KRAGELSKY, I. V.; LUBARSKY, I. M.; GUSLIAKOV, A. A. ET AL.: Friction and Wear in Vacuum. In: *Machinostroenie, Moscow* (1973)
- [Krag77] KRAGELSKY, I. V.; DOBYCHIN, M. N. UND COMBALOV, V. S.: Foundation of Friction and Wear Calculation. In: *Machinostroenie, Moscow* (1977)
- [Lemk03] LEMKE, H.-W.; SEEWIG, J.; BODSCHWINNA, H. UND BRINKMANN, S. : Kenngrößen der Abbott-Kurve zur integralen Beurteilung dreidimensional gemessener Zylinderlaufbahn-Oberflächen. In: *Motortechnische Zeitschrift (MTZ) Jahrgang 64* (2003), S. 428–444
- [Lens03] LENSCH, G. ; KRAPPEL, A. (Hrsg.): *Oberflächenbearbeitung mittels Nd:YAG Hochleistungslasern und speziellen Strahlwerkzeugen, insbesondere für die Material-Innenbearbeitung in Zylindern*. In: *Rennsport und Serie-Gemeinsamkeiten und gegenseitige Beeinflussung*. Expert Verlag, 2003
- [Mach03] MACH, W.: *Tribomutation bei der Endbearbeitung und ihre Auswirkungen auf das tribologische Verhalten während des Betriebes*, Universität Karlsruhe, Diss., 2003
- [Mask90] MASKUS, P.: *Prozessintegrierte Qualitätsprüfung und Prozessregelung beim Honen*, Universität Braunschweig, Diss., 1990
- [Mask91] MASKUS, P.: Spanbildung beim Honen. In: *Honen in Forschung und industrieller Praxis, 2. Fachtagung am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig*, 1991

- [Mehr02] MEHR, A.; SCHMIDT, J.; GERVE, A.; MACH, W.; KLUMPP, T.: Beeinflussung der tribologischen Eigenschaften im Betrieb durch Tribomutation beim Schleifen, Honen und Rollieren. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen & Polieren 60. Ausgabe* (2002), S. 502–511
- [Mezg12] MEZGHANI, S.; DEMIRCI, I.; ZAHOUANI, H.; EL MANSORI, M.: The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. In: *Precision Engineering* 36 (2012), S. 210–217
- [Mush86] MUSHARDT, H.: *Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1986
- [Nanb08] NANBU, T.; REN, N.; YASUDA, Y.; ZHU, D. UND WANG, Q. J.: Microtextures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. In: *Tribology Letters* 29(3) (2008), S. 241–252
- [N.N.02] N.N.: Arbeitsblatt Nr. 7 der Gesellschaft für Tribologie, Tribologie - Verschleiß, Reibung - Definitionen, Begriffe, Prüfung. 2002. – Forschungsbericht
- [N.N.09a] N.N.: Möglichkeiten zur Reibungsoptimierung von Zylinderlaufflächen aus Sicht der Fertigungstechnik / Nagel. 2009. – Forschungsbericht
- [N.N.09b] N.N.: Technologieblatt der Fa. Gehring. Laserstrukturieren - Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. 2009. – Forschungsbericht
- [N.N.10] N.N.: *Honen von Zylinderlaufbüchsen (ZKG) aus Grauguss (GG) für PKW-Motoren - Historie und Technik*. 2010. – Firmenschrift der Houghton Deutschland GmbH
- [Pani00] PANIN, V.; KULOBAEV, A.; TARASOV, S. UND POPOV, V.: Subsurface layer formation during sliding friction. In: *Wear* 249 (2000), S. 860–867
- [Pauc08] PAUCKSCH, E.; HOLSTEN, S.; LINSS, M. UND TIKAL, F. ; VERLAG, Springer (Hrsg.): *Zerspantechnik*. Vieweg+Teubner Wiesbaden, 12. Auflage, 2008
- [Pöhl09] PÖHLMANN, K.; KEHRWALD, B. UND MACH, W.: Reibungs- und Verschleißminderung durch Tribomutation bei der Endbearbeitung und im Einlauf. In:

- ATZ/ MTZ Konferenz: Reibungsminimierung im Antriebsstrang, Esslingen* (2009)
- [Pöhl10] PÖHLMANN, K.: Mechanical mixing during running-in using a fully formulated engine oil with and without dedicated AW components. In: *17. International Colloquium Tribology, Esslingen* (2010), S. 610–616
- [PL02] PUENTE LEON, F.: Evaluation of Honed Cylinder Bores. In: *Annals of the CIRP* 51/1 (2002), S. 503–506
- [PL05] PUENTE LEON, F.: An objective measure of the quality of honed surfaces. In: *Proc. SPIE 5856, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV* 287 (2005), S. 9
- [Popo99] POPOV V.L. UND KOLUBAEV, A.V.: Einfluß der Dicke der tribomutierten Schicht auf den Verschleiß. In: *Tribologie und Schmierungstechnik* 46 Heft 2 (1999), S. 32–35
- [Popo02] POPOV V.L.; PSAKHIE, S.G.; DMITRIEV, A. UND SHILKO, E.: Micro- and nanoskala-simulations of friction and wear in combustion engines and railweel-contacts. In: *GfT, Tribologie-Fachtagung Göttingen* 1 (2002), S. 33/1–33/7
- [Rabi65] RABINOWICZ, E.: Friction and wear of materials. In: *Wiley, New York* (1965)
- [Rees12] REES, J.: Der Verbrennungsmotor hat noch lange Zukunft. In: *Zeitschrift "Die Zeit"* (2012)
- [Rign00] RIGNEY, D. A.: Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. In: *Wear* 245 (2000), S. 1–9
- [Robo99] ROBOTA, A. UND ZWEIN F.: Influence of Cylinder Bore Topography on the Oil Consumption and Particulate Emissions of a DI TCI Diesel Engine. In: *MTZ* 60 (1999), S. 246–255
- [Rose02] ROSEN, B.-G. UND OHLSSON, R.: *Abschlussbericht von Workpackage 2 im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes SURFSTAND, The Development of a Basis for 3D Surface Roughness Standards*. Contract SMT-CT98-2209, 2002

- [Sabr09] SABRI, L. UND EL MANSORI, M.: Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. In: *Surf. Coat. Technol.* 204 (2009), S. 1046–1050
- [Sabr10] SABRI, L.; MEZGHANI, S. UND EL MANSORI, M.: A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with coated diamond stones. In: *Surface and Coatings Technology, Elsevier* 205 (2010), S. 1515–1519
- [Salj83] SALJÈ, E. UND MUSHARDT, H.: Untersuchungen über den Prozessablauf beim Innenrundhonen anhand von Zerspankraftmessungen. In: *VDI-Z* 125 12 (1983), S. 471–474
- [Sche01] SCHERGE, M. ; GERVE, A. UND BERLET, P.: Tribomutation von Werkstoffflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderzwickels. 2. Abschlussbericht. In: *FVV-Vorhaben 716* (2001)
- [Sche03a] SCHERGE, M.; SHAKHVOROSTOV, D. UND PÖHLMANN, K.: Fundamental wear mechanisms of metals. In: *Wear*, 255/1-6 (2003), S. 395–400
- [Sche03b] SCHERGE, M. UND GERVÉ, A.: Mikrotribometrie im Maschinenbau. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, WILEY-VCH Verlag Weinheim* 34 (2003), S. 934–937
- [Sche05] SCHERGE, M. ; GERVE, A. ; BERLET, P.; KOPNARSKI, M.; OECHSNER, H. UND SCHREIB, M.: Tribomutation 2. Tribomutation von Werkstoffoberflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderzwickels 2. In: *Abschlussbericht Vorhaben Nr. 716, FVV, Heft 811* (2005)
- [Sche09] SCHERGE, M.; DIENWIEBEL, M.; BERLET, P. UND KEHRWALD B.: Moto-optimierung durch energetisch gesteuerte Endbearbeitung. In: *ATZ/MTZ Konferenz "Reibungsminimierung", Esslingen* (2009)
- [Schm06] SCHMID, J.: Optimierte Honverfahren für Gusseisen-Laufflächen. In: *VDI-Berichte 1906, VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden Baden* (2006), S. 217–236. – VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, 2006
- [Schm10] SCHMID, J.: Reibungsoptimierung von Zylinderlaufbahnen aus Sicht der Fertigungstechnik. In: *MTZ* 71 6 (2010), S. 408–413
- [Schn11] SCHNEIDER, R.: Unrundbearbeitung von Zylinderbohrungen durch Formhonen. In: *Werkstattstechnik online Jahrgang 101 1/2* (2011), S. 88–90

- [Schn12] SCHNEIDER, R. AND HOCHMUTH, C. UND NEUGEBAUER, R.: Fertigungsverfahren zur Kompensation von Zylinderverzügen. In: *VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden Baden* (2012)
- [Schu09] SCHULZ, J.: Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen (I). In: *Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen* (2009)
- [Seba01] SEBALD, R.: *Modellierung der Rekristallisationstextur: Wechselwirkung zwischen Keimbildung und Keimwachstum*, RWTH Aachen, Diss., 2001
- [Shak04] SHAKHVOROSTOV, D.; PINTO, H.; PYZALLA, A.; ENDERS, S.; PÖHLMANN, K. UND SCHERGE, M.: Struktur-, Härte- und Spannungsmessung von ölgeschmierten Metall-Metall Tribokontakten. In: *Materialwiss. u. Werkstofftech., WILEY-VCH Verlag, Weinheim* 35 (2004), S. 614–619
- [Smil09] SMILGIES, D.-M.: Scherrer grain-size analysis adapted to grazing-incidence scattering with area detectors. In: *Journal of Applied Crystallography* 42 (2009), S. 1030–1034
- [Spie09] SPIESS, L.; SCHWARZER, R.; BEHNKEN, H. UND TEICHERT, G.: Moderne Röntgenbeugung. Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker. In: *Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden* (2009)
- [Suh86] SUH, N. P.: Tribophysics. In: *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey* (1986)
- [Tika09] TIKAL, F.; BIENEMANN, R. UND HECKMANN, L.: Schneidkantenpräparation - Ziele, Verfahren und Messmethoden. In: *Kassel University Press* (2009)
- [Töns95] TÖNSHOFF, H.K.: *Spanen*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [Uetz68] UETZ, H.: Einfluss der Honbearbeitung von Zylinderlaufbüchsen auf die innere Grenzschicht und den Einlaufverschleiß. In: *Forschungsbericht 215/I-1, FVV, Heft 85* (1968)
- [Virk01] VIRKUS, U.: *Oberflächengestaltung durch die Verfahrenfolge Spanen/ Glattwalzen unter stofflichen, geometrischen und kinematischen Aspekten*, TU Dresden, Diss., 2001

- [Volz76] VOLZ, J.: *Erstellung optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren*, Universität Karlsruhe, Diss., 1976
- [Weid07] WEIDNER, A.: *Strukturorientierte dreidimensionale Rauheitsauswertung von optisch vermessenen Zylinderlaufbahnen*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2007
- [Weig97] WEIGMANN, U.: *Honen keramischer Werkstoffe*, Technische Universität Berlin, Diss., 1997
- [Weig07] WEIGMANN, U. P.: Formhonen von Kolbenlaufbahnen. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*, 63. Ausgabe (2007), S. 298–318
- [Wen,93] WEN, S. UND LI, N.: On the mixed Lubrication and Wear in Engine Running-in Process. In: *Proceedings 61<sup>st</sup> International Congress on Tribology, Lyon 4* (1993), S. 279–284
- [West13] WESTHOFF, D.: Feeding faster cycle times. In: *Production Engineering Solutions* 17 (2013), S. 42–43
- [Wien07] WIENS, A.; FLORES, G.; KLINK, U. UND ABELN, T.: Makroform- und Mikroformbearbeitung von Zylinderbohrungen mittels Freiformhonen. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Vulkan Verlag, Essen*, 63. Ausgabe (2007), S. 329–339
- [Wien10] WIENS, A.; LAHRES, M.; HOFFMEISTER, H.-W. UND FLORES, G.: Fertigungstechnischer Ansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen mittels Formhonen. In: *VDI-Berichte Nr. 2109* (2010), S. 133 – 145
- [Wien11] WIENS, A.: *Formhonen von Zylinderbahnen*, Universität Braunschweig, Diss., 2011
- [Yoko87] YOKOYAMA, K.; ICHIMIYA, R.; IWATA, K. UND MORIWAKI, T.: Analysis of thermal deformation of workpiece in honing process. In: *(4th Report) Bull. Japan. Soc. of Prec. Eng.* 21 (1987), S. 1928–1933
- [Zett74] ZETTEL, H.-D.: *Abtragssteigerung und Formverbesserung beim Langhubhonen*, TH Karlsruhe, Diss., 1974
- [ZG87] ZUM GAHR, K. H.: Grundlagen des Verschleißes. In: *VDI-Bericht, VDI Verlag Düsseldorf* 600.3 (1987)

- [Zhmu11] ZHMUD, B.: Fuel economy in focus: advances in development of energy-efficient lubricants and low-friction coatings for automotive applications. In: *Tribology and Lubrication Technology* 67(9) (2011), S. 42–49
- [Zhmu12] ZHMUD, B.; AKERLUND, E.-B.; JACOBSON, S.; HARDELL, J.; HAMMERSTRÖM, L. UND OHLSSON, R.: ANS Triboconditioning: In-Manufacture Running-in Process for Improving Tribological Properties of Mechanical Parts Made of Steel or Cast Iron. In: *Proc. 18th International Colloquium Tribology – Industrial and Automotive Lubrication, Stuttgart, 2012*
- [Zwir80] ZWIRLEIN, O. UND SCHLICHT, H.: Werkstoffanstrengung bei Wälzbeanspruchung - Einfluss von Reibung und Eigenspannung. In: *Zeitschrift Werkstofftechnik* 11 (1980), S. 1–14

# Studentische Arbeiten mit Betreuung durch den Autor

- [SA10] FOEDE, A.: *Auslegung und Konstruktion eines Werkzeuges zur Mikrostrukturierung von Bohrungen*. Studienarbeit am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2010
- [DA11] RISSE, K.: *Grundlagenuntersuchungen von unterschiedlichen Prozessparametern und deren Wechselwirkung bei der Herstellung von tribologisch günstigen Grauguss-Zylinderlaufflächen durch Honen*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2011
- [SA11] GRÖGER, B.: *Analyse eines Graviervfahrens zur Strukturierung tribologisch beanspruchter Oberflächen*. Studienarbeit am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2011
- [BA13] PETERS, G.: *Konstruktive Modifikation eines bestehenden Strukturierwerkzeuges*. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2013
- [DA13] RICHTER, L.: *Metallografische Untersuchungen zur Charakterisierung von Zylinderlaufflächen*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2013

Die aufgelisteten Arbeiten sind neben vielen weiteren im Zeitraum der Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Zerspantechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg betreut und durchgeführt worden.

# A Anhang

## A.1 Ermittlung der realen Kontaktfläche

### Berechnung der Kontaktbreite $b$ infolge der Hertz'schen Pressung

E-Modul Kolbenring  $E_1 = 150000 \text{ N/mm}^2$

Querdehnungszahl  $\nu_1 = 0,285$

E-Modul Lauffläche  $E_2 = 108000 \text{ N/mm}^2$

Querdehnungszahl  $\nu_2 = 0,26$

Durchmesser Kolbenring  $d_1 = 35 \text{ mm}$

Kontaktlänge  $l = 254 \text{ mm}$

Normalkraft aus tangentialer Vorspannkraft des Kolbenringes  $F_t = 105 \text{ N}$

bei max. Druck wirksame Normalkraft des Kolbenringes  $F_p = 7547 \text{ N}$

max. Normalkraft des Kolbenringes  $F_{ges} = 7652 \text{ N}$

$$b = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{ges} \cdot d_1}{\pi \cdot l} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 - \nu_2}{E_2} \right)} = 0,072 \text{ mm} \quad (\text{A.1})$$

Bei Annahme einer ideal glatten Oberfläche und einer vernachlässigbaren Deformation des Kolbenringes ergibt sich die Eindringtiefe  $s_K$  des Kolbenringes normal zur Zylinderlauffläche zu

$$s_K^2 = \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2 = 0,04 \text{ } \mu\text{m} \quad (\text{A.2})$$

**Bestimmung der maximalen Hertz'schen Pressung  $p_{max}$** 

$$p_{max} = \sqrt{\frac{F_{ges}}{\pi \cdot l \cdot d_1} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 - \nu_2}{E_2} \right) \right]^{-1}} = 177 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.3})$$

**Bestimmung des Vergleichsspannungsmaximums**

$$\sigma_x(z) = -2 \cdot \nu_2 \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{z}{b} \right)^2} - \frac{z}{b} \right] \cdot p_{max} \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_y(z) = - \left[ \frac{1 + 2 \left( \frac{z}{b} \right)^2}{\sqrt{1 + \left( \frac{z}{b} \right)^2}} - 2 \cdot \frac{z}{b} \right] \cdot p_{max} \quad (\text{A.5})$$

$$\sigma_z(z) = - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{z}{b} \right)^2}} \cdot p_{max} \quad (\text{A.6})$$

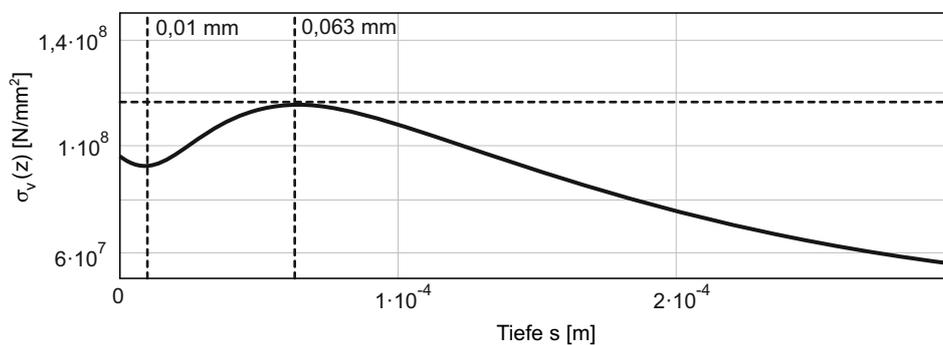


Abbildung A.1: Lage des Vergleichsspannungsmaximums unterhalb der Oberfläche

## A.2 Vergleich der Reibarbeiten und Reibleistungen von Schneidleiste bzw. Honwerkzeug und Kolbenring

Reibarbeit einer Honleiste während eines Hubes bei überlagerter Rotation

$$W_{R\_L\_ges\_Hub} = F_{R\_Leiste} \cdot s_{L\_Hub} = 4,281 \text{ J}$$

$$s_{L\_Hub} = 360,53 \text{ mm}$$

Reibarbeit einer Honleiste im Zwickelbereich während eines Hubes bei überlagerter Rotation

$$W_{R\_L\_ges\_Zwickel} = 2 \cdot \sum W_{R\_L\_ges\_Zw} = 1,702 \text{ J}$$

Reibarbeit des Kolbenringes im Zwickelbereich während eines Hubes

$$\sum W_{R\_Ring\_Zw} = 2,051 \text{ J}$$

Reibarbeit des Kolbenringsegmentes (SRV) im Zwickelbereich während eines Hubes

$$\sum W_{R\_seg} = 0,073 \text{ J}$$

Reibarbeit des Kolbenringsegmentes auf halbem SRV-Schwingweg

$$\sum W_{R\_SRV} = 0,065 \text{ J}$$

Reibleistung einer Honleiste während eines Hubes bei überlagerter Rotation

$$P_{hon\_Hub\_quer} = \frac{F_{R\_Leiste} \cdot \int_0^{\frac{t_{Hub}}{2}} \sqrt{v_{rot}^2 + v_{Hub}(t_{hon})^2} dt_{hon}}{0,5 \cdot t_{Hub}} \dots = 5,124 \text{ W}$$

$$+ \frac{F_{R\_Leiste} \cdot \int_{\frac{t_{Hub}}{2}}^{t_{Hub}} \sqrt{v_{rot}^2 + v_{Hub}(t_{hon})^2} dt_{hon}}{0,5 \cdot t_{Hub}}$$

Reibleistung einer Honleiste im Zwickelbereich während eines Hubes bei überlagerter Rotation

$$P_{hon\_Zw\_quer} = \frac{F_{R\_Leiste} \cdot \int_{t_{ges\_Zw}}^0 \sqrt{v_{rot}^2 + v_{Hub}(t_{hon})^2} dt_{hon}}{t_{ges\_Zw}} \dots = 4,841 \text{ W}$$

$$+ \frac{F_{R\_Leiste} \cdot \int_0^{t_{ges\_Zw}} \sqrt{v_{rot}^2 + v_{Hub}(t_{hon})^2} dt_{hon}}{t_{ges\_Zw}}$$

Reibleistung des Kolbenringes im Zwickelbereich während eines Hubes

$$P_{quer} = 1620,197 \text{ W}$$

Reibleistung des Kolbenringsegmentes im Zwickelbereich während eines Hubes

$$P_{seg\_quer} = 57,421 \text{ W}$$

Reibleistung des Kolbenringsegmentes bei halbem SRV-Schwingweg

$$P_{quer\_SRV} = 2,365 \text{ W}$$

### A.3 Vergleich des Analogieversuches zum Honen im SRV

			niedrige Belastung	hohe Belastung
<u>Parameter Honverfahren (Bsp.):</u>				
Durchmesser	d	[mm]	81	81
Umfang	U	[mm]	254,46	254,46
Drehzahl	n	[1/min]	95	235
Hubgeschwindigkeit	$v_H$	[m/min]	10	25
Anpressdruck	$p_A$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,5	2
Tangentialgeschwindigkeit	$v_T$	[m/min]	24,17	59,80
Gesamtgeschwindigkeit	$v_{Res}$	[m/min]	26,16	64,81
		[m/s]	0,43	1,08
Länge Honleiste	$l_H$	[mm]	80	80
Breite Honleiste	$b_H$	[mm]	2	2
Fläche Honleiste	$A_H$	[mm <sup>2</sup> ]	160	160
Normalkraft	$F_{N,H}$	[N]	80	320
<u>Parameter SRV-Tribometer:</u>				
Schwingweg	s	[mm]	2	2
Länge Honleistensegment	$l_s$	[mm]	10	10
Breite Honleistensegment	$b_s$	[mm]	2	2
Fläche Honleistensegment	$A_s$	[mm <sup>2</sup> ]	20	20
Normalkraft	$F_{N,SRV}$	[N]	10	40
nötige Frequenz zur Abbildung der effektiven Geschwindigkeit	f	[Hz]	109,00	270,06
<u>Vergleich der Leistung:</u>				
	P	[W]		
	<b>Honprozess</b>		34,88	345,68
	<b>SRV</b>		4,36	43,21

Abbildung A.2: Vergleich der Schnittparameter mit der entsprechenden Leistung vom Honen im Realprozess und dem SRV-Versuch zum Honen

## A.4 Streuvektormessungen

Physikalische Kenngrößen für  $\alpha$ -Fe werden angenommen, Peak Fe 211

E-Modul = 220 GPa

Poissonzahl  $\nu = 0,28$

### Bestimmung der Eindringtiefe $\tau$ der Röntgenstrahlung

$$\tau = \frac{1}{2\mu} \cdot \sin \theta \quad (\text{A.7})$$

Bestimmung des linearen Absorptionskoeffizienten  $\mu$  für Fe bei Co  $K\alpha$ -Strahlung

$$\frac{\mu}{\rho} = 52,8 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \quad (\text{A.8})$$

mit der Dichte  $\rho = 7,86 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ergibt  $\mu = 415,008$

Gitterkonstante nach Swanson et al.:  $a_0 = 2,866 \text{ \AA}$

Netzebenenabstand:  $d_{211\text{Co}K\alpha} = 1,1702 \text{ \AA}$

Peakposition für Co  $K\alpha$ :  $2\theta_{\text{Fe}211} = 99,705^\circ$

$\tau_{211\text{max}(\text{Co}K\alpha)} = 9,209 \text{ \mu m}$

### Messung mit Co $K\alpha$ -Strahlung

$$\tau = \frac{\sin^2 \theta - \sin^2 \psi + \cos^2 \vartheta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin^2 \eta}{2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi} \quad (\text{A.9})$$

### Messung in dehnungsfreier Richtung $\psi^*$

$$\psi^* = \arcsin \sqrt{\frac{-2s_1(hkl)}{\frac{1}{2}s_2(hkl)}} \quad (\text{A.10})$$

$$s_1 = \left(-\frac{\nu}{E}\right) = -1,27 \cdot 10^{-6} \text{MPa}$$

$$\frac{1}{2}s_2 = \frac{1+\nu}{E} = 5,81 \cdot 10^{-6} \text{MPa}$$

$$\psi^* = 41,381^\circ$$

Tabelle A.1: Winkel der dehnungsfreien Messung

$\psi^*$ [°]	$\eta$ [°]	$\phi'$ [°]	$\tau$ [μm]
41,381	2,3	87,7	3,1
41,381	11,66	78,34	3,25
41,381	19,05	70,95	3,50
41,381	24,50	65,50	3,75
41,381	29,16	60,84	4,00
41,381	33,40	56,60	4,25
41,381	37,37	52,36	4,50
41,381	41,20	48,80	4,75
41,381	44,97	45,03	5,00
41,381	48,47	41,62	5,25
41,381	52,56	37,44	5,50
41,381	56,54	33,46	5,75
41,381	60,77	29,23	6,00
41,381	65,43	24,57	6,25
41,381	70,87	19,13	6,50
41,381	78,20	11,80	6,75
41,381	90,00	0,00	6,91

$$(\eta + \phi' = 90^\circ)$$

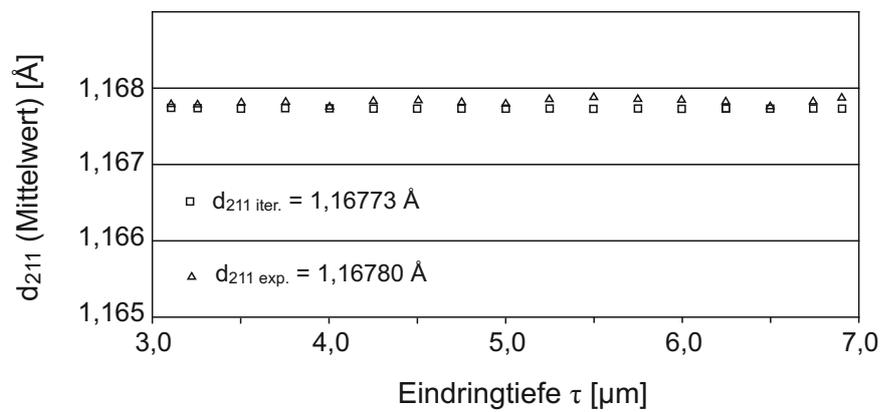


Abbildung A.3: Netzebenenabstand  $d_{211}$  über der Eindringtiefe  $\tau$  in dehnungsfreier Richtung

Die lineare Verteilung der Netzebenenabstände lässt auf einen zweiachsigen Spannungszustand schließen.

$$\tau_{max}(2\theta=99,705^\circ) = 9,209 \mu\text{m}$$

$$\theta = 44,8525^\circ = \text{konst.}$$

Tabelle A.2:  $\eta$ -Messungen von  $\tau = 0,1$  bis  $9,209 \mu\text{m}$ 

$\psi$ [°]	$\phi'$ [°]	$\eta$ [°]	$\tau$ [μm]
70,00	25,125	64,875	0,100
70,00	24,460	65,540	0,250
70,00	23,315	66,685	0,500
70,00	22,125	67,875	0,750
70,00	20,885	69,115	1,000
70,00	15,110	74,890	2,000
70,00	5,400	84,600	3,000
60,00	37,270	52,730	1,000
60,00	30,985	59,015	2,000
60,00	23,830	66,170	3,000
60,00	14,360	75,640	4,000
60,00	5,930	84,070	4,500
50,00	44,320	45,680	3,000
50,00	34,510	55,490	4,000
50,00	29,150	60,850	4,500
50,00	15,350	74,650	5,500
40,00	58,240	31,760	4,500
40,00	41,550	48,450	5,500
40,00	33,120	56,880	6,000
40,00	7,150	82,850	7,000
30,00	62,050	27,950	6,500
30,00	45,900	44,100	7,000
30,00	11,500	78,500	7,900
20,00	74,000	16,000	7,900
20,00	25,750	64,250	8,500
15,00	68,900	21,100	8,500
15,00	6,500	83,500	8,890
10,00	71,000	19,000	8,890
10,00	18,000	72,000	9,050
5	44,000	46,000	9,150
0	0,000	90,000	9,209

### Bestimmung der d-Werte über die Tiefe mit teilweise überlappenden Messungen

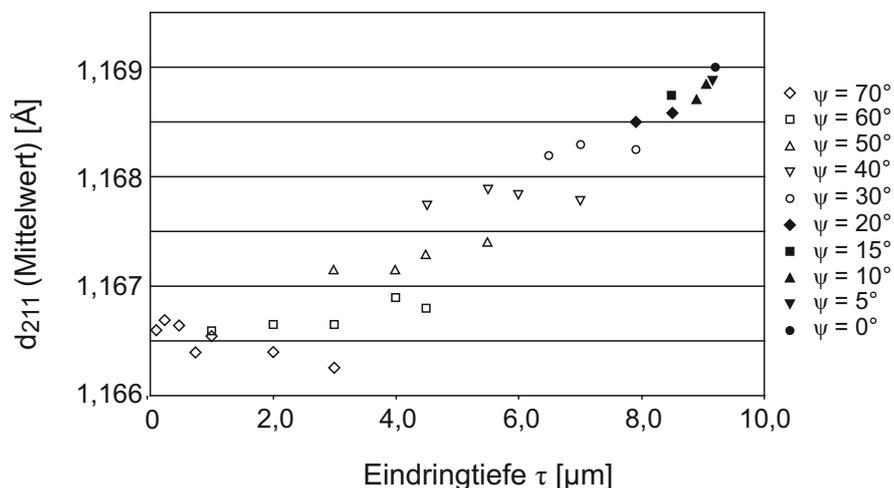


Abbildung A.4: Überlappende Messung der Netzebenenabstände  $d_{211}$  über der Eindringtiefe  $\tau$

### Bestimmung der oberflächenparallelen Eigenspannung $\sigma_{||}$ nach

$$\sigma_{||}(\tau_{eff}) = \frac{d_{\psi}^{+}(hkl, \tau) - d_0(hkl)}{d_0(hkl)F_{||}(hkl, \tau)} \quad (\text{A.11})$$

mit

$$F_{||} = \frac{1}{2}s_2 \sin^2 \psi + 2s_1 \quad (\text{A.12})$$

Die Ergebnisse des Eigenspannungstiefenverlaufs sind in Abbildung 4.26 ersichtlich.