

Untersuchungen an plasmabeschichteten Zylinderlaufflächen

Der Kraftstoffverbrauch von Verbrennungsmotoren wird wesentlich durch die mechanischen Reibungsverluste beeinflusst. Insbesondere für den Teillastbetrieb ermöglicht eine Absenkung der Reibungsverluste eine Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und damit auch der Schadstoffemissionen. Das bei der FEV Motorenteknik entwickelte Reibungsmesssystem PIFFO ist wegen seiner stabilen, kompakten Bauweise ein komfortables Instrument, um Einblick in die Entstehungsmechanismen von dynamischen Reibkräften an der Kolbengruppe eines Einzylinder-Verbrennungsmotors zu geben.

1 Einleitung

Durch die Auswahl und Bearbeitung des Zylinderrohrmaterials beziehungsweise dessen Oberfläche sind Möglichkeiten für reibungsreduzierende Maßnahmen an Triebwerken gegeben. Bei Pkw-Motoren werden unter anderem aus Leichtbaugründen, besserer Wärmeleitfähigkeit und geringerer Wärmekapazität Kurbelgehäuse aus Grauguss immer mehr durch Aluminiumkurbelgehäuse substituiert. Dieser Einsatz bedingt unterschiedliche Ausführungskonzepte von Laufflächen, von denen im Folgenden eine Graugussbuchse und eine plasmabeschichtete Lauffläche messtechnisch hinsichtlich ihres Reibungsniveaus miteinander verglichen werden. Die Graugussbuchse stellt hierbei die konventionelle Buchsenausführung für eine Massenproduktion kleinvolumiger Aluminiummotoren dar. Die Plasmabeschichtung von Zylinderlaufflächen wird gerade bei den ersten Automobilherstellern in Kleinserien und hier meist bei Motoren für Oberklassefahrzeuge eingesetzt. Eine Ausnahme stellt sicherlich der VW Lupo FSI dar, bei dem die Serieneinführung bereits im Oktober 2000 erfolgt ist [2]. Jedoch handelt es sich auch hier aufgrund der relativ hohen Motorleistung für dieses Marktsegment um ein Nischenprodukt mit begrenzter Stückzahl.

Die Technologie der Plasmabeschichtung von Zylinderlaufflächen hat bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht, so dass die Einführung in die industrielle Produktion derzeit Wirklichkeit geworden ist [3, 4]. Das Beschichten mittels Plasmathermisch-Beschichten bietet nicht nur interessante technische Aspekte in Bezug auf die Eigenschaften der Zylinderlaufbahn, sondern erfüllt auch die wirtschaftlichen Randbedingungen für den Einsatz in der Serienproduktion. Ergebnisse aus Laborprüfständen und Feldtests haben bestätigt, dass neben der signifikanten Gewichtseinsparung am Zylinderkurbelgehäuse selbst auch günstige tribologische Eigenschaften der Schichten erreicht werden. Die in dieser Arbeit erfolgte Prüfung beziehungsweise Charakterisierung des Laufverhaltens haben deutlich die Attraktivität dieser Beschichtungstechnologie gezeigt.

2 Versuchsdurchführung

An einem speziellen Einzylindermotor, dessen Zylinderbuchse im Messsystem PIFFO „Piston Friction Force Measurement System“ [1], **Bild 1**, durch Kraftaufnehmer vom Kurbelgehäuse getrennt („Floating Liner“ [1, 5],) und nahezu kraftfrei abgedichtet ist, sind geschleppte und gefeuerte Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Autoren



Dipl.-Ing. Jürgen Dohmen ist Leiter der Abteilung Tribologie und Motormechanik bei der FEV Motorenteknik GmbH, Aachen.



Dipl.-Ing. Franz-Gerd Hermsen ist Spezialist der Sparte Motormechanik bei der FEV Motorenteknik GmbH, Aachen.



Dipl.-Ing. Gérard Barbezat ist Leiter Produktentwicklung bei der Sulzer Metco AG, Wohlen, Schweiz.

Dieser Aufbau ermöglicht eine direkte dynamische Reibkraftmessung zwischen Kolben/Kolbenringen und dem Zylinderrohr. Die über dem Kurbelwinkel dargestellte Reibkraft gibt detaillierte Erkenntnisse über den Einfluss der Buchsenoberfläche auf die Reibung. Ebenso können Kolbenringparameter wie beispielsweise die Ringvorspannung und der Einfluss von Kolbenbeschichtungen analysiert werden.

Die Konstruktion des Einzylindermotors basiert auf den geometrischen Daten eines in Serie gebauten 1,6-l-Ottomotors. Das heißt, Kolben und Kolbenringpaket des Einzylinder-Versuchsträgers entsprechen den Serienbauteilen des 1,6-l-Motors. Die Oberflächenkennwerte der Graugussbuchse sind denen des Serienmotors angepasst worden. Die Lauffläche der plasmabeschichteten Buchse entspricht einer in der Serie herstellbaren Plasmavariante. Aufgrund der Teileverfügbarkeit des Einzylindermotors ist der Zylinderhub im Vergleich zum 1,6-l-Motor auf 81 mm vergrößert und die Pleuellänge auf 148,5 mm festgelegt worden. Hieraus ergibt sich ein Zylinderhubvolumen des Einzylindermotors von 417 cm³ im Vergleich zu 399 cm³ des 1,6-l-Serienmotors.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

3 Einlaufverhalten

Durch Einlaufen der Versuchsteile werden die Reibpartner wie Kolben und Kolbenringe an den Zylinder angepasst. Das heißt, durch Einlaufverschleiß entsteht vor allem an den Kolbenringen und der von den Kolbenringen überstrichenen Zylinderfläche eine Anpassung der Laufflächen. Bei GG-Liner wird dabei innerhalb der ersten drei Stunden eine Reibungsreduzierung von 14 % erreicht, **Bild 2**. Nach weiteren sieben Stunden ist eine Reduzierung um 18 % der Anfangsreibung durch Einlauf von Kolben und Ringen erkennbar, aber erst nach annähernd 31 Stunden ist der Einlaufprozess mit 22 % Reibungsreduzierung erkennbar vollzogen.

Im Vergleich hierzu ist beim plasmabeschichteten Zylinder nur ein geringer Reibungsabfall für den Basis-Einlauf innerhalb der ersten drei Stunden bei zirka 5 % Reduzierung der Anfangsreibung erkennbar. Bei dieser Beschichtung ist nur eine geringe Einlaufzeit der Motorkomponenten notwendig, wie die Messungen über die Betriebszeit gezeigt haben. Von Betriebsbeginn an ist die plasmabeschichtete Zylindervariante vor allem durch die geringe Mischreibung in den Wendepunkten der Kolbenringe sehr positiv aufgefallen.

2 Versuchsdurchführung

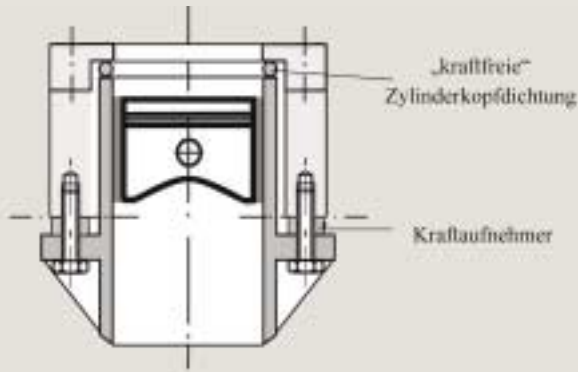


Bild 1: Kolbenreibkraftmesssystem PIFFO
Figure 1: Piston friction force measurement system PIFFO

3 Einlaufverhalten

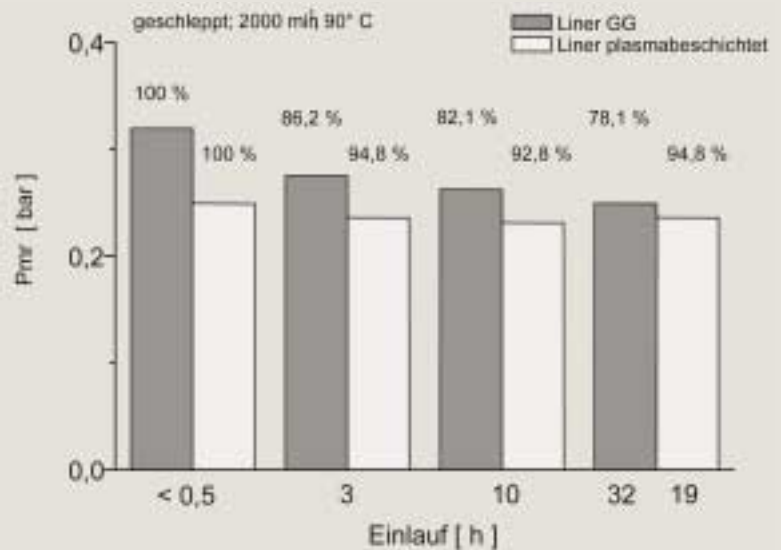


Bild 2: Einlaufverhalten, Messpunkte bei 2000/min, geschleppt
Figure 2: Break-in properties, measuring points at 2000 rpm, motored engine operation

4 Ergebnisse der Reibungsuntersuchung

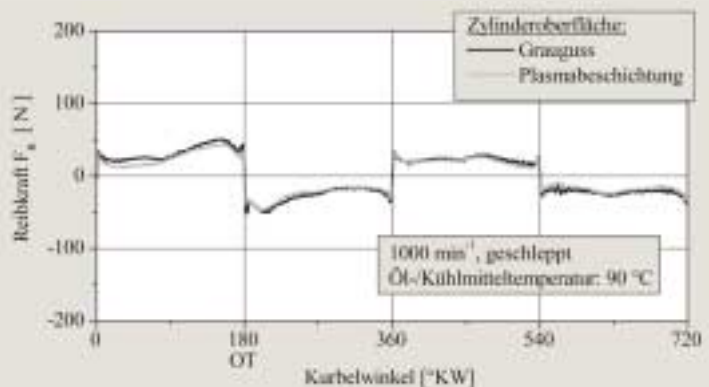


Bild 3: Dynamische Reibkraftverläufe des Pleuelpaketes bei 1000/min, geschleppt
Figure 3: Dynamic frictional loss curves of the piston package at 1000 rpm, motored engine operation

4 Ergebnisse der Reibungsuntersuchung

In **Bild 3** ist exemplarisch ein Vergleich der dynamischen Reibkraftverläufe des Kolbenpakets der beiden untersuchten Laufflächenausführungen über dem Kurbelwinkel bei einer Temperatur von 90 °C und einer Motordrehzahl von 1000/min im geschleppten und in **Bild 4** im gefeuerten Betrieb bei einem indizierten Mitteldruck von 9 bar dargestellt.

Im geschleppten Betrieb erkennt man je nach Richtung der Kolbenbewegung einen nahezu rechteckförmigen Reibkraftverlauf, der zu den Kolbenumkehrpunkten ansteigt. Die nahe den Totpunkten auftretenden höheren Reibkräfte resultieren aus den niedrigen Gleitgeschwindigkeiten und der hier vorliegenden Mischreibung. Der Vergleich der beiden Laufflächen verdeutlicht Reibungsvorteile der Plasmabeschichtung in allen Betriebszuständen. Diese Vorteile resultieren hauptsächlich aus der speziellen Oberflächentopografie der plasmabeschichteten Lauffläche, bei der die mit vielen kleinen, als Ölreservoir dienenden Vertiefungen zu einer Verbesserung der hydrodynamischen Schmierung beitragen. Des Weiteren zeichnet sich der Schichtwerkstoff der Plasmabeschichtung durch einen geringeren Reibungskoeffizienten gegenüber Grauguss aus [6]. Im Vergleich der über dem Kurbelwinkel integrierten Reibungskraft beträgt die Reibleistungsreduzierung der Kolbengruppe mit der plasmabeschichteten Lauffläche im geschleppten Betrieb bei 1000/min etwa 13 %.

Der Verlauf der Reibkräfte bei 1000/min und einer Motorlast entsprechend 9 bar indizierten Mitteldrucks zeigt prinzipiell ein zum geschleppten Betrieb vergleichbares Verhalten. Der große Unterschied besteht lediglich im hohen Anstieg der Reibkraft nach Zünd-OT, der aufgrund des hohen Zylinderdrucks und der damit verbundenen Zunahme des Anpressdrucks des 1. und 2. Kolbenringes verursacht wird. Hierbei verursacht der zirka 80-90 % vom Zylinderdruck wirkende Druck hinter dem 1. Kolbenring im Vergleich zu 10-20 % hinter dem 2. Kolbenring den Hauptanteil des Reibungsanstiegs. Aber auch in diesem Bereich weist die plasmabeschichtete Lauffläche aus den oben genannten Gründen Reibungsvorteile gegenüber der GG-Buchse auf. Aus der über dem Kolbenhub integrierten Reibungskraft ergibt sich in diesem Betriebspunkt ein reduziertes Reibungsniveau der Kolbengruppe bei der plasmabeschichteten Lauffläche von mehr als 6 %.

Die um zirka 50 % geringere Wärmeleitfähigkeit der Plasmabeschichtung im Vergleich zu Grauguss hat keinen messbaren

4 Ergebnisse der Reibungsuntersuchung

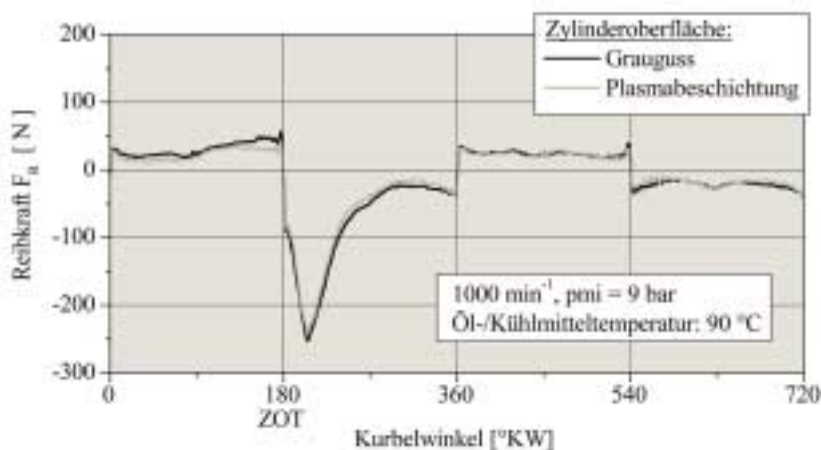


Bild 4: Dynamische Reibkraftverläufe des Kolbenpakets bei 1000/min, gefeuert

Figure 4: Dynamic frictional loss curve of the piston package at 1000 rpm, engine operating

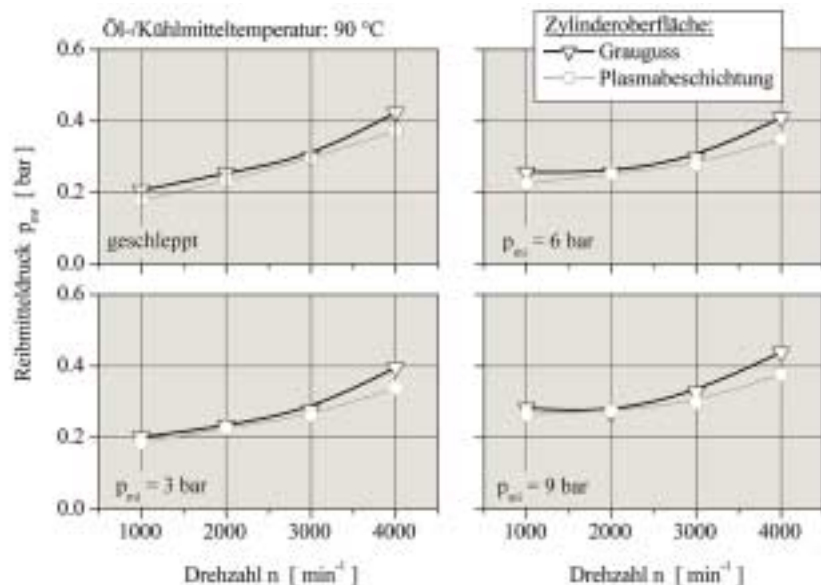


Bild 5: Vergleich der Reibmitteldrücke des Kolbenpakets bei 90 °C

Figure 5: Comparison of the frictional mean effective pressures of the piston package at 90 °C

Einfluss auf die Reibung. Aufgrund der relativ geringen Schichtdicke von etwa 80-120 µm der Plasmabeschichtung ändern sich die Wandtemperaturen nur unwesentlich. Dies ist bei den Untersuchungen messtechnisch bestätigt worden. Die im Abstand von 1,5 mm von der Laufbahnoberfläche gemessenen Temperaturen zeigten hierbei maximale Abweichungen von 2 K.

Bild 5 zeigt den Vergleich der Reibmitteldrücke des Kolbenpakets der beiden untersuchten Laufflächenausführungen

über der Motordrehzahl und der Motorlast bei einer Öl- und Kühlmitteltemperatur von 90 °C. Anhand dieser Darstellung wird der Reibungsvorteil der plasmabeschichteten Lauffläche im gesamten untersuchten Betriebsbereich deutlich. Besonders hervorzuheben sind die Reibungsvorteile bei hohen Motordrehzahlen, die hauptsächlich durch die verbesserten tribologischen Eigenschaften der Plasmabeschichtung auf die Kolbenringe hervorgerufen werden. In diesen Betriebsbereichen liegt das Reibungsniveau der Kolbengruppe des

4 Ergebnisse der Reibungsuntersuchung

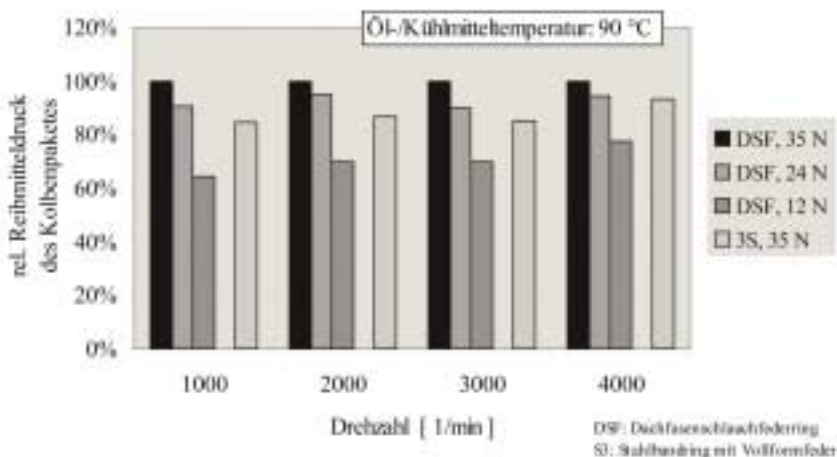


Bild 6: Einfluss Ölabbstreifring-Vorspannung auf Kolbenpaketreibung bei 90 °C, geschleppt
 Figure 6: Influence of the oil control ring pre-stress on the piston package friction at 90 °C, motored engine operation

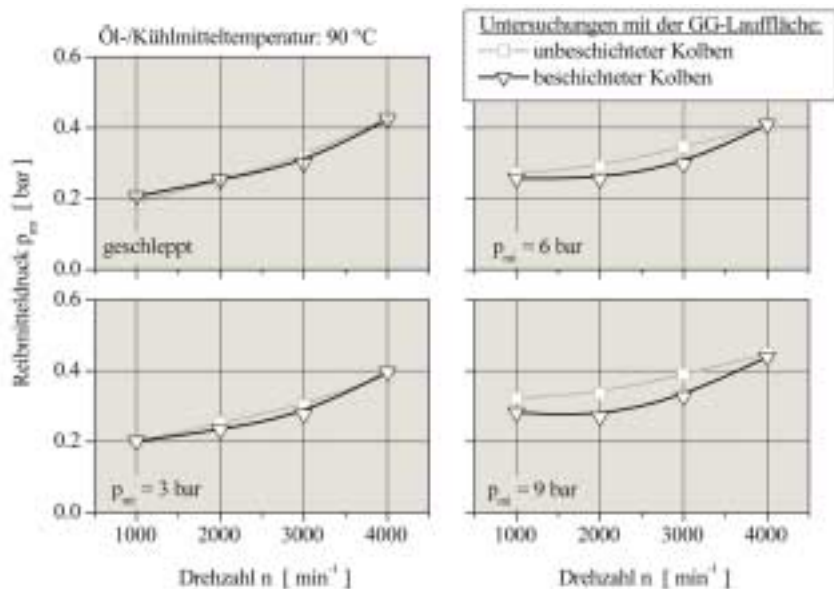


Bild 7: Einfluss der Kolbenbeschichtung auf die Reibung des Kolbenpaketes
 Figure 7: Effect of the piston coating on the friction of the piston group

plasmabeschichteten Motors um bis zu 14 % unter dem des Motors mit Graugussbuchse. Dies entspricht in etwa einer Verbesserung der Kompletmotorreibung von bis zu 6 % des 1,6-l-Basismotors, entsprechend einem maximalen Kraftstoffverbrauchsvorteil von 1-2 %.

Vergleichbare Reibungsvorteile der Plasmabeschichtung sind ebenfalls bei einer geringeren Betriebstemperatur von 60 °C festgestellt worden. Auch hier sind die höchsten Reibungsvorteile bei hohen Motordrehzahlen ermittelt worden.

Die in den Bildern 3 bis 5 dargestellten Ergebnisse beruhen auf Messungen, die bei beiden Laufflächenvarianten mit der gleichen Kolbenringpaketbestückung durchgeführt worden sind. Aufgrund der besonderen Oberflächentopografie von plasmabeschichteten Laufflächen ist eine Reduzierung der Kolbenringvorspannung des Ölabbstreifrings möglich. **Bild 6** zeigt hierzu exemplarisch die Ergebnisse einer Ringvorspannungsvariation des Ölabbstreifrings im geschleppten Motorbetrieb, bei der ansonsten alle anderen Triebwerksbauteile und -

geometrien unverändert geblieben sind. Die dargestellten Potenziale für den geschleppten Betrieb sind unter gefeuerten Bedingungen in vergleichbarer Größenordnung ebenfalls nachgewiesen worden.

Alle in Bild 6 dargestellten Ergebnisse sind auf die Serienauslegung des Kolben- und Kolbenringpakets bezogen, wobei der Ölabbstreifring eine Vorspannung von 35 N besitzt und als Dachfasenschlauchfeder (DSF) ausgeführt ist. Durch eine Reduzierung der Ringvorspannung auf 24 N konnte in dem betrachteten Drehzahlbereich zwischen 1000 und 4000/min eine Reibungsverringerung der Kolben und Kolbenringe um 5-10 % erzielt werden. Eine weitere Absenkung der Ringvorspannung auf 12 N hat ein um 30-prozentiges günstigeres Reibungsniveau des Kolbenpaketes, entsprechend einer Reduzierung der Kompletmotorreibung von etwa 12 %, im Vergleich zur Basisauslegung zur Folge. Da die Ringvorspannung neben der Reibung und dem Ölverbrauch ebenfalls das Blow-by-Verhalten beeinflusst, sollte für einen Serieneinsatz eines reibungsoptimierten Kolbenringpakets auf jeden Fall eine Untersuchung des Einflusses auf die beiden anderen Parameter erfolgen. Erst danach kann eine endgültige Entscheidung über den Einsatz einer ausgewählten Kolbenringpaketbestückung erfolgen.

Eine weitere wichtige Erkenntnis resultiert aus der Untersuchung mit einer modifizierten Bauform des Ölabbstreifrings. Hierbei ist der serienmäßige Dachfasenschlauchfeder (DSF) durch einen dreiteiligen Stahlbandring mit Vollformfeder (3S) ersetzt worden, wobei die Ringvorspannung und die wirksamen Ringhöhen unverändert geblieben sind. Durch diese Modifikation konnte das Reibungsniveau des Kolbenpaketes um 7-15 % reduziert werden. Eine mögliche Ursache für diesen Reibungsvorteil liegt im Anlageverhalten der Ölabbstreifringe an die Lauffläche. Im Gegensatz zu einem 3S-Ring, bei dem durch die dreiteilige Bauweise ein Anliegen des oberen und unteren Ringes immer gewährleistet werden kann, ist beim DSF-Ring ein Verdrehen („Vertwisten“) möglich. Ein solches Vertwisten führt dazu, dass die tangentialen Vorspannkraft der Feder nur auf die anliegende Kolbenringseite wirkt, wodurch die Anpresskraft und somit die Reibung ansteigt. Zudem nimmt die Ölabbstreifwirkung zu, wodurch die Schmierfilmhöhe reduziert wird, was sich nachteilig auf die Hydrodynamik und somit wiederum auf die Reibung des Kolbens und der Kolbenringe auswirkt.

Vergleichbare Untersuchungen von Grauguss-Buchsen und plasmabeschichteten Laufflächen belegen den oben be-

schriebenen positiven Reibungseinfluss der Plasmabeschichtung. Neben den sich bei diesen Prüfstandsuntersuchungen durchschnittlich ergebenden Kraftstoffverbrauchseinsparungen von etwa 4 % beziehungsweise einer Leistungssteigerung von etwa 3 % sind zudem folgende Reduzierungen messtechnisch nachgewiesen worden [7, 8]:

- Ölverbrauch: 60 %
- Verschleiß des 1. Ringes: 50 %
- Verschleiß des 2. Ringes: 30 %
- Laufflächenverschleiß: 90 %.

Diese Verbesserungen spiegeln das hohe Potenzial einer Plasmabeschichtung in Bezug auf Reibung, Ölverbrauch und Verschleiß als Alternative zu einer konventionell eingesetzten Grauguss-Buchse wider.

5 Einfluss der Kolbenbeschichtung

Neben der Zylinderbeschichtung und der Auslegung des Kolbenringpakets bietet die Beschichtung des Kolbenhemds eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Kolbenreibung. **Bild 7** zeigt hierzu Ergebnisse von Vergleichsmessungen am Einzylindermotor mit einer Graugussbuchse, an dem jeweils mit einem beschichteten und unbeschichteten Kolben eine Drehzahl und Lastvariation durchgeführt worden ist. Die Beschichtung entspricht hierbei einer bereits in Serie angewandten Graphit-Beschichtung des Kolbenhemds.

Anhand der Darstellung in Bild 7 wird die positive Reibungsbeeinflussung einer Kolbenbeschichtung in allen Betriebszuständen, besonders jedoch bei hohen Motorlasten, deutlich. Die Vorteile einer Kolbenbeschichtung beruhen im Wesentlichen auf zwei Mechanismen. Zum einen trägt ein gezielter Abrieb der Beschichtung zu einer für die Kolbenbewegung angemessenen Kontur beziehungsweise Ballig-

keit und somit zu einem angepasstem Kolbenspiel bei. Zum anderen lagern sich die abgeriebenen Graphitpartikel auf der Lauffläche ab, wodurch besonders im oberen Totpunkt das Reibungsverhalten der Kolbenringe positiv beeinflusst wird.

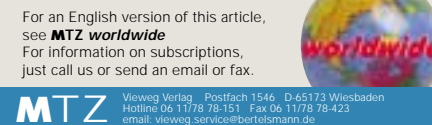
Zudem wird durch eine Kolbenbeschichtung die Einlaufzeit verkürzt. In den durchgeführten Untersuchungen ist mit dem unbeschichteten Kolben nach etwa 15 h ein konstantes Reibungsniveau erreicht worden. Mit dem beschichteten Kolben hingegen hat die Einlaufzeit weniger als 3 h betragen. Vergleichbare Ergebnisse sind ebenfalls durch einen Kolbenhersteller nachgewiesen worden [9].

6 Zusammenfassung

Die Untersuchung an einer plasmabeschichteten Zylinderlauffläche der Sulzer Metco AG und einer Graugusszylinderbuchse haben gezeigt, dass durch die besondere Oberflächentopographie und den niedrigen Reibungskoeffizienten der Plas-

mabeschichtung eine Verbesserung des Reibungsniveaus der Kolbengruppe eines Verbrennungsmotors möglich ist. Zudem bietet die Plasmabeschichtung Vorteile bezüglich Ölverbrauch und Verschleiß. Die Auswahl und Bearbeitung des Zylinderrohrmaterials beziehungsweise dessen Oberfläche spielen bei der Betrachtung reibungsreduzierender Maßnahmen an Motoren eine immer größer werdende Rolle. Das heute bei Pkw-Motoren immer stärker in Betracht gezogene Aluminiumkurbelgehäuse (Leichtbau, besserer Wärmeleitfähigkeit) kann mit plasmabeschichteten Laufflächen eine Alternative zu herkömmlichen AlSi-legierten Linern und eingesetzten GG-Linern darstellen.

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



MTZ Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423
email: Vieweg.service@bertelsmann.de

Literaturhinweise

- [1] Koch, F.; Geiger, U.; Hermsen, F.G.: PIFFO – Piston Friction Force Measurements during Engine Operation. In: SAE-Paper 960306, 1996
- [2] Winterkorn, M.; Spiegel, L.; Bohne, P.; Söhlke, G.: Der Lupo FSI von Volkswagen – So sparsam ist sportlich. In: ATZ 102 (2000), Nr. 10
- [3] Barbezat, G.: The state of the art of the internal plasma spraying on cylinder bores in AlSi cast alloys. In: Internal Journal of Automotive Technology, Vol. 2, no. 2, June 2001, pp. 47–52
- [4] Barbezat, G.: Plasmabeschichtung von Zylinderlaufflächen – Stand der Technik und der Industrialisierung. In: VDI-Bericht Nr. 1612/2001, S. 97–105
- [5] Furuhashi, S.; Takiguchi, M.; Tomizawa, K.: Effect of piston and piston ring de-
- signs on the piston friction forces in diesel engines. In: SAE paper 810977, 1981
- [6] Barbezat, G.; Herber, R.: Durchbruch für Motorenbeschichtung. Sulzer Technical Review 2/2001
- [7] Rao, V.D.; Boyer, B.A.; Cikaneck, H.A.; Kabat, D.M.: Influence of surface characteristics and oil viscosity on friction behavior of rubbing surfaces in reciprocating engines. Paper No. 98-ICE-131, Fall Technical Conference, ASME 1998
- [8] Sauerwein, U.; Hick, H.; Gosch, R.; Feikus, F.-J.; Jakobs, R.; Müller, M.: Zylinderlaufflächen für Aluminium-Dieselmotoren. In: MTZ 63 (2002), Nr. 6
- [9] Schelling, H.; Freier, R.: Einflussgrößen auf die Reibleistung der Kolbengruppe. Mahle, Technische Information



Ihre Meinung ist uns wichtig!

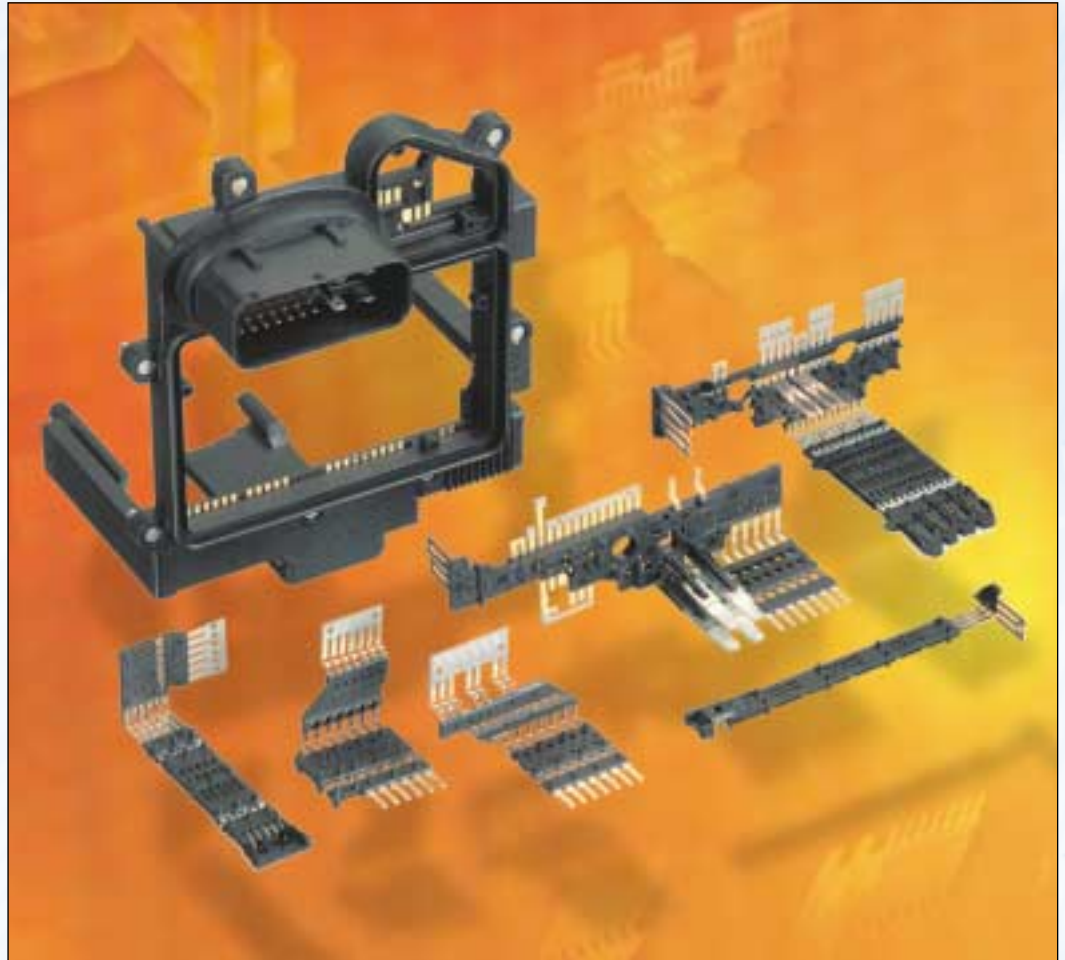
Liebe Leserin, lieber Leser,

Ihre Meinung ist uns wichtig! Ihre Ansichten, Anregungen und Kritik zu Beiträgen in diesem Heft senden Sie als **Leserbriefe** per E-mail an: atz-mtz@gwv-fachverlage.de

Technik und Präzision für mechatronische Produkte



Steuergehäuse für stufenloses
Pkw-Getriebe



Eine Vielfalt technischer Produkte integriert heute mechanische Komponenten und elektronische Hardware in einem Gehäusedesign und schafft so mechatronische Lösungen. Mechatronik-Anwendungen bieten vielseitige Potentiale bezüglich Funktionalität, Kosten, Bauraum und Qualität.

Tyco Electronics trägt mit seinen Fertigungstechnologien dazu bei, oft an der Grenze der technischen Machbarkeit. Beispielhafte Produkte, die heute in großen Stückzahlen produziert werden, sind Premolded Packages für Halbleiter und Mikrosysteme, Gehäuse zum Wire-Bonding von Hybrid-schaltungen und Module, die Elektronikgehäuse, Sensoren und Aktuatoren in fortgeschrittener Aufbau- und Verbindungstechnik vereinen können.

Dazu werden hochentwickelte Techniken des Stanzens, Kunststoffspritzgießens und des Fügens gemeinsam mit selektiver, galvanischer Oberflächenbeschichtung genutzt.