

AKTUELLE TRENDS UND PROBLEMSTELLUNGEN IN DER FERTIGUNG VON ZYLINDERLAUFLÄCHEN VON VERBRENNUNGSMOTOREN

In the research programme "Automotive" running at the Otto-von-Guericke-University of Magdeburg the structuring of cylinder running surfaces is one of the main tasks. In this paper a short summary of innovative techniques for the production of these surfaces is given and the aims of the specific project within the "Automotive" programme are presented.

1. Einleitung

Die Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg hat es sich im Forschungsschwerpunkt Automotive zur Aufgabe gemacht, die Problematik der optimierten Zylinderlauffläche zu beleuchten und Verfahren zur Herstellung dieser Funktionsflächen zu untersuchen. Auf der Basis eines 4 Zylinder 2.0 TDI-Common-Rail Motors der Firma Volkswagen sollen Modifikationen der Laufflächenstruktur generiert und analysiert werden.

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick zu aktuellen Trends in der Herstellung von Zylinderlaufflächen gegeben werden und das Forschungsprofil der Universität Magdeburg bezüglich dieser Thematik dargelegt werden.

2. Das tribologische System

Der mechanische Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren und die ölbedingten Kohlenwasserstoff- und Partikel-Emissionen werden maßgeblich durch die an der Kolbengruppe ablaufenden tribologischen Prozesse bestimmt. Insbesondere bei hohen spezifischen Belastungen beträgt der Anteil der Kolbengruppe an den gesamten mechanischen Reibungsverlusten des Motors bis zu 60 % [1]. Ein besonderes Augenmerk im tribologischen System Kolben-Kolbenring-Zylinderlaufbahn liegt auf der Oberflächenstruktur der Zylinderlaufbahn. Diese Struktur bestimmt maßgeblich das Laufverhalten, den Verschleiß und die Emissionen des Verbrennungsmotors und bietet daher immer wieder Ansatzpunkte für Optimierungen, angefangen bei der Wahl des geeigneten Werkstoffs bis hin zur Bestimmung der tribologisch optimalen Makro- und Mikrogeometrie.

Verbesserungen des gesamten tribologischen Systems und damit auch der Zylinderlaufbahn sollen zu einem niedrigen Ölverbrauch und zu einer geringen inneren Reibung des Motors beitragen. Um dieses Anforderungsprofil erfüllen zu können, sollte die Oberfläche der Zylinderlaufbahn im Idealfall hart und glatt sein, wenig Öl speichern, aber dennoch eine gute Ölhaftung bzw. Ölbenetzbarkeit sowie Mikrostrukturen aufweisen, welche einen hydrodynamischen Druckaufbau begünstigen. Zudem ergeben sich häufig im Motorbetrieb, aufgrund thermischer und mechanischer Einflüsse, Verzüge der Zylinderform, welche die Laufeigenschaften der Kolbenring-Zylinderpaarung stark negativ beeinflussen und den Blow-by-Effekt hervorrufen. Hierbei kommt es zum ungewollten Gasstrom vom Brennraum ins Kurbelgehäuse, der aus konstruktiv- oder fertigungsbedingten Spalten zwischen Kolben und Zylinder herrührt.

3. Fertigungstechnische Ansätze

Um diesen Anforderungen fertigungstechnisch zu begegnen, stehen zurzeit unterschiedliche Verfahren aus Forschung und Industrie zur Verfügung, welche sich konkret, auf Grund der zu erzielenden Strukturdimensionen, in der Erzeugung der Endgeometrie unterscheiden. Zum einen wird auf die Generierung einer definierten Makrostruktur der Lauffläche hingearbeitet.

Hierbei sollen Verzüge der Zylinderbohrung, welche durch thermische Ausdehnung und statische sowie dynamische Krafteinwirkung resultieren, vorgehalten werden (Abb. 1).

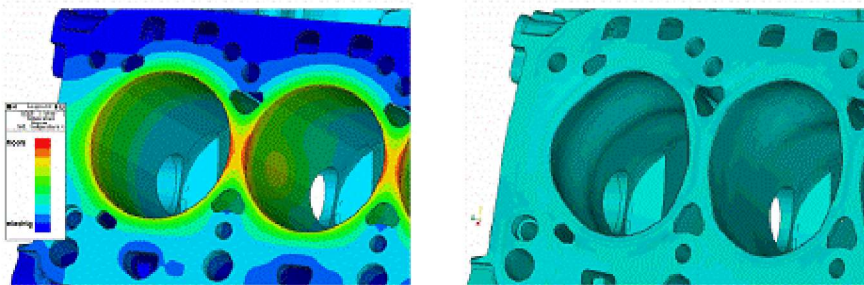


Abb. 1: Verzüge der Zylinderbohrungen im Motorbetrieb [2]

Um im Motorbetrieb eine annähernd optimal zylindrische Hauptbohrungsgeometrie sicherzustellen, wird serienmäßig das Honen mit einer sogenannten Honbrille durchgeführt. Diese Honbrille wird mittels Zylinderkopfschrauben auf den Zylinderenden fest verschraubt und deformiert somit gezielt die Zylinderkonturen. Nachdem der Honprozess beendet ist, wird die Honbrille wieder entfernt und der Zylinder dehnt sich in seine Ausgangsform zurück. Dieses Verfahren eignet sich zur Erzeugung von Zylinderformabweichungen der Ordnung entsprechend der Anzahl an Schraubverbindungen je Zylinder. Einen wesentlichen Nachteil gegenüber anderen Verfahren stellt der zusätzliche Arbeitsgang des Verspannens der Zylinder dar, da hierbei die Taktzeit der Honbearbeitung erhöht wird. Zudem sind die Zylinderschrauben, speziell das Schraubengewinde, in ihrer Lebensdauer begrenzt, da durch die hohen Drehmomente beim Auf- und Abschrauben der Kopfschrauben die Gewinde verschleifen. Eine typische Lebensdauer der Schrauben liegt bei 5 bis 20 Verwendungen [3]. Neuere Ansätze zur Steigerung der Schrauben-Lebensdauer gehen dahin, die Verspannung mit separater Aufbringung der Verformungskraft, beispielsweise durch hydraulische

Spanneinrichtungen oder Federn, zu realisieren, sodass die Schrauben lastfrei eingedreht werden können [3]. Deutliche Vorteile bietet dieses Verfahren hinsichtlich der Definition der zu erzeugenden Geometrie und ihrer anschließenden messtechnischen Erfassung, da als Bezug die Kreis- bzw. die Zylinderform angenommen werden kann. Um die im Motorbetrieb durch thermische Verzüge sich einstellende Zylinderformabweichung in der Vorbearbeitung zu berücksichtigen, kann das Zylinderkurbelgehäuse während der Bearbeitung zusätzlich extern erhitzt werden. Lediglich das Vorhalten der dynamischen Deformation im Motorbetrieb kann durch den Einsatz einer Honbrille nicht realisiert werden.

Hier setzt das Verfahren des sogenannten Freiformhons an, bei dem ein adaptives Honwerkzeug zum Einsatz kommt, das im Vorfeld festgelegte Vorhaltekonturen in die Zylinderlauffläche einbringt. Über die aktiv gesteuerte Variation des Anpressdrucks wird ein örtlich unterschiedlicher Materialabtrag hervorgerufen. Durch die pulsierende radiale Aufweitung des Werkzeuges über Graduierung des Zustelldrucks oder durch den Einsatz piezoaktorischer Komponenten können laut Entwickler komplexe Strukturen und Zylinderformabweichungen bis zur 8. Ordnung durch Überlappung kurz- und langwelliger Pulse gezielt erzeugt werden. Ein hierbei verwendetes Werkzeug mit dynamischer Zustellung einzelner Formhonleisten zeigt *Abb. 2*.

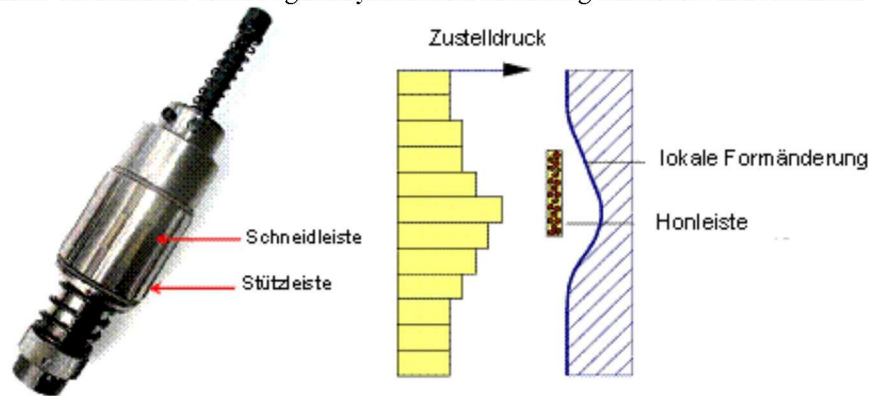


Abb. 2: Formhonwerkzeug [4]

Analog zur Herstellung der Makrostrukturen zielen weitere Fertigungsverfahren auf die Generierung definierter Mikrostrukturen der Lauffläche ab. Die dafür eingesetzten Fertigungsverfahren können wie folgt untergliedert werden:

- Spanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide
- Honen
- Läppen
- Strahlspanen
- Magnetabrasive Bearbeitung
- Optische Verfahren
- Laserstrukturieren
- UV-Photonen Laserbelichten
- Beschichtungsverfahren
- Galvanische Verfahren
- Thermische Verfahren
- Plasmaspritzen
- Lichtbogen-Drahtspritzen
- Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen
- PTWA-Spritzverfahren (plasma transferred wire arc).

Den eigentlichen Kernprozess in der Herstellung der Mikrogeometrie von Zylinderlaufflächen stellt das Honverfahren dar. Hierbei wird eine kreuzförmige Struktur von kommunizierenden Riefen zur Schmierstoffspeicherung erzeugt. Um zusätzliche Mikrokavitäten zu schaffen, werden aktuell weitere Fertigungsverfahren dem Honprozess angegliedert. Beim Laserstrukturieren werden mit einem Nd:YAG Laser gezielt Mikrotaschen in die Oberfläche eingebracht und somit eine definierte, systematisch angeordnete Textur in der Größenordnung $10 \times 50 \mu\text{m}$ (T x B) erzeugt (*Abb. 3*).

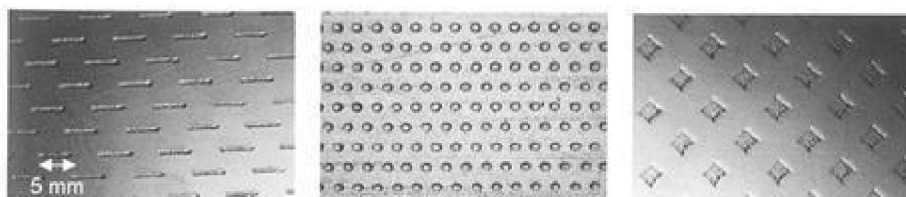


Abb. 3: Oberflächentopografie beim Laserstrukturieren [5]

Im Gegensatz zur geometrisch definierten Strukturierung setzt das Konzept der UV-Photonen Laserbelichtung bei Grauguss mit Graphitlamellen (GJV) auf die Generierung von Schmiertaschen durch Freilegung von vorhandenen Strukturen. Hierbei erfolgt ein Verdampfen der obersten Schicht mit einem Excimer-Laser entlang der gesamten Zylinderbohrung. Neben dem Freilegen der Graphitlamellen, welche als Schmiertaschen dienen, hat das Verfahren den Vorteil, dass sich eine nanokristalline Schicht mit hohem Stickstoffanteil bildet, die der Lauffläche keramische Eigenschaften verleiht (*Abb. 4*). Diese Oberfläche weist

nach der Herstellung keinerlei systematische Honstrukturen auf.

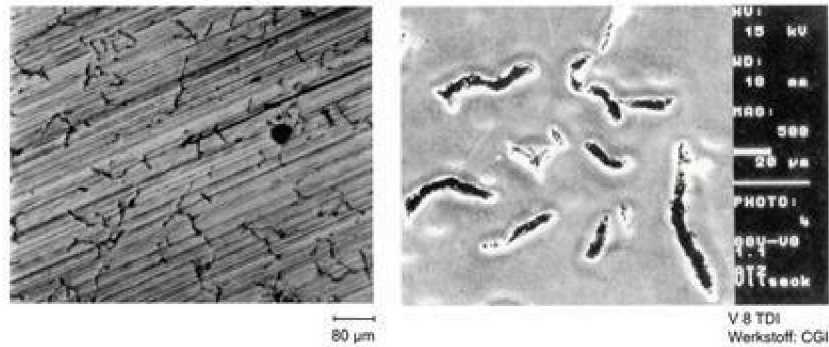


Abb. 4: Oberfläche links vor und rechts nach dem UV-Photonen Laserbelichten [6]

Neben den optischen Bearbeitungsverfahren kann auch über mechanische Fertigungsverfahren eine schmierstoffspeichernde Oberfläche erzeugt werden. Beim Konzept der thermischen Beschichtung wird eine poröse Oberflächenschicht mit Hartstoffpartikeln und Hohlräumen zur Schmierstoffspeicherung erzeugt. Diese Hohlräume und keramischen Hartstoffe des Metall-Matrix-Verbundwerkstoffes werden durch das Honen freigelegt (Abb. 5).

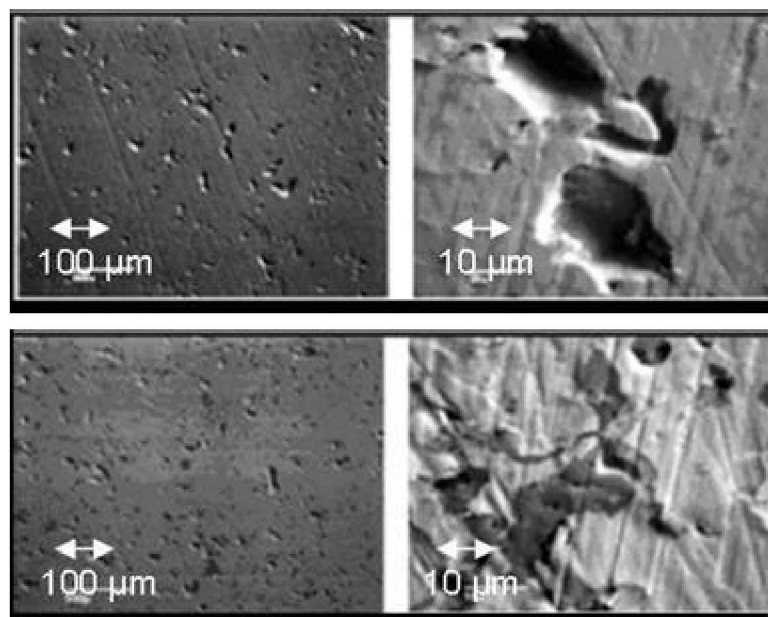


Abb. 5: Gehonnte Spritzschicht [7]

Eine weitere Möglichkeit der Freilegung von Strukturen bietet das Strahlspanen. Hierbei wird beispielsweise über einen Fluidstrahlprozess lose anhaftendes Material von der Oberfläche entfernt. Die Wirkungsweise besteht in der Kombination mit der Gusslegierung, also hauptsächlich über die Ausbildung kleiner, kraterähnlicher Metallausbrüche. Diese entstehen gesteuert über Titancarbid- und Titanitride während der Honbearbeitung. Das Fluidstrahlen bewirkt ein Offenlegen dieser Metallgrübchen und ein Freilegen verschmierter Honriefen (Abb. 6).

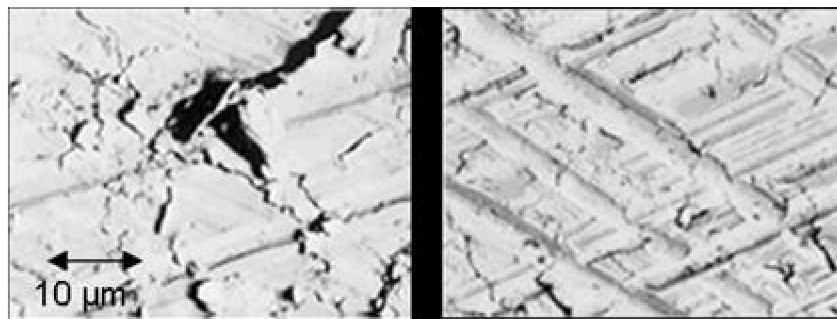


Abb. 6: Gehonnte und fluidgestrahlte Oberfläche [8]

Weitere Potentiale bietet eine Weiterentwicklung der Honstruktur, welche über eine Vergrößerung des Honwinkels realisiert werden kann [6]. Durch diese Anpassung soll die Reibleistung verringert und der Verschleiß reduziert werden, da abgelöste Partikel besser an der Zylinderwand abgleiten.

4. Der geplante Projektinhalt

Im Forschungsschwerpunkt Automotive der Universität Magdeburg sollen anhand von tribologischen Untersuchungen an bestehenden Zylinderoberflächen in Bezug auf die Anforderungen im Motorbetrieb eines 4 Zylinder 2.0 TDI-Common-Rail

Motors Eigenschaften von Laufflächentopografien ermittelt werden. Hierzu werden Softwaretools zur Berechnung und numerischen Simulation von tribologischen Parametern im Kolbenring-Zylinderkontakt auf Basis der Reynoldsschen Differentialgleichung, der Verformungsgleichung und der Energiegleichung erarbeitet und diese mit kommerziellen Programmen zur Mehrkörpersimulation gekoppelt. Im Rahmen des geplanten Forschungsvorhabens soll unter Berücksichtigung der Oberflächenstrukturen an Linien- und Flächenkontakten örtlich aufgelöst an den Mikrokontakten sowohl die Verformung, die Reibungskraft als auch die Temperatur und der Verschleiß berechnet werden. Nach der Analyse existierender Oberflächen sollen weiterhin Empfehlungen zur Fertigung tribologisch optimierter Mikrostrukturen für Laufflächen gegeben werden. Daraufhin wird unter Anwendung des Honverfahrens eine iterative Annäherung an diese Strukturempfehlungen erfolgen. Ausgewählte Strukturen werden anschließend im Schwingungs-Reibverschleiß-Prüfstand auf ihre tribologischen Kenngrößen hin untersucht und bewertet. Eine abschließende Bewertung der erzeugten Strukturen soll in Motortestläufen erfolgen, *Abbildung 7*.

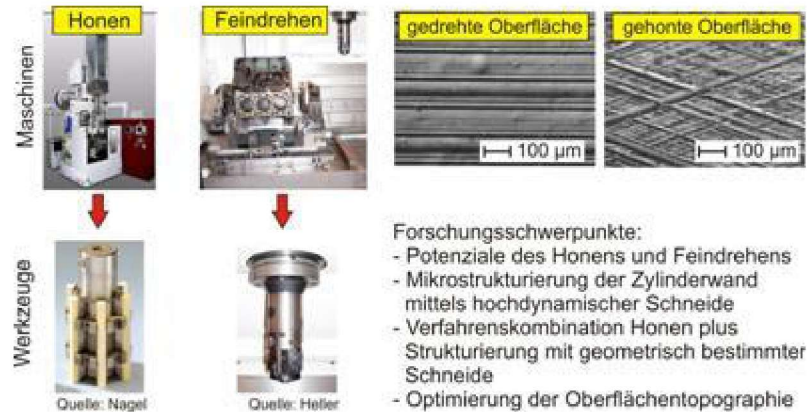


Abb. 7: Forschungsschwerpunkte am IFQ

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Fertigung definierter Strukturen sind Untersuchungen zum Feindreihen und Glattwalzen der Oberfläche vorgesehen. Durch einen fertigungstechnisch günstigen Walzprozess kann die Laufflächenrauheit definiert eingestellt werden, Graphiteinschlüsse freigelegt und günstige Druckeigenspannungen in der Randzone erzeugt werden. Zudem liegen die Fertigungskosten des Walzens weit unterhalb von denen des Honprozesses. Des Weiteren sind Untersuchungen im Hinblick auf den Einsatz adaptronischer Werkzeuge zur Feinstbearbeitung mit definierter Schneide vorgesehen. Mit diesen Werkzeugen sollen Makrogeometrie, also definierte Zylinderformabweichungen, und Mikrogeometrie, also definierte Mikroschmieraschen, in einem Arbeitsgang erzeugt werden.

Literatur: 1. *Golloch, R.; Kessen, U.; Merker, G. P.*: Tribologische Untersuchungen an der Kolbengruppe eines Nfz-Dieselmotors. MTZ Motortechnische Zeitschrift 63 (2002) 6, S. 494-500. 2. *Conze, T.; Munier, J.*: Interaktion von Kolben und Zylinderlaufbahn bei einem Hochleistungs-Ottomotor. VDI Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel 2008, VDI-Berichte Nr. 1994, S. 17-31. 3. *Weigmann, U.-P.*: Formhonen von Kolbenlaufbahnen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 63. Ausgabe, 2007, S. 298-318. 4. *Flores, G.; Klink, U.; Abeln, T.*: Honen von Funktionsformen in Zylinderkurbelgehäusen. VDI Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel 2008, VDI-Berichte Nr. 1994, S. 79-90. 5. Firmenschrift der Firma Gehrting. 6. *Schmid, J.*: Optimiertes Honverfahren für Gusseisen-Laufflächen. VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel 2006, VDI-Bericht Nr. 1906, S. 217-236. 7. *Barbezat, G., Schmid, J.*: Plasmabeschichtung von Zylinderkurbelgehäusen und ihre Bearbeitung durch Honen. MTZ Motortechnische Zeitschrift 62 (2001) 4. 8. *Klink, U.; Flores, G.*: Honen - Fortschritte durch optimierte Werkzeuge. VDI-Z 143, Nr. 6 (2001), S. 49-56.

Поступила в редакцию 15.03.09