

Finishen

Leicht laufend, hoch effizient

Um den Wirkungsgrad von Dieselmotoren zu steigern, bringt man in die Oberfläche ihrer Zylinderlaufbuchsen Mikroschmieraschen ein, die den Reibwert im Kolbenkontakt senken. Tests bestätigten, dass die Taschen spanend effizienter herstellbar sind als laserunterstützt.

von Berend Denkena und Christopher Schmidt

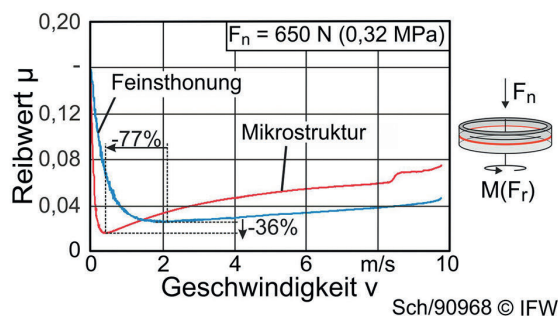
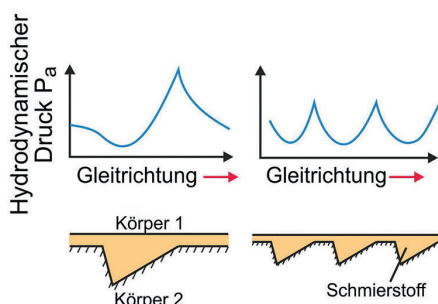
Bei Verbrennungsmotoren, zum Beispiel Dieselmotoren, lassen sich ungefähr zwölf Prozent der auftretenden Verluste auf die innere Reibung zwischen den bewegten Komponenten zurückführen [1]. Hierbei spielt die Reibung zwischen Zylinderlaufbuchse und Kolben eine zentrale Rolle. Auf sie entfallen – in Abhängigkeit vom Lastpunkt – bis zu 60 Prozent der Gesamtverluste aufgrund innerer Reibung [2, 3 und 4].

Die Lauffläche von Zylinderlaufbuchsen wird heutzutage mittels Honen endbearbeitet, um eine möglichst glatte Oberfläche mit einer gemittelten Rauftiefe $R_z < 5 \mu\text{m}$ zu erzeugen, die eine geringe Reibung zwischen Buchse und Kolbenringen ermöglicht. Die so erzeugte Oberfläche hat nur wenig Rauheitsspitzen, an denen Festkörperkontakt zwischen den Reibpartnern auftreten kann. Die gehonte Oberfläche hat zudem Vertiefungen, die den Rückhalt

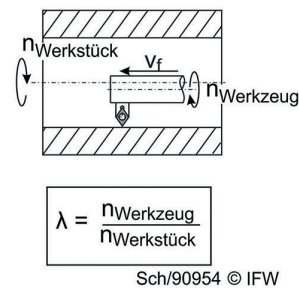
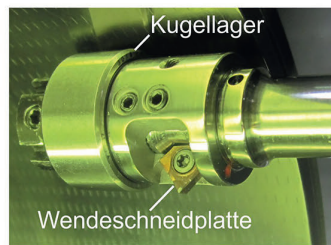
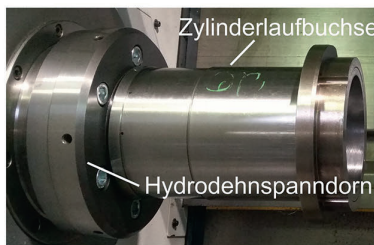
von Schmierstoff ermöglichen, der auf einer ideal glatten Oberfläche seitlich aus der Kontaktstelle gedrückt würde.

Noch weiter gesenkt werden kann die Reibung innerhalb einer Zylinderlaufbuchse, indem man Mikroschmieraschen lokal in die gehonte Oberfläche einbringt (Mikrostrukturierung). Die Taschen fungieren im geschmierten Reibkontakt als Ölrückhaltevolumina, in denen ein hydrodynamischer Druck aufgebaut wird (Bild 2 links), der hilft,

1 Mit solch einem einschneidigen Strukturier-Fräswerkzeug – hier mit externer Abrichtspindel zur Drehzahlsteigerung – lassen sich Mikroschmieraschen genau, produktiv und reproduzierbar in Zylinderlaufbuchsen einbringen (© IFW)

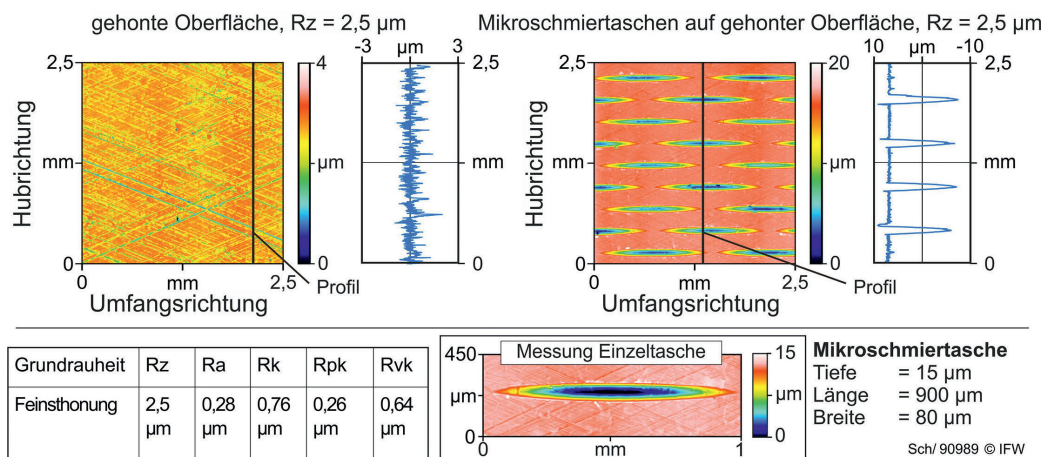


2 Prinzipielle Wirkungsweise von Schmieraschen (links) sowie die Reibungssenkung aufgrund von Mikroschmieraschen (rechts) (© IFW)



3 Prozessprinzip der spanenden Mikrostrukturierung von Zylinderlaufbuchsen (© IFW)

4 Gehonte Zylinderoberfläche (links) und gehonte Zylinderoberfläche mit Mikroschmier-taschen (rechts) (© IFW)

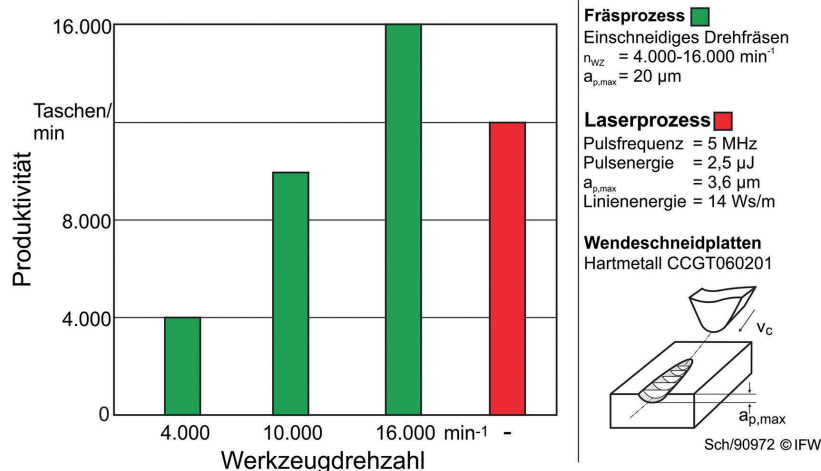


die aufeinander reibenden Oberflächen zu trennen und so die Friktion zwischen Kolben und Zylinderwand mindert.

Eine Oberfläche mit Mikroschmier-taschen zeigt jedoch nur bei bestimmten Relativgeschwindigkeiten des Reib-paares eine reduzierte Reibung, wie in Bild 2 rechts zu erkennen ist. Untersuchungen an einem Tribometer mit gehonten und mikrostrukturierten Pro-

benkörpern haben gezeigt, dass vor allem im Bereich geringer Relativ-geschwindigkeiten die Reibung durch Mikroschmier-taschen reduziert werden kann [5]. Für den Anwendungsfall des Verbrennungsmotors bedeutet das, dass Schmier-taschen besonders in den beiden Kolben-Umkehrpunkten (oberer und unterer Totpunkt) vorteilhaft sind und den Reibwert μ deutlich senken.

Im Rahmen der Versuche zur Effizienzsteigerung bei Schwerlast-Dieselmotoren wurden die Mikroschmier-taschen nicht gelasert, sondern gefräst, und zwar mit einem einschneidigen Fräs Werkzeug, wie es in den Bildern 1 und 3 zu sehen ist. Der Prozess wurde auf einer Drehmaschine CTX520 Linear von Gildemeister durchgeführt. Dabei entstand mit jedem Werkzeugeingriff eine einzelne Mikroschmier-tasche.



5 Produktivität spanender Mikrostrukturierung im Vergleich zum Lasermaterialabtrag (© IFW)

Nur als hoch produktiver Prozess ist Mikrostrukturieren praxisrelevant

Als Prozesskinematik kam das achs-parallele Drehfräsen zum Tragen. Dazu spannt man die Zylinderlaufbuchse auf einem außenrundgeschliffenen Hydrodehnspanndorn mit dem Außendurchmesser $d_a = 130 \text{ mm}$ auf der Hauptspindel der Drehmaschine, während das angetriebene Werkzeug an der Innenfläche der Buchse die Taschen erzeugt. Dabei wird das Werkzeug mit einem konventionellen Radialkugellager an der innen liegenden Zylinderlauffläche abgestützt. Die Abstützung durch das Kugellager ist nötig, um bei Form- oder Lageabweichungen des eingespannten Werkstücks eine gleichbleibende



Schnitttiefe zu erreichen. Mithilfe des Kugellagers lassen sich Rundlauffehler der Buchse bis etwa 20 µm ausgleichen.

Der Vergleich einer gehonten mit einer gehonten und zusätzlich mikrostrukturierten Oberfläche ist in Bild 4 dargestellt. Der Buchsenwerkstoff ist

Gusseisen GJL250. Die Schmiertaschen sind in Hubrichtung im Abstand von $s_{ax} = 0,3 \text{ mm}$ und in Umfangsrichtung im Abstand von $s_{tan} = 1,5 \text{ mm}$ angeordnet und 15 µm tief.

Vor dem Hintergrund der industriellen Herstellung von Zylinderlaufbuchsen muss der Mikrostrukturierprozess hoch produktiv sein, um die Bearbeitungszeit der Buchse kurz zu halten. Dabei gibt es zwei mögliche Ansätze. Einerseits kann die Schneiden-Anzahl des Werkzeugs erhöht werden, was eine proportionale Steigerung der Leistungsfähigkeit bewirkt. Hier besteht jedoch das Problem, dass ein mehrschneidiges Werkzeug mit vertretbarem Aufwand nicht genau genug herstellbar ist. Ursache sind die engen Toleranzen, die für das Erzeugen der Schmiertaschen nötig sind. Weil die Eingrifftiefe je nach Anwendungsfall nur 10 bis 20 µm beträgt, führen kleine Abweichungen der einzelnen Schneidenpositionen dazu, dass die Taschen unterschiedlich tief oder gar nicht gefräst werden. So ist keine ausreichende Prozesssicherheit gegeben.

Eine weitere Möglichkeit, die Produktivität zu steigern, besteht darin, die Drehzahl des Werkzeugs zu erhöhen. Da das Werkzeug einschneidig ist, korreliert die Anzahl gefräster Schmiertaschen mit seiner Drehzahl. Im vorliegenden Fall ist die Drehzahl des angetriebenen Werkzeugs auf 4000 min⁻¹ begrenzt, einen Wert, der eine Produktivität von 4000 Schmiertaschen pro Minute ermöglicht.

Dem Hindernis der begrenzten Drehzahl lässt sich entgegenwirken, indem man eine externe Spindel, wie sie in Schleifprozessen zum Abrichten von Schleifscheiben benutzt wird, in die Drehmaschine integriert. Das steigert die verfügbare Werkzeugdrehzahl auf 16 000 min⁻¹ und erhöht die Leistungsfähigkeit um den Faktor 4.

Mit der gesteigerten Drehzahl gehen auch Herausforderungen einher. Da das Werkzeug die Zylinderlaufbuchse auf der gesamten Innenfläche bearbeiten muss, hat es eine Auskraglänge von 240 mm. Demgemäß treten in Abhängigkeit von der Drehzahl Schwingungen auf. Diese Schwingungen wurden mithilfe einer Modalanalyse untersucht. Die Untersuchung des Werkzeug-Schwingungsverhaltens hat ergeben, dass die kritische erste Eigenfrequenz bei 187 Hz liegt. Weil das Werkzeug

einschneidig ist, entspricht das in diesem Fall der Zahneingriffsfrequenz und damit einer Drehzahl von 11 220 min⁻¹.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde das Werkzeug simulationsbasiert konstruktiv hinsichtlich seiner statischen und dynamischen Steifigkeit angepasst und die Geometrie des Werkzeugs variert. Wegen der gleichmäßigen Spannungsverteilung im Schaft bei Biegung wählte man für das endgültige angepasste Werkzeug einen konischen Schaft.

Zum vergleichbaren Laserprozess ein Produktivitätsplus von 30 Prozent

Infolge dieser Anpassung ließ sich die erste Eigenfrequenz des Werkzeugs auf über 528 Hz erhöhen. Das entspricht einer Drehzahl oberhalb von 30 000 min⁻¹ und ermöglicht die Bearbeitung mit der angestrebten Drehzahl von 16 000 min⁻¹. Diese Produktivität übersteigt die eines beispielhaften Laser-Mikrostrukturierprozesses um 30 Prozent [6]. Der Vergleich der Anzahl gefräster Taschen pro Minute ist in Bild 5 dargestellt.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen also nicht nur, dass es möglich ist, mit spanenden Methoden reibungsminimierende Mikroschmiertaschen in Zylinderlaufbuchsen einzubringen. Es ist vielmehr sogar eine Steigerung der Prozessproduktivität realisierbar, die um den Faktor 4 höher ist als der Ausgangszustand und jene der Laserstrukturierung um 30 Prozent übertrifft.

Dennoch ist die Produktivität weiter zu erhöhen, um das Verfahren mit möglichst geringer Taktzeitverlängerung in die Herstellungskette von Zylinderlaufbuchsen integrieren zu können. Der nächste Schritt ist demzufolge die Steigerung der Praxistauglichkeit der Mikrostrukturierung in Bezug auf einen Einsatz unter industriellen Serienbedingungen. Ein Ansatz hierfür ist die Kombination des Mikrostrukturierprozesses mit dem Ausspindelprozess, der vor dem Honen der Zylinderlaufbuchsen stattfindet. Dieses Ziel wird im BMWi-geförderten Forschungsprojekt »Antriebsstrang 2025« erforscht.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung und Förderung des Projektes DE 447-136-1 mit der Bezeichnung »Tribologisch maßgeschneiderte Zylinderlaufbuchsen«. ■

INFORMATION & SERVICE



LITERATUR

- [1] U. Spicher und J. Hadler: Effizienz und Emissionen von Kraftfahrzeugantrieben. ATZ Extra Vol. 19(7)2014, S. 10–15
- [2] F. Welzel: Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren aus fertigungstechnischer Sicht. Dissertation Dr.-Ing., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014
- [3] J. Beulshausen, S. Pischinger und M. Nijs: Drivetrain Energy Distribution and Losses from Fuel to Wheel. SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. Vol. 6(3) 2013, S. 1528–1537
- [4] J. Affenzeller und H. Gläser: Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren. Wien: Springer Verlag 1996
- [5] J. Kästner: Methode zur spanenden Herstellung reibungsminimierender Mikroschmiertaschen. Dissertation Dr.-Ing., Leibniz Universität Hannover, 2014
- [6] Funktionale Laser-Mikrostrukturierung zur Verschleiß- und Verbrauchsreduktion an hochbeanspruchten Bauteiloberflächen. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojekts »SmartSurf«, 2013

INSTITUT

IFW – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover
30823 Garbsen
Tel. +49 511 762-2533
www.ifw.uni-hannover.de

DIE AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena ist Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover
denkena@ifw.uni-hannover.de

M. Sc. Christopher Schmidt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an diesem Institut
schmidt_ch@ifw.uni-hannover.de