

07-08 Juli-August 2011 72. Jahrgang

# Sonderdruck/Offprint

aus/from MTZ 07-08/2011 Springer Automotive Media Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

# MOTORTECHNISCHE ZEITSCHRIFT



# REIBUNGSREDUZIERUNG BEI KOLBENSYSTEMEN IM OTTOMOTOR

FRICTION REDUCTION IN POWER CYLINDER Systems of Gasoline Engines



# REIBUNGSREDUZIERUNG BEI KOLBENSYSTEMEN IM OTTOMOTOR

Das Kolbensystem, bestehend aus Kolbenringen, Kolben und Zylinderlaufflächen, bietet hohes Potenzial zur weiteren Reibungsreduzierung. Eine Untersuchung von Kolbenschmidt Pierburg quantifiziert die reibungsverursachenden Parameter und zeigt, welche Weiterentwicklungen Reibung und Verschleiß besonders stark verringern.

## AUTOREN



DIPL.-ING. (FH) MATTHIAS FAHR ist Leiter Grundlagenentwicklung und Konzepte Kolben (EU) bei der KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm.



DIPL.-ING. WOLFGANG HANKE ist Projektleiter Kolbensysteme bei der KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm.



DR.-ING. CHRISTIAN KLIMESCH ist Leiter Produktentwicklung bei der KS Aluminium-Technologie GmbH in Neckarsulm.



DIPL.-ING. ANDREAS REHL, MBE ist Projektleiter Triebwerk und Tribologie in der Forschung und Technologie bei der Kolbenschmidt Pierburg AG in Neckarsulm.

### **REIBUNG IM SYSTEM REDUZIEREN**

Aufgrund der steigenden spezifischen Leistungsdichten im Zusammenhang mit der Forderung nach weniger Kraftstoffverbrauch und Emissionen nehmen auch die damit verbundenen tribologischen Beanspruchungen im Verbrennungsmotor zu. Eine zentrale Rolle für Verschleißfestigkeit und Reibungsreduktion übernimmt dabei das Kolbensystem, bestehend aus Kolbenringen, Kolben und Zylinderlaufflächen. Bei hochbelasteten Verbrennungsmotoren können die immer größeren Anforderungen an dieses komplexe tribologische System nur durch ständige Innovationen in den Bereichen Werkstoffentwicklung, Simulation, Versuch und Fertigungstechnik erfüllt werden [1]. Speziell der Wunsch nach Reibungsminimierung im Grundmotor führt unmittelbar zum Kolbensystem, das einen Anteil von zirka 50 % an der Reibung hat. Um Reibung in einem System reduzieren zu können, bedarf es allerdings hochgenauer Quantifizierung der reibungsverursachenden Parameter. Dazu wird bei der Kolbenschmidt Pierburg AG das sogenannte Floating-Liner-Verfahren nach Furuhama mit einer exakten, kurbelwinkelaufgelösten Darstellung der Reibungsverluste speziell im Kolbensystem angewendet [2].

# KOLBENKONSTRUKTION FÜR MINIMALE REIBUNGSVERLUSTE

Die bereits in [3] vorgestellte Liteks-Leichtbaukonstruktion, **①**, unterstützt die Anforderungen der Motorenentwickler durch



• Vergleich der Leichtbaukonzepte Liteks der ersten Generation (links) und der zweiten Generation (rechts)

ihre typischen Ausprägungen. Diese sind große Ringfeldhinterschnitte mit doppelter Rippenabstützung, erhöhtes Bodenwiderstandsmoment durch konkave, zum Boden zusammenlaufende Kastenwände und seit der zweiten Generation (Liteks-2) spannungsoptimal mit den Kastenwänden verschmelzende Nabenstirnflächen.

Leichtbau und Dauerfestigkeit werden aber nicht nur durch die Kolbengestaltung bestimmt, sondern ebenso durch innovative Werkstofflösungen. Über eine gezielte Legierungszusammensetzung werden mit der neuen Hochleistungslegierung KS309 deutliche Festigkeitssteigerungen im Temperaturbereich über 250 °C erreicht [1]: Gegenüber der heute eingesetzten Legierung erhöht sich die Schwingfestigkeit bei einer typischen Bodentemperatur von 300 °C um 25 %. Neben den optimierten Werkstoffeigenschaften wurden auch gezielt Verbesserungen im Gießprozess umgesetzt, wie das Gießen besonders dünner Wandstärken.

Außer einer Gewichtsreduzierung weist das Leichtbaukonzept Liteks bedeutende Merkmale zur Reibungsverringerung auf. Die bereits in [3, 4] erwähnten, belastungsgerechten asymmetrischen Schaftbreiten bewirken durch reduzierte Kontaktflächen mit der Zylinderwand eine Absenkung der Reibungsverluste, 2 (oben). Kombiniert wird dieses Merkmal mit einem weiter optimierten asymmetrisch balligen Schaftprofil. Dieses verbessert den hvdrodvnamischen Schmierfilmaufbau und reduziert darüber hinaus die Schaftreibfläche. Dabei können Absenkungen des Reibmitteldrucks von 20 bis 24 % bei höheren Drehzahlen (2000 bis 3000/min) erzielt werden. Dies wird besonders im Reibkraftdiagramm, ② (rechts unten) sichtbar. Außerdem erlaubt das Liteks-2-Konzept eine Verkleinerung der Bolzendesachsierung sowie die Erhöhung des Einbauspiels und führt so zu weiteren Vorteilen im Reibungsverhalten, ohne Kompromisse beim Geräuschverhalten eingehen zu müssen. Kombiniert mit den konstruktiven Maßnahmen führt die Nanofriks-Schaftbeschichtung auf Polyamidimid-Basis (PAI) durch gezielte Zugabe von Festschmierstoffen [5] zur Absenkung der Mischreibungsverluste in den oberen und unteren Umkehrpunkten. Die erreichte hohe Verschleißbeständigkeit erlaubt höhere maximale Flächenpressungen am Kolbenschaft mit reduzierten Schaftkontaktflächen des Liteks-2-Konzepts.



# REIBUNGSVORTEILE DURCH OPTIMIERTE RINGGESTALTUNG

Einen wesentlichen Beitrag zur Reibungsminimierung im Kolbensystem können Optimierungsmaßnahmen am Kolbenringpaket leisten. Für das reibungsarme Kolbensystem wurde gemeinsam mit Nippon Piston Rings (NPR) eine sogenannte Low-Friction-Ringfamilie entwickelt, die die Anforderungen an unterschiedliche Zylinderlaufbahnen reflektiert. Die Ringmerkmale sind in **③** gegenübergestellt. Die Standardringe stellen den derzeitigen Serienstand dar. Die friktionsarmen Ringe weisen Merkmale für niedrigen Reibmitteldruck auf Zylinderlaufflächen aus Gusseisen beziehungsweise AlSi-Legierung (LF DLC) auf.

Eine effektive Reduzierung der Reibleistung erfordert vor allem die Verkleinerung der hydrodynamischen Reibkraft, die sich bei hohen Kolbengeschwindigkeiten um die Hubmitte einstellt. Hier können eine reduzierte Kontaktfläche zum Zylinder und verringerte Tangentialkräfte am Ringpaket einen wesentlichen Beitrag leisten. Um die Mischreibung im Bereich der Totpunkte und den damit verbundenen Verschleiß zu mindern, können zusätzlich Kompressionsringe mit reibungsreduzierenden und verschleißresistenten Beschichtungen versehen werden.

Der Ringsatz Low Friction (LF) Eco mit nitrierten Stahlringen weist ein verbessertes Formfüllungsvermögen auf. Die Kontaktflächen zum Zylinder sind beim Topring durch größere Krümmung in Hubrichtung, beim Ölabstreifring durch eine geringere Steghöhe reduziert. Um der erhöhten Verschleißgefahr an Top- und Ölring zu begegnen und um damit dem Anstieg des Reibmitteldrucks über der Zeit vorzubeugen, wird beim Ringsatz LF PVD je eine PVD-Beschichtung auf den Ringlaufflächen aufgebracht. Darüber hinaus hat der Ölabstreifring eine reduzierte gestufte Kontaktfläche bei weiter verringerter Tangentialkraft, sodass die Kontaktflächenpressung und der Ölverbrauch konstant bleiben.

In [4] zeigen bei AlSi-Zylinderlaufflä-

chen die Topringe mit DLC-Beschichtungen eine verringerte Mischreibung im Bereich der Totpunkte. Sie reduzieren darüber hinaus Schädigungen der Zylinderoberfläche während des Einlaufs. Die Simulation verdeutlicht die Wirksamkeit der beschriebenen Maßnahmen in Bezug auf die Reibkraft des Ringpakets, die über den Reibmitteldruck auch die Aufschlüsselung der Komponentenreibung für einzelne Betriebspunkte ermöglicht [4].

④ stellt den Reibmitteldruck und den Reibkraftverlauf des Kolbensystems mit den beschriebenen Ringpaketen Standard, LF Eco und LF PVD auf Basis der Liteks-2-Kolben dar. In ④ (unten) wird der Einfluss von reduzierter Tangentialspannung und kürzerer axialer Kontaktlänge der Pakete LF Eco und LF PVD besonders im Aufwärtshub deutlich, hier gleitet das System auf einem relativ dünnen Ölfilm.

④ (oben) zeigt den Reibmitteldruck des Kolbensystems im Kennfeld. Die in der



Ringsimulation belegten Reibungsvorteile der Pakete LF Eco und LF PVD finden sich im dargestellten Teillastkennfeld wieder. Hier ergeben sich Reibungsvorteile im Reibmitteldruck für alle Lastpunkte ab einer Drehzahl von 1500/min. Diese können je nach Betriebspunkt mit LF Eco zwischen 10 und 22 % und mit LF PVD zwischen 26 und 37 % betragen.

# REDUKTION VON REIBUNG UND VERSCHLEISS AN DER ZYLINDERLAUFFLÄCHE

Die Zylinderlauffläche ist ein wesentlicher Baustein zur Gestaltung des Kolbensystems und eröffnet dadurch Potenziale, Reibung und Verschleiß in diesem komplexen Tribologiesystem zu optimieren. Monolithische Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) basieren häufig auf der bewährten Alusil-Technik [6]. Dabei ist die Zylinderlauffläche durch mechanisches Freilegen von Primärsilizium (Standardhonung) charakterisiert, **③** (oben). Eine Weiterentwicklung der Standardhonung stellt die Strukturhonung dar, bei welcher die Oberflächentopographie feine Honriefen aufweist, ③ (Mitte).

Durch den Einsatz von quasimonolithischen Konzepten mit thermisch gespritzten Eisenbeschichtungen wie PTWA (Plasma Transferred Wire Arc), ③ (unten), werden die Gewichtsvorteile der monolithischen AlSi-Zylinderkurbelgehäuse und die erhöhte Verschleißfestigkeit der eisenbasierten Zylinderlaufflächen miteinander vereint. Für eine gute Verbindung zwischen dem Al-Grundwerkstoff und der Eisenschicht sowie für eine optimale Schichthaftung ist die in [6] beschriebene Aufrauung in Form eines Hinterschnittprofils mit Hilfe von Spezialschneidplatten notwendig.

Das Reibmitteldruckkennfeld und die Reibkraftdiagramme der vorgestellten Zylinderlaufbahntechniken sind in **③** gegenübergestellt. Im Reibmitteldruckkennfeld zeigt die Strukturhonung im Vergleich zur Alusil-Standardhonung einen signifikanten Reibungsvorteil im Drehzahlbereich von 1000 bis 2000/min, ④ (oben). Hier kann speziell bei der Drehzahl von 1000/min je nach Last eine Reduktion des Reibmitteldrucks von 14 bis 16 % festgestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist die signifikante Verschleißreduzierung am Kolbenschaft. Dies lässt sich im Reibkraftdiagramm, (() (links unten) im Bereich zwischen 360 und 390° KW bei hohen Zylinderdrücken und niedrigen Drehzahlen durch deutlich reduzierte Reibkraftspitzen und damit geringere Mischreibung erklären. Sowohl in den Bereichen der hohen Kolbengeschwindigkeiten als auch in den Umkehrpunkten des Kolbensystems führen die Kreuzstruktur und die damit verbundenen erhöhten  $R_{vk}$ -Werte bei gleichzeitig niedrigen  $R_{pk}$ -Werten zur Reduktion des Reibmitteldrucks im gesamten Kennfeld.

Beim PTWA-Verfahren stellt die Porosität der thermisch gespritzten Laufflächen nach [7] natürliche Ölrückhaltevolumina dar und verbessert die Schmierungssituation im Kontakt. Eisenoxide wie Wüstit (FeO) und Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) minimieren als Festschmierstoffe die Festkörperreibung zusätzlich. Mit der Kombination aus fertigungsund werkstofftechnischen Einflussfaktoren konnte der Reibmitteldruck gegenüber reibungsoptimierter Strukturhonung bei geringen Drehzahlen um weitere 17 bis 20 % reduziert werden. Dies ist besonders deutlich in den Umkehrpunkten des Kol-





**6** Konfokalmikroskop-Aufnahmen (50-fache Vergrößerung) – AlSi-Zylinderlaufflächen im Zwickelbereich, Laufzeit jeweils 30 h: Alusil-Standardhonung (oben), Alusil-Strukturhonung (Mitte), PTWA-Beschichtung (unten)



bensystems bei geringen Kolbengeschwindigkeiten und maximalem Zylinderdruck zu erkennen, ③ (unten).

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Kolbenschmidt Pierburg AG entwickelt Kolbenringe, Kolben und Zylinderlaufflächen als reibungsoptimiertes, komplettes Kolbensystem. Der Maßnahmenkatalog zur Minderung der Verluste am Kolben beinhaltet unter anderem die gewichtsreduzierte Liteks-Kolbenkonstruktion mit den geräusch- und reibungsoptimierten asymmetrischen Schaftprofilen und der mit Nanopartikeln verstärkten PAI-Beschichtung Nanofriks am Kolbenschaft. Durch die Summe dieser Maßnahmen konnte eine Reibmitteldruckreduktion von bis zu 24 % erzielt werden.

Weitere Vorteile ergeben sich künftig durch die Verwendung der neuen Al-Legierung KS309 und den verbesserten Leichtbaugrad der neuen Liteks-3-Generation. Im Bodenbereich ermöglichen beispielsweise die höheren Materialfestigkeiten eine deutliche Reduzierung der Wandstärken um bis zu 25 %. Die im Kastenbereich fertig gegossene Wandstärke kann durch einen speziellen Gießprozess erstmalig auf die aus Festigkeitsgründen notwendige minimale Wandstärke von 2 mm reduziert werden.

Die Low-Friction-Ringfamilie von NPR mit reduzierten Tangentialkräften, mit verkleinerten Tragflächen an Kompressionsund Ölabstreifring und mit angepassten Laufflächenbeschichtungen trägt mit einem Anteil von bis zu 38 % signifikant zur Reibungsminimierung innerhalb der Kolbengruppe bei.

Bei den Zylinderlaufflächen wirkt die Strukturhonung in fast allen Betriebspunkten des Motorkennfeldes reibungsminimierend. Ferner wurde nachgewiesen, dass quasi-monolithische Konzepte mit Eisenbeschichtungen bei entsprechender Endbearbeitung und intelligent gewählter Oberflächentopographie ein weiteres Potenzial zur Verschleißreduktion bei gleichzeitiger Minderung der Reibung im Kolbensystem von bis zu 36 % aufweisen.

#### LITERATURHINWEISE

[1] Buschbeck, R.; Hanke, W.; Ottliczky, E.;
Weimar, H.-J.: Innovative Kolbensystemlösungen für Verbrennungsmotoren. In: MTZ Sonderheft
100 Jahre Kolbenschmidt Pierburg, 2010, S. 64ff
[2] Scherge, M.; Rehl, A.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen am tribologischen System Kolbenring-Zylinderlaufbahn. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2010
[3] Hanke, W.; Buschbeck, R.; Letourneau, S.; Sinclair, D.; Skiadas, A.; Urabe, M.; Takiguchi, M.: Power Cylinder System Friction and Weight Optimization in High Performance Gasoline Engines. SAE 2009-01-1958

[4] Hanke, W.; Buschbeck, R.; Rehl, A.; Voigt, M.; Urabe, M.: Reibungs- und Gewichtsoptimierung in Kolbensystemen für moderne aufgeladene Ottomotoren. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2010

[5] Rasheva, Z.; Burkhart, T.; Rehl, A.; Janke, M.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen von verstärkten Polyamidimid Harzen für Kolbenschaftbeschichtungen. GfT Fachtagung, Göttingen, 2010 [6] Köhler, E.; Beer, S.; Klimesch, C.; Niehues, J.; Sommer, B.: Leichtbau beim Zylinderkurbelgehäuse. In: MTZ 70 (2009) Nr. 10

[7] Schwenk, A.; Verpoort, C.; Bobzin, K.; Ernst, F.; Richard, K.; Schläfer, T.: Nanokristalline Beschichtung von Zylinderlaufbahnen im Rahmen des "Nanomobil" BMBF-Programms. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2008

## AUTHORS



DIPL.-ING. (FH) MATTHIAS FAHR is Manager Predevelopment and Concepts Pistons (EU) at KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm (Germany).



DIPL.-ING. WOLFGANG HANKE is Project Manager for Piston Systems at KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm (Germany).



DR.-ING. CHRISTIAN KLIMESCH is Head of Product Development at KS Aluminium-Technologie GmbH in Neckarsulm (Germany).



DIPL.-ING. ANDREAS REHL, MBE is Project Manager for Engines and Tribology in the Research and Technology Department of Kolbenschmidt Pierburg AG in Neckarsulm (Germany).

# FRICTION REDUCTION IN POWER CYLINDER SYSTEMS OF GASOLINE ENGINES

The power cylinder system, consisting of the piston rings, pistons and cylinder running surfaces, offers great potential for a further reduction in friction. A study by Kolbenschmidt Pierburg quantifies the parameters that cause friction and shows which further developments are particularly effective in minimising friction and wear.

# **REDUCING FRICTION IN THE SYSTEM**

Due to increasing specific power density in connection with the requirement for reduced fuel consumption and emissions, the tribological demands on the internal combustion engine are expanding as well. The power cylinder system (PCS), consisting of piston rings, pistons and cylinder friction surfaces, plays a central role here in terms of wear resistance and friction reduction. This complex tribological system can meet the increasingly stringent requirements imposed on heavily stressed internal combustion engines only through continuous research and development in the fields of materials, simulation, testing and production technology [1]. The desire to minimize friction in the basic engine leads directly to the PCS, which accounts for some 50 % of engine friction. Of course, reducing friction in any system requires high-precision quantification of friction losses. Therefore Kolbenschmidt Pierburg AG uses simulation tools and the 'floating liner' method developed by Furuhama,

Comparison of the lightweight

(right)

concepts Liteks-1 (left) and Liteks-2

which enables exact crank angle resolved measurement of friction losses in PCS [2].

# PISTON DESIGN FOR MINIMUM FRICTION LOSSES

The lightweight Liteks design already discussed in [3], **①**, supports the requirements of engine developers owing to its typical characteristics, including large ring zone recess with double rib support, heightened section modulus of the piston crown due to concave side-walls that taper towards the crown, and – ever since introduction of the 2<sup>nd</sup> generation – boss inner faces with smooth transition into the side-walls to minimise stress.

Lightweight and fatigue strength do not depend solely on piston design, of course, but also result from solutions involving innovative materials. Thanks to its special composition, the new high-performance alloy KS309 achieves significantly enhanced resistance to fatigue at 250 °C [1]. At a typical base temperature of 300 °C, the new material results in the fatigue strength some 25 % greater than the alloy used today. Apart from enhanced material characteristics, specific improvements in the casting process have been implemented, including casting of especially thin sections.

Besides a reduction in weight, the Liteks lightweight concept has special friction-reducing features. The already mentioned load adjusted asymmetric skirt widths following the introduction of the Liteks-2 generation have resulted in lower friction losses, (2) (top) due to the smaller contact surface with the cylinder wall. Moreover,



this feature is combined with an optimized asymmetric convex skirt profile. This improves the hydrodynamic formation of the lubricant film as well as reducing the friction surface of the skirt. Here, it proved possible to obtain a lowering in friction mean effective pressure (FMEP) of 20 to 24 % at higher speeds rates (2000 to 3000 rpm). This can be seen especially clearly in the friction force diagram, <sup>(2)</sup>



(bottom right). In addition, the Liteks-2 concept enables a reduction in size of the pin offset as well as an increase in initial assembly clearance, thus resulting in further advantages with regard to friction behaviour without compromising on noise levels. Combined with the design features the use of polyamideimid-based Nanofriks skirt coating leads to a reduction in mixed friction losses at top (TDC) and bottom dead center (BDC) through the well-placed application of solid lubricants [5]. The high wear resistance achieved here enables greater maximum surface pressure on the piston skirt surface with reduced skirt contact surfaces of the Liteks-2 concept.

# FRICTION BENEFIT THROUGH OPTIMIZED RING DESIGN

Optimizing the piston ring package can make an important contribution to minimizing friction in the PCS. In cooperation with Nippon Piston Rings (NPR), a lowfriction ring family was developed which reflects the requirements imposed by various cylinder surfaces. The ring characteristics are compared in ③. The standard rings represent the current production standard. The low friction rings display characteristics indicating low FMEP on cylinder surfaces consisting of cast iron or AlSi alloys (LF DLC).

**2** FMEP map (top) and friction force diagram (bottom) of the investigated piston concepts

				_	
	Standard rings	Low Friction Eco	Low Friction PVD		Low Friction DLC
1. Groove					
	Barrel faced	Barrel faced with	Barrel faced with		Barrel faced with
Ring type		a strong curvature	a strong curvature		a strong curvature
h1 x a1 [mm]	1.2 x 2.9	1.2 x 2.7	1.2 x 2.7		1.2 x 2.7
s1 [mm]	0.28	0.28	0.28		0.28
Tangential force [N]	7.6	5.6	5.6		5.6
Surface treatment	Nitrided	Nitrided	PVD		DLC
2. Groove	$\Box$				
Ring type	NM	EM	EM		EM
h1 x a1 [mm]	1.5 x 3.2	1.0 x 2.7	1.0 x 2.7		1.0 x 2.7
s1 [mm]	0.45	0.445	0.445		0.445
Tangential force [N]	8.7	4.9	4.9		4.9
Surface treatment	Phosphated	Nitrided	Nitrided		Nitrided
3. Groove		F			FO
Ring type	ES2	SOR	SOR Step land		SOR
Ass. h1 x a1 [mm]	2.0 x 2.45	1.5 x 1.95	1.5 x 1.95		1.5 x 1.95
s1 [mm]	0.35	0.275	0.275		0.275
Tangential force [N]	30.0	12.0	8.0		12.0
Surface treatment	Nitrided	Nitrided	PVD		Nitrided
Total tangential force [N]	46.3	22.5	18.5		22.5

**3** Ring characteristics of the low friction family [4]

# **INDUSTRY** PISTONS

An effective reduction in friction requires first and foremost a lessening of the hydrodynamic friction force occurring at high piston velocities in mid stroke. Here, reducing the contact surfaces to the cylinder and the tangential forces at the ring package makes an significant contribution. In order to lessen the mixed friction in the area of TDC and the accompanying wear, compression rings can be additionally provided with friction-reducing, wearresistant coatings.

The low friction (LF) Eco ring set with nitrided steel rings display an improved ring conformability. With the top ring, the contact surfaces to the cylinder are reduced through greater curvature in the direction of stroke; with the oil ring, through a lower land height. In order to counter the danger of wear to the top and oil ring and thus to prevent an increase in FMEP over time, the LF PVD ring set is coated with PVD on the periphery. Furthermore the oil ring is likewise provided with a reduced, stepped contact surface accompanied by lower tangential force, meaning that the contact surface pressure and oil consumption remain constant.

In [4], with the AlSi cylinder surfaces, the top rings with DLC coatings display a reduction in mixed friction in the area of the dead centers Moreover, they reduce damage to the cylinder surface during running in. The simulation clearly demonstrates the effectiveness of the measures described in reducing the friction force of the ring package, which also enables the breakdown of component friction for the individual operating points via FMEP [4].

4 shows the FMEP and friction force

progression of the PCS with the standard, LF Eco and LF PVD ring set described above on the basis of the Liteks-2 piston. In ④ (bottom), the influence of reduced tangential load and shorter axial contact lengths of the LF Eco and LF PVD packages is especially clear in the upward stroke, with the system gliding on a relatively thin film of oil here.

④ (top) shows FMEP of the PCS in the characteristic map. The friction advantages of the LF Eco and LF PVD packages demonstrated in the ring simulation are depicted in the partial load characteristic map. This reveals the friction advantages in FMEP for all operating points starting with a speed of 1500 rpm. Depending on the operating point, with the LF Eco these can amount to 10 % and 22 %, and with the LF PVD, to between 26 % and 37 %.



# REDUCTION OF FRICTION AND WEAR ON THE CYLINDER BORE SURFACE

The cylinder bore surface is a critical element in the design of the piston system, and thus offers potential for optimizing friction and wear in this complex tribological system. Monolithic engine blocks are often based on Alusil technology [6]. Here, the cylinder bore surface is characterized by the mechanical exposure of primary silicon (standard honing), ③ (top left). Structure honing represents an advance on standard honing, in which the surface topography displays fine honing grooves, ③ (top right).

Thanks to the use of quasi-monolithic concepts with thermal injected ferrous-based coatings such as PTWA (Plasma Transferred Wire Arc), ③ (bottom), it is possible to combine the weight advantages of the monolithic AlSi engine block with the increased wear resistance of iron coated cylinder surfaces. In order to create a strong bond between the Al base material and the ferrous coating as well as optimum coating adherence, honing as described in [6] is necessary, taking the form of an undercut profile with the aid of special thread cutting insert.

The characteristic FMEP map and the friction force diagram of the cylinder surface technologies discussed are compared in **6**. In FMEP map, structure honing is depicted in comparison with Alusil standard honing, revealing a significant friction advantage in the region of 1000 to 2000 rpm, (top). Here, especially at a speed of 1000 rpm, depending on the load, a reduction in FMEP of 14 to 16 % was determined. Another advantage is the significant reduction in piston skirt wear. As seen in the friction force diagram, (6) (bottom left), this can be explained by the significantly reduced friction force peaks and lower mixed friction at high cylinder pressures and low rpm rates in the region of 360 to 390° CA. Both at high piston velocities and at the PCS's dead centers, the cross structure and the accompanying increased R<sub>vv</sub> values and lower R<sub>nk</sub> values resulted in a reduction of FMEP in the entire FMEP map.

Taking into account knowledge gained in previous investigations of structure honing, optimum honing parameters were determined for ensuring a further reduction in friction with ferrous coating using the PTWA method. Here, porosity provides the thermally sprayed cylinder bore surface with natural oil retention volumes, and improves lubrication at the contact point [7]. As solid lubricants, iron oxides such as Wustite (FeO) and Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) also contribute to the reduction of solid body friction. In the low rpm range, the combination of technical manufacturing and material influence factors succeeded in reducing FMEP compared with friction-optimized structure honing by a further 17 to 20 %. This is especially conspicuous at the PCSs dead centers at low piston velocities and maximum cylinder pressure, O (bottom).

# SUMMARY AND OUTLOOK

The Kolbenschmidt Pierburg Group offers the complete development of the piston, piston ring and cylinder surface systems, with the focus on optimizing friction behaviour and wear resistance of the complete system. By means of the friction force investigations depicted above, the effectiveness of measures for reducing friction losses in the entire PCS were quantified. The catalogue of measures for





Confocal microscope images (50x) – AISi cylinder surfaces in area of top ring upper reversal, operating period 30 h in all cases: Alusil standard honing (top left), Alusil structure honing (top right), PTWA-coating (bottom)



reducing losses in the pistons includes, among other things, the weight-reduced Liteks piston design with noise- and friction-optimized asymmetric skirt profile and the nano particle-reinforced PAI coating Nanofriks on the piston skirt. Together these measures resulted in a reduction of FMEP of up to 24 %.

In future, other advantages will arise from the lightweight design of the Liteks-3 generation thanks to the new Al-alloy KS309. In the crown area, for example, improved material strength will lead to a substantial reduction in wall thickness of up to 25 %. In the side-wall area, finishcast wall thicknesses can for the first time be reduced to the minimum 2 mm wallthickness required for strength reasons.

The low-friction ring family from NPR, with reduced tangential loads, narrower

contact surfaces at the compression and oil ring and matched peripheral surface coating, contributes significantly to minimizing friction, accounting for up to 38 % of the reduction within the power cylinder system.

In nearly all operating points of the FMEP map, structure honing was shown to reduce friction. Furthermore, it was demonstrated that quasi-monolithic concepts with ferrous coatings and corresponding final treatment and intelligently selected surface topography offer additional potential for reducing wear while simultaneously lowering friction in the PCS by up to 36 %.

### REFERENCES

[1] Buschbeck, R.; Hanke, W.; Ottliczky, E.; Weimar, H.-J.: Innovative Kolbensystemlösungen für Verbrennungsmotoren. In: MTZ extra 100 Jahre Kolbenschmidt Pierburg, 2010, pp. 64 [2] Scherge, M.; Rehl, A.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen am tribologischen System Kolbenring-Zylinderlaufbahn. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2010
[3] Hanke, W.; Buschbeck, R.; Letourneau, S.; Sinclair, D.; Skiadas, A.; Urabe, M.; Takiguchi, M.: Power Cylinder System Friction and Weight Optimization in High Performance Gasoline Engines. SAE 2009-01-1958

[4] Hanke, W.; Buschbeck, R.; Rehl, A.; Voigt, M.; Urabe, M.: Reibungs- und Gewichtsoptimierung in Kolbensystemen für moderne aufgeladene Ottomotoren. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2010

[5] Rasheva, Z.; Burkhart, T.; Rehl, A.; Janke, M.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen von verstärkten Polyamidimid Harzen für Kolbenschaftbeschichtungen. GfT Fachtagung, Göttingen, 2010
[6] Köhler, E.; Beer, S.; Klimesch, C.; Niehues, J.; Sommer, B.: Leichtbau beim Zylinderkurbelgehäuse. In: MTZ 70 (2009) No. 10

[7] Schwenk, A.; Verpoort, C.; Bobzin, K.; Ernst, F.; Richard, K.; Schläfer, T.: Nanokristalline Beschichtung von Zylinderlaufbahnen im Rahmen des "Nanomobil" BMBF-Programms. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, Baden-Baden, 2008