

ALTERNATIVE STRATEGIEN IN DER FERTIGUNG VON ZYLINDERLAUFLÄCHEN

Im Zuge des steigenden Kostendrucks in der Fertigung und unter Beachtung der streng reglementierten Schadstoff-Emissionsgrenzen von Verbrennungsmotoren werden vom IFQ alternative Technologien zur effizienten Herstellung leistungsoptimierter Zylinderlaufflächen untersucht. Hierbei stehen die Mikrostruktur der Oberfläche und die daran anschließende Werkstückrandzone im Fokus der Betrachtungen. Die Ziele bestehen zum einen in der Erforschung und Etablierung robuster und kostengünstiger Alternativen zum Laserstrukturieren, dem sogenannten Laserhonen, und weiterhin in der Analyse und Optimierung von Serienhonorverfahren in Bezug auf die Reduzierung von Reibung und Verschleiß im Motorbetrieb. Diesbezüglich werden unterschiedliche Honstrukturen von Grauguss-Laufflächen auf ihre Eigenschaften während des Motorbetriebs untersucht und Empfehlungen zur Konditionierung von Laufflächen durch geeignete finale Fertigungsverfahren beschrieben.

Aktuellen Studien zu Folge wird sich der Automobilabsatz in den nächsten Jahren deutlich in die Schwellenländer und Südostasien verlagern. Bereits heute finden 66 % aller Neuinvestitionen in Motorenwerke in Asien statt [1]. Auch die aufkommende Konkurrenz durch den Elektroantrieb übt einen hohen Kostendruck auf die Motorenfertigung aus. Speziell auf dem Gebiet der Fertigung von Zylinderlaufflächen müssen daher Potentiale in der Leistungssteigerung durch die Reduktion von Reibung und Verschleiß sowie in wirtschaftlichen und qualitätssteigernden Fertigungsprozessen geschöpft werden. In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Automotive an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg Untersuchungen zu Finishverfahren, wie beispielsweise Honen, von Zylinderlaufflächen von Verbrennungsmotoren durchgeführt. Der nachfolgende Beitrag zeigt alternative Mikrostrukturierungstechniken auf und beschreibt Modellversuche zur Validierung von Mikrostrukturen im Tribosystem Kolbenring/Zylinderlauffläche.

1. Mikrostrukturierung zur Herstellung geometrisch definierter Schmierstoffspeicher

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. Da dieses Verfahren sehr kostenintensiv ist, soll im aktuellen Forschungsvorhaben ein mechanisches Bearbeitungsverfahren entwickelt werden, welches kostengünstiger arbeitet und ähnliche Bearbeitungsergebnisse aufweist.

Die Vorteile der Strukturierung von Laufflächen wurden bereits in zahlreichen Veröffentlichungen dargelegt. In Abbildung 1 werden die einzelnen Funktionen der Laufflächenstruktur erläutert. So stellt die sehr feine tragende Struktur 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 die Reibung bei vermindertem Ölverbrauch reduziert und der Verschleiß der Laufflächen herabgesetzt werden. Die Dimension dieser Struktur ist abhängig von der mechanischen Belastung der Zylinderinnenwand, gekennzeichnet durch Lastverlauf, Geschwindigkeit, Innendruck, Temperatur, Schmierstoffeigenschaften etc., in Bereichen von 1 - 3 mm; 30 – 60 µm; 25 – 50 µm (L; B; H). Die Ausrichtung der Struktur verläuft tangential zum Bohrungsumfang und erstreckt sich axial im Bereich des oberen Totpunktes auf 2 – 4 cm. Das beschriebene Verfahren ordnet sich im Herstellungsprozess von Laufflächen vor bzw. nach der letzten Honoperation ein.

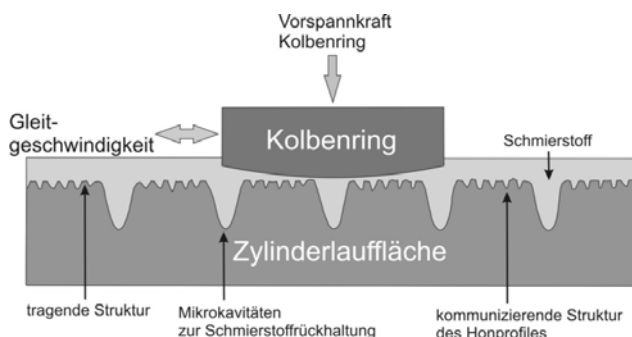


Abbildung 1: Tribologisches System Kolbenring – Zylinderlauffläche

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 (Schmelzrückstände) gekennzeichnet, sodass über eine nachfolgende Honoperation diese Aufschmelzungen und Oxidaufwürfe entfernt werden müssen (Abbildung 2).

Das Profil der Laserfurchen weist dagegen eine sehr raue Oberfläche auf, welche sich im Hinblick auf Haftungseffekte sehr gut zur Ölspeicherung eignet [2]. 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 sogenannten Fertighonen, werden die Oxidaufwürfe entfernt und eine sehr feine plateauartige Gleitfläche ausgebildet [3].

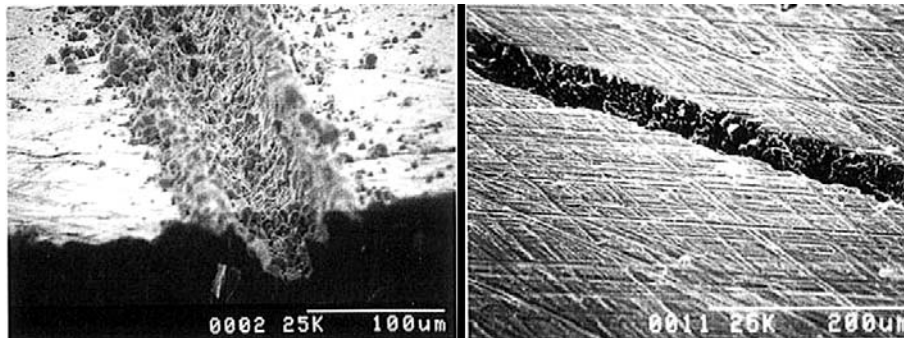


Abbildung 2: Laserstruktur mit Schmelzaufwürfen [Quelle: Fa. Gehring]

Aus tribologischer und fertigungstechnischer Sicht liegen die Vorzüge und Ziele der definierten Mikrostrukturierung von Laufflächen in:

- der Aufrechterhaltung einer Flüssigkeitsreibung mit hydrodynamischer Vollschnierung,
- der Schaffung einer Oberflächentopografie mit funktionsgerechtem Schmierstoffhaltvolumen 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.

Der primäre Beitrag des Verfahrens zu den Zielen von Motorenentwicklern lässt sich in folgenden Punkten darlegen:

- Ölverbrauchsreduzierung,
- Emissionsverbesserung,
- höherer Wirkungsgrad durch Reibleistungsreduzierung,
- Minderung des Kraftstoffverbrauches,
- Verschleißreduzierung.

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 Grauguss, die in der

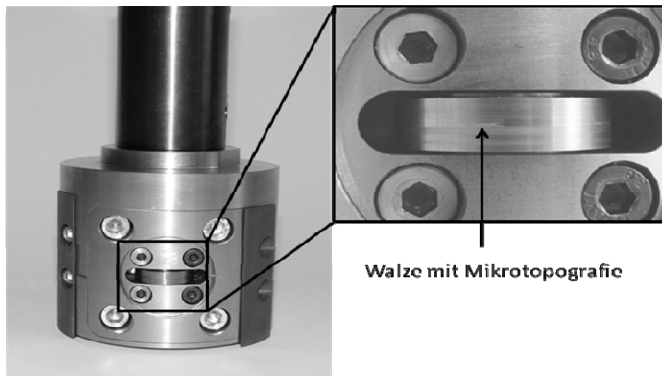


Abbildung 3: Mechanisches Werkzeug zur Mikrostrukturierung von Bohrungen

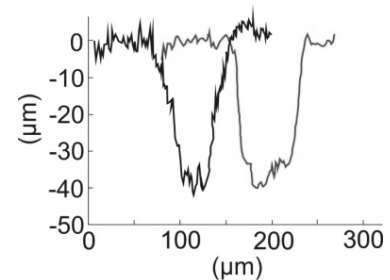
heutigen Zeit noch den Großteil der automobilen Serienproduktion ausmachen. Eine deutliche Abnahme des progressiven Einlaufverschleißverhaltens konnte ebenfalls beobachtet werden [4]. In Untersuchungen zur Gesamtpartikelemission eines Dieselmotors konnten Vorteile im Bereich von 20 – 25 % errungen werden [3]. Diese Ergebnisse konnten in weiteren Untersuchungen auf den starken Anstieg der Ölfilmstärke im Bereich der Strukturierung zurückgeführt werden. In letzter Konsequenz kann dieses Verfahren also den Kraftstoffverbrauch um bis zu 4 % senken.

Weitere Anwendungsgebiete der Mikrostrukturierung in der Optimierung von Tribosystemen liegen in der Herstellung von Führungsbahnen, Gleitbuchsen, Kolbenbolzen,

Gleitringdichtungen, Steuerbuchsen, Ziehwerkzeugen, Umformwerkzeugen und Steuerkolben.

Durch das am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) entwickelte mechanische Werkzeug können dem Laserstrukturieren entsprechende Bearbeitungsergebnisse generiert werden und Oxidaufwürfe sowie thermischen Randschichtbeeinflussung während des Bearbeitungsprozesses vermieden werden.

Über profilierte/strukturierte Hartstoffwalzen, welche mechanisch oder hydraulisch auf die Werkstückoberfläche gepresst werden, kann ein definiertes Profil zur Schmierstoffspeicherung erzeugt werden. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeugkonzept mit mehreren Funktionen. Neben der aktiven Strukturierung mittels einer profilierten Walze führen zwei vorauslaufende Walzen eine Glattwalzbearbeitung und somit eine Einebnung der Profilspitzen aus. Die Abbildung 3 zeigt den



— laserstrukturiert
— mechanisch strukturiert

Abbildung 4: Vergleich der Profilschnitte der Laser- und Walzstruktur

Bearbeitungskopf mit der Strukturierungswalze, welche stufenlos und kraftgebunden zugestellt werden kann. Somit können einerseits Profiltiefe und laterale Profilausdehnung angepasst werden und andererseits radiale Formabweichungen kompensiert werden. Auf dem Walzenumfang befinden sich definierte Positivstrukturen, welche ein bestimmtes Profil auf die Zylinderlauffläche prägen. Mit dem hier vorgestellten Werkzeug können Kostenvorteile im Investment und der Prozesszeit erzielt werden. Dieses Konzept reduziert die Bearbeitungskomplexität und steigert somit die Prozessstabilität der Fertigung von funktionsfähigen Laufflächen. Literaturangaben zu Folge liegt die Bearbeitungszeit für die Strukturierung eines kompletten Zylinders mittels Laser vom Durchmesser 80 mm und der Länge von 150 mm im Bereich von 25 s [5]. In Voruntersuchungen, welche am IFQ durchgeführt wurden, war es möglich über ein mechanisches Umformwerkzeug eine Prozesszeit von unter 10 s zu realisieren. Einen vielversprechenden Ansatz bietet die Möglichkeit über dieses Verfahren definierte keilförmige Strukturen zu applizieren. Im Gegensatz zur Laserstruktur kann ein Walzprofil schräg abfallende Kanten geometrien erzeugen, welche nachweislich den hydrodynamischen Druckaufbau und somit die Gleiteigenschaften begünstigen (Abbildung 4) [6].

Deutlich wird dies am Beispiel des sich verengenden Schmierpaltes am Gleitlager. Des Weiteren bietet dieses Konzept die Möglichkeit der Reduktion von Fertigungsprozessschritten durch Kombination von Bearbeitungsprozessen.

Als weiteres Strukturierungsverfahren wurde das Mikrogravieren untersucht. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeug, welches eine Hartmetallnadel mit definierter Spitzengeometrie pneumatisch auf eine Oberfläche einwirken lässt (Abbildung 5).

Die Eignung dieser Kinematik zur Erzeugung von definierten Kavitäten konnte bisher nur bedingt belegt werden, da die Spitzengeometrie entscheidend für die Ausprägung der Kavitäten und ggf. der Gratbildung ist.

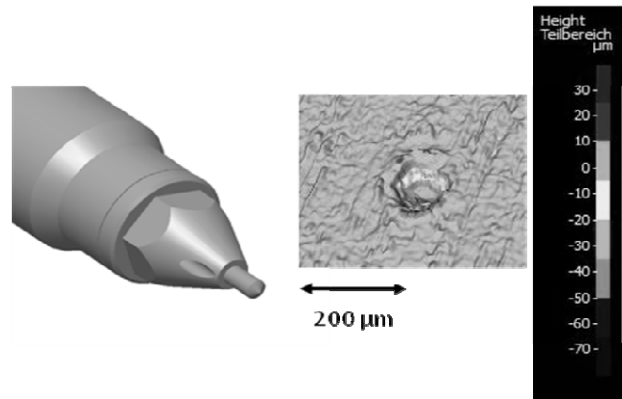


Abbildung 5: Gravierwerkzeug zur Erzeugung definierter Kavitäten

2. Optimierte Finishbearbeitungsverfahren zur Herstellung geometrisch undefinierter Schmierstoffspeicher und tragfähiger Strukturen

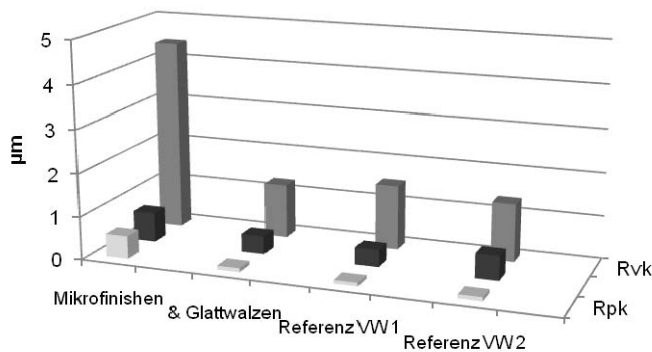


Abbildung 6: Vergleich der Kennwerte der Abbot-Kurve beim Mikrofinishen und Glattwalzen in Bezug zur Referenz von Volkswagen

mechanischen Komponenten eines tribologischen Systems so zu fertigen, dass diese verschleiß- und reibungsarm im Betrieb laufen. Zu Beginn der tribologischen Lasteintragung stellt sich durch erhöhten Verschleiß ein stabiles Oberflächenprofil im Kontaktpaar ein, welches speziell durch eine sehr geringe Spitzenrauheit gekennzeichnet ist. Um diesen Einfahrprozess in der Fertigung vorwegzunehmen, wurden Untersuchungen zu einem umformenden Fertigungsverfahren, dem Glattwalzen, durchgeführt. Durch den Einsatz dieses Verfahrens können Rauheitsspitzen plastisch umgeformt und die Randschicht leicht verfestigt werden, was wiederum einer progressiven Verschleißentwicklung vorbeugt [7]. Als Referenz in der Fertigung von Laufflächen durch die Verfahrensfolge Mikrofinishen (Honen) und Glattwalzen diente eine eingelaufene Zylinderlauffläche eines 2,0 l TDI Motors aus Grauguss (Abbildung 6).

In der Serienfertigung von Zylinderkurbelgehäusen stellt das Honverfahren den dominierenden Prozess der Finishbearbeitung von Laufflächen dar. In Abhängigkeit der geforderten Oberflächentopografie werden bis zu drei Honstufen durchlaufen. In der ersten Honstufe erfolgen die Einstellung der Form- und Maßanforderungen der Zylinderbohrung sowie die Herstellung eines kommunizierenden Riefensystems zur Schmierstoffspeicherung. Die zweite Honstufe erzeugt ein tragfähiges Plateau zur Lagerung des tribologischen Gegenkörpers. In der letzten Honstufe erfolgt die Reduzierung der Spitzenrauheit durch den Einsatz feinkörniger Honleisten. Ziel ist es die

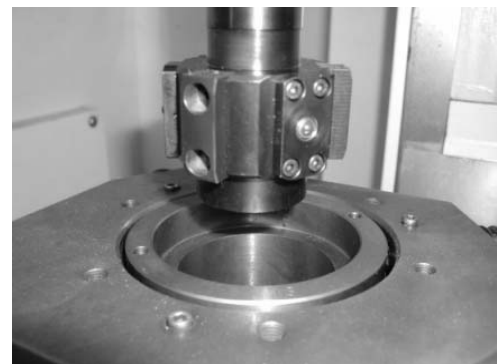


Abbildung 7: hydrostatisches Glattwalzwerkzeug

Weiterhin konnte ein hydrostatisches Glattwalzwerkzeug für die Innenbearbeitung in diesem Zusammenhang weiterentwickelt werden (Abbildung 7). Die Einbindung dieses Werkzeuges in den Honprozess als Substitution der letzten Honstufe ist Bestandteil der weiteren Forschungsarbeiten.

Zur Verifikation von gefertigten Oberflächen erfolgen Analogieversuche an einem Schwing-Reib-Verschleiß-Prüfstand (SRV). Hierbei wird ein Kolbenringsegment gegen einen Zylinderausschnitt oszillierend gefahren. Die Abbildung 8 zeigt in diesem Zusammenhang erste Ergebnisse der Reibleistungsanalyse an unterschiedlich gehonten Oberflächen. Hier wird der Einfluss des Honwinkels auf den hydrodynamischen Druckaufbau deutlich. Es wurden unterschiedlich texturierte Oberflächen untersucht. Die für eine gehonte Lauffläche typische symmetrische Kreuzriefenstruktur variierte von 45° bis 140° . Im Zustand der Vollschrimerung führt ein steiler Honwinkel zu erhöhter Reibung. Die Versuche fanden unter Vollschrimerung, einer Normalkraft von $F_N = 200 \text{ N}$ und einer Frequenz von $f = 20 \text{ Hz}$ statt.

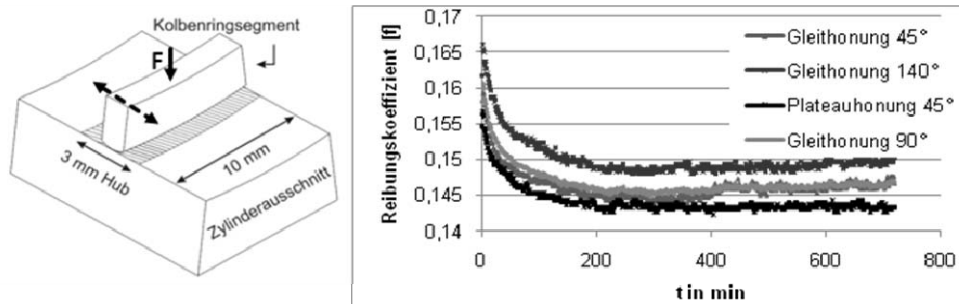


Abbildung 8: SRV-Untersuchungen an unterschiedlichen Honstrukturen

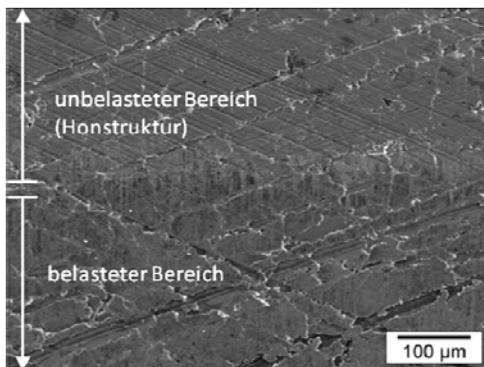


Abbildung 9: REM Aufnahme einer SRV Probe

Dieses Modell muss im Kontext mit seinen Grenzen betrachtet werden. So können beispielsweise keine Makroverzüge und Verbrennungseffekte, wie Rußbildung, berücksichtigt werden. Über eine Dosiervorrichtung lässt sich jedoch ein definierter Schmierzustand, ähnlich dem Schmierstoffangebot am oberen Totpunkt des Zylinders einstellen. Anhand des errechneten Reibungskoeffizienten kann lokal die Dauer des Einlaufprozesses wiedergegeben werden, welche Aussagen über den Anfangsverschleiß und die Qualität der Fertigung zulässt.

Abbildung 9 zeigt in diesem Zusammenhang einen negativen Effekt im Einklang mit der Reduzierung von Spitzenrauheiten und der Erzeugung tragfähiger Plateaus während des Einlaufs. Es kommt zu einer Ausprägung von Verschuppungen, welche sich als leicht ablösbare Partikel am Rand der Honriefen ablagern. Hierbei handelt es sich nicht um Werkstoffpartikel, welche aufgrund des Erreichens der Umformgrenze und der lokalen Überschreitung der Fließgrenze aus dem Gefüge „brechen“ sondern vielmehr um ganze Segmente, welche über eine Kante der Honriefe geschoben werden, in sich relativ

unbeansprucht vorliegen und nur am Rand aufreißen, so genannte Schuppen. Somit erhöht sich das Verschleißvolumen mit steigender Riefenzahl bei gleicher äußerer Belastung. Durch die Riefen werden Schubspannungen der äußeren Last normal zu einer freien Oberfläche bezogen auf den senkrechten Rand der Riefe erzeugt. Diese können nicht durch weiteres Material absorbiert werden und führen zu Spannungsspitzen und Bruch. Es muss somit das Ziel der Fertigung sein diese Verschuppungen der Oberfläche weitestgehend zu vermeiden.

Zusammenfassung

Die Vielfältigkeit der Möglichkeiten zur Optimierung des Fertigungsprozesses von Zylinderlaufflächen konnte hier in aller Kürze aufgezeigt werden. Es konnte die Machbarkeit der mechanischen Strukturierung und umformenden Bearbeitung von Laufflächen belegt werden. Begleitende Untersuchungen zu geometrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften der erzeugten Oberflächen sind wesentlicher Bestandteil einer abschließenden Bewertung. Jedoch können nur kostenintensive Motorenprüfläufe die vorgestellten Optimierungsansätze endgültig verifizieren.

Quellen:

1. Powertrain-Studie von IAV Tochter Consulting4Drive (C4D), 2010
2. Klink, U.; Flores, G.: Laser-Strukturierung von Zylinderlaufbahnen. 9. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, 1999
3. Abeln, T.: Laserstrukturierung - Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. VDI Berichte Nr. 1810, 2003
4. Karrer, E.: Untersuchungen zum Reibungsverhalten und Ölverbrauch der Kolbengruppe von Verbrennungsmotoren. Dissertation, RWTH Aachen, 2009
5. Lensch, G.: Oberflächenbearbeitung mittels Nd: YAG Hochleistungslasern und speziellen Strahlwerkzeugen, insbesondere für die Material-Innenbearbeitung in Zylindern. Rennsport und Serie-Gemeinsamkeiten und gegenseitige Beeinflussung, Expert-Verlag, 2003
6. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y., Zhu, D., Wang, Q. J.: Microtextures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. Tribology Letters, 29(3), pp. 241-252, (2008)
7. Akkurt, A.: Comparison of Roller Burnishing Method with other Hole Surface Finishing Processes applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, Aug. 2010