

Mit Laserlicht zu starkem Finish

Wachsende automobiler Beweglichkeit mit der zeitgemäßen Umweltverträglichkeit zu verbinden stellt eine Herausforderung an die Entwicklung von Verbrennungsmotoren dar. Eine Lösung dieses Problems ist der Bau von 3-Liter-Autos, allerdings steht dem der Kundenwunsch nach mehr Motorleistung, Raum und Sicherheit entgegen. Eine Möglichkeit, die Gegensätze Umweltverträglichkeit und Leistungssteigerung zusammenzubringen, bietet die gezielte Modifizierung der Zylinderoberflächen mittels ultravioletter Laserstrahlung.

GERD SPIECKER UND LUDOLF HERBST

■ Umweltfreundliche, das heißt sparsame, aber dennoch leistungsstarke Verbrennungsmotoren werden heutzutage vom Markt gefordert. Für die Motorenentwicklung stellen sich daher in erster Linie zwei treibende Faktoren dar: zum einen der Kundenwunsch nach höherer Motorisierung und zum anderen die verschärfte Umweltgesetzgebung zusammen mit einer höheren Besteuerung des Kraftstoffs. Daraus abgeleitet ergeben sich die drei Entwicklungsziele:

- Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs,
- Reduzierung des Ölverbrauchs,
- Erhöhung der Motorenlebensdauer.

Höhere Verschleißfestigkeit fördert die Kraftstoffeinsparung

Um eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und eine Steigerung der Motorenleistung zu erreichen, muss bei Otto- und Dieselmotoren der Verbrennungsvorgang optimiert werden; das bedeutet konkret, dass – neben einer Optimierung der Einspritzung – die Verbrennungsdrücke erhöht werden, um eine bessere Verwirbelung des Treibstoffs zu errei-

chen. Bild 1 zeigt einen Messaufbau mit Excimerlaser zur Verbrennungsanalytik.

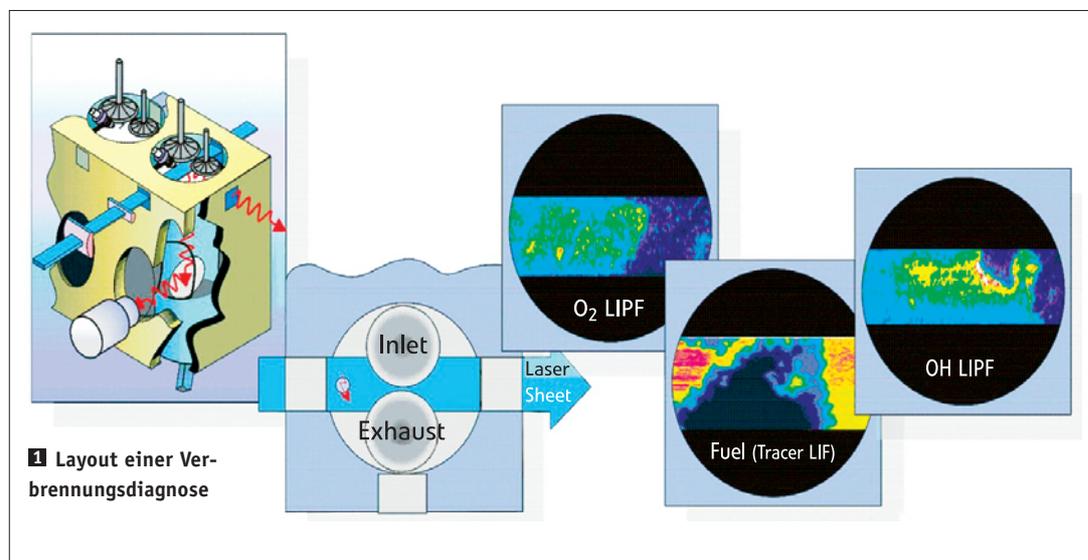
Drucksteigerungen bewirken höhere Anpresskräfte der Kolbenringe gegen die Zylinderwandung, was zu einer höheren tribologischen Belastung mit entsprechendem Verschleiß der beiden Gleitpartner führt. Verschleiß bedeutet Verringerung der Gebrauchsdauer und hat Auswirkungen auf die Öl- und Gasdichtigkeit des Systems Zylinderlaufbahn/Kolbenringe. Höherer Ölverbrauch und Durchlässigkeit der Verbrennungsgase vom Brennraum in den Kurbelarm treten ein. Beides äußert sich in einem schlechteren Abgasverhalten und sinkendem Wirkungsgrad des Motors mit steigender Gasdurchlässigkeit. Für den Kun-

den sind diese Auswirkungen mit höheren Verbrauchskosten verbunden.

Vor diesem Hintergrund wird neben der Verringerung des Kraftstoff- und Ölverbrauchs auch die Bedeutung einer höheren Verschleißfestigkeit deutlich.

Konventionelle Behandlung der Oberfläche stößt an ihre Grenzen

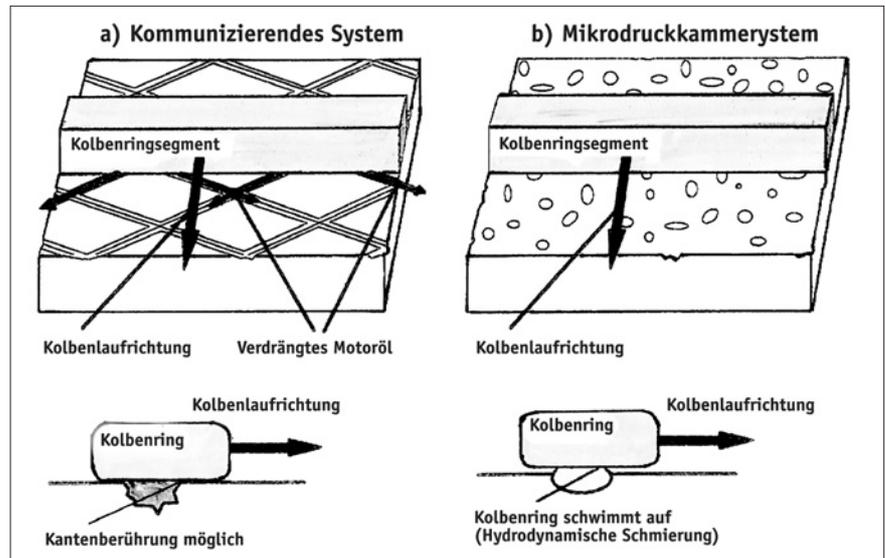
Von der Gleitpaarung Zylinderlaufbahn/Kolben/Kolbenringe ist im motorischen Betrieb eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen, die als Kernpunkte den Verschleiß und den Ölverbrauch betreffen. Beide Punkte haben einen großen Einfluss auf das Abgasverhalten und somit auf die Umweltbelastung.



Zur Verbesserung der Schmier- und Gleiteigenschaften der Zylinderlaufbahn wird konventionell das mechanische Honen eingesetzt. Dabei wird ein zylindrisches mit Honleisten besetztes Werkzeug verwendet. Auf diesen Honleisten befinden sich Schleifkörner, die in der Zylinderlaufbahn eine Kreuzriefenstruktur erzeugen. Diese Riefenstruktur hat die Aufgabe der Ölhaltung. Beim Übergleiten der Kolbenringe hat diese Struktur allerdings die Eigenschaft eines kommunizierenden Kanalsystems (Bild 2). Durch diese Tatsache sind einer Ölverbrauchsreduzierung sowie der hydrodynamischen Wirkung des Schmierstoffs Grenzen gesetzt.

Neue Technologien zur Behandlung von Zylinderoberflächen

Da mit dem erwähnten konventionellen Honen die gesetzten Ziele nicht erreicht werden konnten, wurde bei Audi in Ingolstadt nach einer anderen Lösung gesucht. Der Ansatzpunkt war das Vorhandensein von Grafiteneinschlüssen in dem für den Motorenbau verwendeten Grauguss. Die an die Zylinderoberfläche lie-



2 Schematische Darstellung von kommunizierendem Kanalsystem (links) und Mikrodruckkammersystem

genden Grafiteneinschlüsse werden beim beschriebenen mechanischen Honvorgang durch Materialverschiebungen zugeschmiert. Ein Freilegen der an die Oberfläche reichenden Grafiteneinschlüsse besitzt ein erhebliches Potenzial zur Ölverbrauchsreduzierung durch verbesser-

te Ölhaltung. Das durch die Öffnung der Grafiteneinschlüsse entstehende so genannte Mikrodruckkammersystem vermeidet das bei der Kreuzriefenstruktur auftretende Entweichen des Schmieröls. Durch die bessere hydrodynamische Wirkung der Mikrodruckkammern »schwim- ▶▶

© 2005 Carl Hanser Verlag, München www.metall-infocenter.de/WB Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern.



■ Stabilisierte Pulsenergien bis zu 1050 mJ bei Repetitionsraten bis 300 Hz: Industrie-Excimerlaser »Lambda Steel«

►►► men« die Kolbenringe auf. Es wird eine Reduzierung der Reibungsverluste und somit ein Gewinn an motorischer Leistung und weniger Verschleiß erreicht. Eine Mikrodruckkammeroberflächenstruktur wurde bei Audi bereits Anfang der 80er Jahre mit einem kombinierten Verfahren aus elektrochemischer Behandlung und reibender Bearbeitung hergestellt. Allerdings hat sich dieses Verfahren nicht durchsetzen können.

Belichtung von Zylinderlaufbahnen mit Excimerlaserstrahlung

Für die praktische Anwendung zur Öffnung der Grafitausscheidungen hat sich die Belichtung der Zylinderlaufbahnen

mit einer Excimerlaserstrahlung durchgesetzt.

Die gepulsten Excimer-Gaslaser zeichnen sich durch ihre Emission im ultravioletten (UV) Spektralbereich von 351 bis hinunter zu 157 nm aus. Im Gegensatz zu den IR-Lasern ist die Materialablation durch die hohe Photonenenergie der UV-Laserstrahlung nichtthermischer Natur. Es kann daher bei der Materialbearbeitung ein hoher Präzisionsgrad erreicht werden. Die in dem vorliegenden Bericht benutzte Excimerwellenlänge beträgt 308 nm. Für diese Wellenlänge steht die Industrielaserserie »Lambda Steel« der Firma Lambda Physik mit Sitz in Göttingen zur Verfügung (Bild 3). Diese UV-Hochleistungslaser liefern stabilisierte Pulsenergien je nach Modell von 670 bis zu 1050 mJ bei Repetitionsraten von bis zu 300 Hz, wodurch eine maximale stabilisierte Ausgangsleistung von 200 beziehungsweise 315 W erreicht wird.

Erhebliche Vorteile durch Belichtung mit UV-Photonen

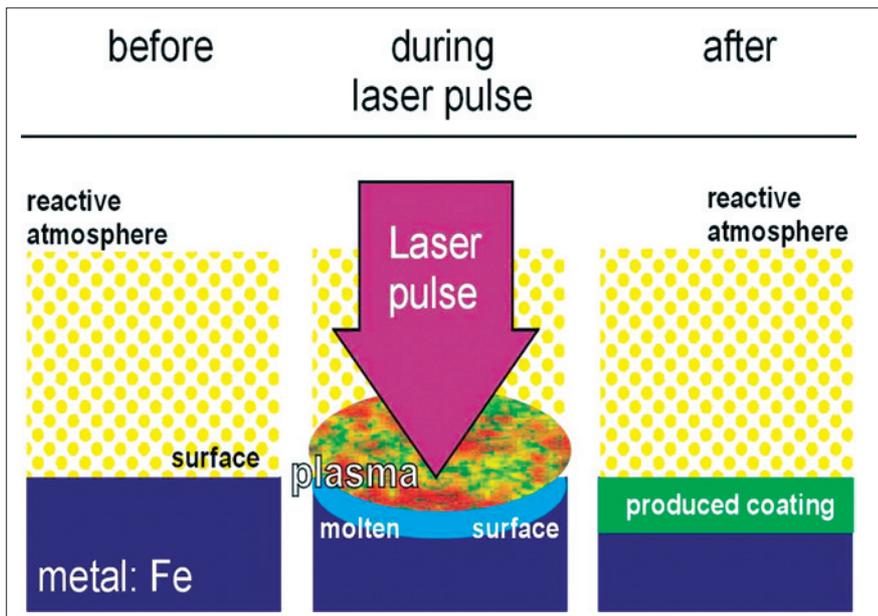
Die Laser der Lambda-Steel-Serie werden bereits in der Industrie für die verschiedensten Anwendungen eingesetzt, so zum Beispiel für das großflächige Bohren von Mikrolöchern für Tintenstrahldruckerpapieren oder auch zum Umwandeln von amorphem Silizium auf Glas zu poly-

kristallinem Silizium zur Herstellung von Flachbildschirmen.

Durch die Belichtung mit UV-Photonen werden aber nicht nur die Grafitausscheidungen durch Ablatieren geöffnet, sondern es wird die Oberfläche bis in eine Tiefe von etwa 2 µm auch leicht angeschmolzen. Gleichzeitig entsteht ein Plas-



■ Nach 602 Stunden Prüfstanddauerlauf: Zylinderlaufbahn im O.T.-Bereich (oben) und im mittleren Bereich (unten)



■ Grundprinzip der Verfahren DLS und RLS (DLS = direct laser synthesis; RLS = reactive laser synthesis)

ma, durch das in mehreren Stufen atomarer Stickstoff aus dem Luftstickstoff gebildet wird. Der atomare Stickstoff kann auf Grund der günstigen Druckverhältnisse über der Schmelze zu einem hohen Anteil darin gelöst werden. Es bildet sich nach dem Erstarren der Anschmelzschicht ein nanokristallines Gefüge mit einem hohem Stickstoffanteil. Die entstandene Schicht hat eine hohe Verschleißbeständigkeit. Diese Verschleißbeständigkeit der Anschmelzschicht erfährt eine weitere Steigerung im motorischen Betrieb durch Rekristallisation infolge der Verbrennungswärme im Motor. Es entstehen Fe-Körner, die mit N- oder C-Atomen verspannt sind. Hier ist eine Selbstkonditionierung der Zylinderlaufbahn in Richtung höherer Verschleißbeständigkeit festzustellen. Gleichzeitig wird durch die Nitritschichten der Korrosionsschutz erhöht, was bei den schwefel-

i ENTWICKLER

Audi AG,
 85045 Ingolstadt,
 Tel. 08 41/89-0,
 Fax 08 41/89-3 25 24,
 www.audi.de

i HERSTELLER

Lambda Physik AG,
 37079 Göttingen,
 Tel. 05 51/69 38-0,
 Fax 05 51/6 86 91,
 www.lambdaphysik.com

haltigen Treibstoffen – hier entsteht bei der Verbrennung Schwefelsäure – von erhöhter Bedeutung ist. Diese Problematik spielt beim Lkw- und Schiffsdiesel eine wichtige Rolle.

Zusätzlich dazu zeichnet sich die durch UV-Photonen belichtete Zylinderlaufbahn durch einen hohen Flächentraganteil aus.

Praktische Erprobung unterstreicht die Vorteile

Motortestläufe mit der UV-Photonen-belichteten Zylinderlaufbahn auf Straße und Prüfstand haben gezeigt, dass gegenüber einer guten konventionellen Honung eine Ölverbrauchsreduzierung in der Größenordnung von 70 bis 75 Prozent sowie eine Verschleißreduzierung an Zylinderlaufbahn und Kolbenringen bis zu 80 oder sogar 90 Prozent (abhängig vom Betriebszustand des Motors) erzielt werden können.

Bild 4 zeigt mit Excimerlaser bearbeitete Zylinderlaufbahnen nach 602 Stunden Prüfstanddauerlauf.

Oberflächen müssen heute bestimmte Funktionseigenschaften aufweisen. Um diese Eigenschaften zu erreichen, ist ein geeignetes Verfahren die Oberflächenmodifikation mit Lasern. Wie das oben genannte Beispiel zeigt, kann man drei Verfahrensschritte gleichzeitig erreichen:

- Veränderung der tribologischen Eigenschaften durch Freilegen der Grafitlamellen,
- Härten des Materials und deshalb ein besserer Korrosionsschutz durch die Bildung von Nitritschichten,
- Glätten der Oberfläche und damit höherer Verschleißschutz durch Schmelzen und Rekristallisierung des Materials.

Da der Einsatz von Lasern wirtschaftlicher als andere Verfahren ist, setzt man diese Technologie auch ein zum

- Aufrauen von Oberflächen für Klebeverbindungen,
- Herstellen von Diamant-, Nitrit- und carbonisierten Schichten,
- Herstellen hydrophober oder hydrophiler Schichten mit Hilfe reaktiver

Gase (zur Erzielung des Lotuseffekts). Bild 5 zeigt das Grundscheema für ein derartiges Verfahren.

Die Entwicklung dieser neuen funktionellen Werkstoffe steht erst an ihrem Anfang. Deutsche und japanische Hersteller sind auf diesem Gebiet die Trendsetter.

Dipl.-Ing. Ludolf Herbst ist bei Lambda Physik in Göttingen als Produktmanager für den Bereich Industrielaser zuständig

Dipl.-Ing. Gerd Spiecker ist bei Lambda Physik im Bereich Business Development zuständig für alle Laseranwendungen, nationale und internationale Förderprojekte und Netzwerke; salesgermany@lambdaphysik.com