

# KURBELWELLENLAGER FÜR MOTOREN MIT START-STOPP-SYSTEM

Mit steigender Effizienz moderner Verbrennungsmotoren wachsen auch die Anforderungen an die Motorlager. Start-Stopp-Systeme beispielsweise erhöhen je nach Fahrsituation die Zahl der Zyklen, bei denen Kurbelwelle und Lagerschalen eine Phase der Mischreibung durchlaufen. Eine neue Gleitschicht von Federal-Mogul auf Basis von mikroarmiertem Polyamidimid verhindert den Verschleiß, den metallische Laufflächen unter solchen Bedingungen typischerweise zeigen.



Kurbelwellen-Lagerschalen mit Irox-Schichtsystem

## AUTOREN



**DR. ACHIM ADAM**  
ist Manager Material Development  
Polymers bei der Federal-Mogul  
Wiesbaden GmbH in Wiesbaden.



**MICHEL PREFOT**  
ist Vice President Technology  
and Innovation Bearing PTSB bei  
der Federal-Mogul Corporation in  
Wiesbaden.



**MAIK WILHELM**  
ist Manager Product Test and  
Development bei der Federal-Mogul  
Wiesbaden GmbH in Wiesbaden.

## ERHÖHTER VERSCHLEISS DURCH START-STOPP-SYSTEME

Gleitlager für den Einsatz im Motor müssen für immer höhere spezifische Belastungen ausgelegt werden. Dazu zählen höhere Zünddrücke, höhere Temperaturen, kleinere Lagerabmessungen und eine stärkere Kurbelwellendurchbiegung, die durch Leichtbaumaßnahmen verursacht wird. Auch eine tendenziell sinkende Ölviskosität sowie ein steigendes Maß an Ölverdünnung durch Kraftstoffe wie E85 sind nur einige weitere Punkte auf einer zunehmend langen Liste harter Betriebsbedingungen. Gleichzeitig sollen Gleitlager möglichst geringe Reibkoeffizienten aufweisen, um die inneren Verluste des Motors gering zu halten.

Eine besondere Anforderung bringen Start-Stopp-Systeme mit sich, mit denen immer mehr Fahrzeuge ausgerüstet werden. Ihren Verbrauchsvorteil von typischerweise 5 % und mehr erreichen sie durch konsequentes Abstellen des Motors bei Fahrzeugstillstand. Um dabei die Fahrbarkeit nicht zu beeinträchtigen, wird der Motor sehr schnell wieder gestartet, sobald der Fahrer das Kupplungspedal betätigt.

Für die Kurbelwellen-Lagerschalen und die Pleuellager kann das häufige, schnelle Drehbewegungen vor dem vollständigen Aufbau eines hydrodynamischen Films bedeuten. In dieser Mischreibungssituation

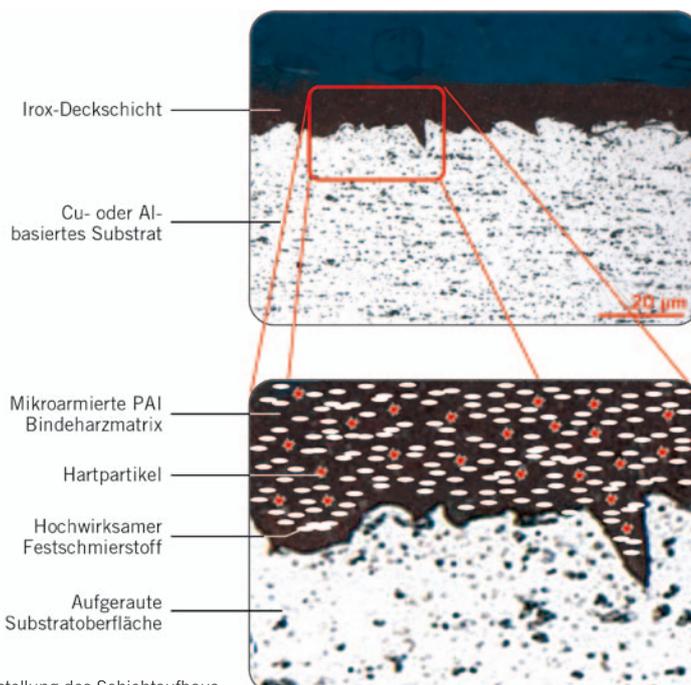
kommt es zum Festkörperkontakt zwischen der Oberfläche der Kurbelwelle und der Laufschrift des Gleitlagers. Was bei der bisher üblichen Zahl an Startvorgängen eines Fahrzeugs völlig unproblematisch war, kann je nach Fahrzyklus bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-Systemen neue technische Lösungen verlangen, um einen vorzeitigen Lagerverschleiß zu verhindern. So müssen künftige Motoren mit Start-Stopp-System für 250.000 bis 300.000 Startzyklen ausgelegt sein. Klassische Lagerschalen mit Aluminiumsubstrat oder Kupfersubstrat als Deckschicht zeigten im Test bereits nach 100.000 Zyklen deutlichen Verschleiß.

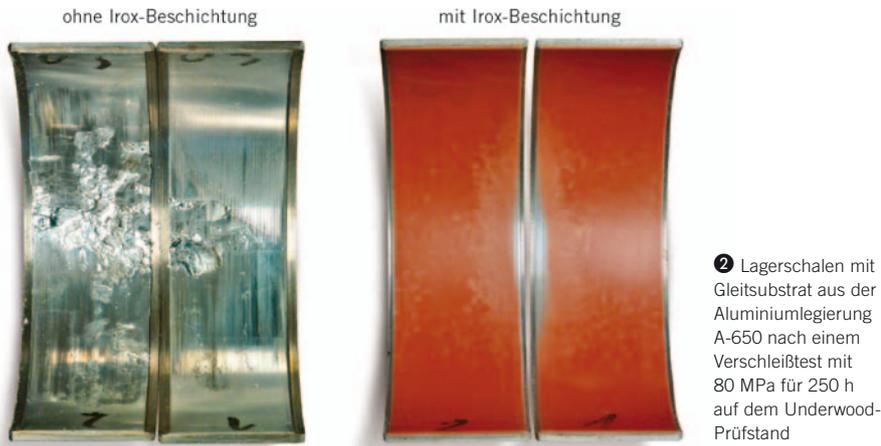
Eine Maßnahme zum Schutz der Kurbelwellenlagerung ist die neu entwickelte und zum Patent angemeldete, „Irox“ genannte Gleitschicht auf der Basis von Polyamidimid mit Füllstoffen. Sie verhindert Lagerverschleiß auch bei häufiger Mischreibung und ist damit für den Start-Stopp-Betriebsmodus optimal geeignet – sogar in Verbindung mit Gusskurbelwellen. Außerdem ertüchtigt die neue Schicht Lagerschalen mit aluminiumbasierter Gleitschicht für Belastungen, die bisher kupferbasierte Schichtaufbauten verlangten.

## AUFBAU DES SCHICHTSYSTEMS

Das neue Schichtsystem besteht aus drei Komponenten: Ein stählerner Rücken sorgt für die mechanische und geometrische Stabilität der Lagerschale. Darauf ist ein Gleitlagersubstrat aufgebracht, das die jeweils erforderliche tribologische Materialcharakteristik aufweist. Bei heutigen Serienfahrzeugen sind dies durchweg bleifreie Substrate, meist auf der Basis von Aluminium- oder Kupferlegierungen, wobei aluminiumbasierte Kurbelwellenlager eher für niedrige bis mittlere spezifische Belastungen ( $\leq 70$  MPa) eingesetzt werden und kupferbasierte Lager (CuNi2Si) für mittlere bis hohe spezifische Belastungen. Für die Lebensdauer der Lager ist dabei im besonderen Maße die oberste Schicht entscheidend. Bei Irox-Lagern besteht sie aus Polyamidimid (PAI) mit Füllstoffen, ❶.

Das mikroarmierte PAI wird auf dem Gleitsubstrat dauerhaft verankert und ist eine Lebensdauerschicht. In die Harzmatrix sind mehrere homogen verteilte Füllstoffe mit teilweise extrem feiner Korngröße eingebracht. Seine typische rotbraune Gleitschichtfarbe beispielsweise erhält das Lager von einer Mikroarmierung durch feinst





② Lagerschalen mit Gleitsubstrat aus der Aluminiumlegierung A-650 nach einem Verschleißtest mit 80 MPa für 250 h auf dem Underwood-Prüfstand

verteilte Oxidpartikel. Etwas grobkörnigere Hartpartikel aus einem anderen Material dienen ebenfalls dazu, die Verschleißfestigkeit der Laufschrift zu steigern. Zusätzlich eingebettete Festschmierstoffpartikel sorgen für ein gutes Gleitverhalten bei lokalem Festkörperkontakt.

Das PAI selbst ist ein hochtemperaturfestes amorphes Polymer mit hoher Chemikalienbeständigkeit und hoher Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb. Hinzu kommt, dass es sich für die vorliegende Anwendung optimal verarbeiten lässt. Grundsätzlich kann die Gleitschicht aus PAI und Oxid auf alle typischen Gleitlagersubstrate auf Aluminium-, Kupfer- und Bronzebasis gleichermaßen gut aufgebracht werden.

## VERHALTEN IM BETRIEB

Seine gute Verschleißbeständigkeit verdankt das Irox-Schichtsystem der Kombination mehrerer materialtypischer Eigenschaften. Aufgrund seines Benetzungsverhaltens baut sich der für die Funktion eines Motorgleitlagers entscheidende hydrodynamische Film auf der Gleitschicht schneller auf. Gleichzeitig ist die PAI-Schicht elastisch, kann durch ihr niedrigeres E-Modul Festkörperspitzen auf der Gegenauflfläche besser kompensieren und weist eine außerordentliche Verschleißfestigkeit auf.

Vor dem Auftrag des mikroarmierten PAI wird das Substrat gezielt aufgeraut, ①. Dies bewirkt im späteren Betrieb zweierlei: Zum einen kann die PAI-Schicht trotz ihrer hohen Duktilität Schubspannungen aus beliebigen Richtungen dank der Mikroverklammerung im Substrat wirkungsvoll abstützen, zum anderen bewirkt die Mikroverklammerung im Substrat ein günstigeres Verschleißverhalten.

Kommt es lokal zum Abtrag der Deckschicht, so verhindern die zahlreichen Spitzen des Substrats ein Fortsetzen des Abtrags, weil es nur punktuell zum Kontakt kommt. Selbst bei Kantenträgern zeigt die Deckschicht daher keine Anrisse, sondern nur lokal begrenzten Verschleiß. Dies ist insofern bedeutsam, als Lagerschäden und Fressen bei aluminiumbasierten Substraten in der Regel von solchen Anrissen ausgehen, die sich dann eskalierend fortsetzen.

In diesem Zusammenhang kommt noch eine weitere Materialcharakteristik des neuen Schichtsystems zum Tragen: Die Elastizität der mikroarmierten PAI-Gleitschicht wirkt sich vorteilhaft auf die Dämpfungseigenschaften des Gleitlagers aus. Auch die Fähigkeit zur Einbettung von Mikropartikeln in die PAI-Matrix ist in einem gewissen Umfang gegeben.

Da PAI kein guter Wärmeleiter ist, begrenzt die Deckschicht außerdem den Wärmeeintrag in das darunter liegende Substrat. Das erweist sich vor allem bei aluminiumbasierten Substraten als günstig. Im Hinblick auf die Rauheitsanforderungen an die Gegenauflfläche unterscheidet sich das Irox-Schichtsystem nicht von anderen Pleuellagerungen. Dafür zeigt das neue Schichtsystem ein optimales Betriebsverhalten, gerade mit Gusswellen als Gegenauflfläche.

## EIGNUNG FÜR GUSSKURBELWELLEN

Der Einsatz von Pleuellagen aus Grauguss (Nodular Cast Iron, NCI) mit feinen Graphiteinschlüssen stellt besondere Anforderungen an Pleuelager. Für die Gefügestruktur von NCI sind harte ferritische

Höfe rings um die Graphiteinschlüsse charakteristisch. Selbst bei sorgfältiger Oberflächenbearbeitung durch Polieren kann man hier eine sogenannte Blechdeckelbildung beobachten. Unter Blechdeckeln versteht man die nicht entfernten Kappen über den Graphitnestern, die unter Umständen während des Motorbetriebs aufbrechen können. Ohne eine geeignete Mechanik im Pleuelager, die dieses Phänomen kompensiert, können Gusswellen daher schnell zum Fressen des Lagers führen. Bei der Irox-Gleitschicht verhindert eine Polierwirkung der eingebetteten Hartpartikel in Verbindung mit der Duktilität des Polymers solche Probleme.

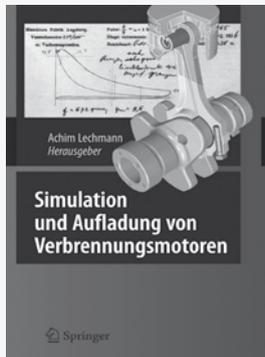
## TESTERGEBNISSE

Um die Eignung des neuen Schichtsystems für die extremen Anforderungen im Start-Stopp-Betrieb zu untersuchen, wurden die Pleuelager vielfältigen, harten Tests unterzogen. ② zeigt den Zustand zweier Pleuellager-Schalen, die mit dem identischen Substrat aus einer optimierten Aluminiumlegierung A-650 (AlSn6Si4CuMnCr) beschichtet sind. In einem Fall liegt darüber eine zusätzliche Irox-Gleitschicht, während bei den Vergleichslagern das Aluminiumsubstrat selbst als Gleitschicht dient.

Beide Materialien wurden bei 80 MPa unter ansonsten identischen Rahmenbedingungen auf einem Underwood-Prüfstand getestet. Obwohl es sich bei A-650 um eine optimierte Aluminiumlegierung mit feinkörnigem Siliziumeinschluss handelt, weist die Lauffläche deutliche Schäden auf, während die Irox-Schicht nur an den Kanten lokal eng begrenzten Verschleiß zeigt. Dieses Testergebnis belegt eindrucksvoll, dass es tatsächlich allein die Eigenschaften der Deckschicht sind, die ein Substrat für eine Anwendung ertüchtigen können.

Bei Pleuellagern mit Aluminiumsubstrat ließ sich mit der Irox-Deckschicht eine deutliche Ermüdungsfestigkeitssteigerung zeigen. Damit kann das neue Schichtsystem aluminiumbasierte Pleuellager-Schalen für bis zu 25 % höhere spezifischen Belastungen ertüchtigen, die bisher kupferbasierten Schichtaufbauten vorbehalten waren. Aufgebracht auf kupferbasierte Substrate, ließen sich mit Irox erfolgreich Motorentestläufe mit bis zu 105 MPa absolvieren.

# Fachbücher für Ingenieure



Neben der Schadstoff-Diskussion rückt vor dem Hintergrund der drohenden Klimaveränderung durch den Treibhauseffekt aktuell die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in den Fokus der Motorenentwicklung. Zahlreiche namhafte Autoren aus Industrie und Forschung beschreiben den aktuellen Stand der Motorprozessrechnung und die Aufladetechnik. Grundlagen, Methoden und ihre Anwendungen werden anschaulich vermittelt.

2008. XX, 492 S. 310 Abb., 210 in Farbe. Geb.  
ISBN 978-3-540-79285-7  
► € (D) 114,95 | € (A) 118,17 | \*sFr 154,50



Vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Diskussion nimmt der Dieselmotor, unter Berücksichtigung seiner Flexibilität und Leistungsvermögens, der Emissionen und Robustheit, eine Spitzenstellung im Vergleich zu allen anderen Antriebsmaschinen ein. In dieser Auflage wird den Themen Energieeffizienz, Abgasemission, Abgasnachbehandlung, Einspritztechnik, elektronisches Motormanagement, konventionelle und alternative Kraftstoffe mehr Raum gewidmet.

3., neu bearb. Aufl. 2007. XII, 704 S. 632 Abb., 52 in Farbe. (VDI-Buch) Geb.  
ISBN 978-3-540-72164-2  
► € (D) 114,95 | € (A) 118,17 | \*sFr 154,50  
VDI-Mitgliedspreis  
► € (D) 103,46 | € (A) 106,36 | \*sFr 139,00



Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge sind weiter Verbesserungen an Kraftstoffverbrauch, Sicherheit, Komfort, Zuverlässigkeit, Transportkapazität oder Betriebskosten zu berücksichtigen. Detailliert beschreibt dieses Buch den Stand der Entwicklung und Perspektiven für unterschiedliche Fahrzeugkategorien. Ein kompakter Einblick in moderne Methoden und Optimierungsmaßnahmen.

2008. XVIII, 390 S. 315 Abb. in Farbe. Geb.  
ISBN 978-3-540-74150-3  
► € (D) 59,95 | € (A) 61,63 | \*sFr 80,50

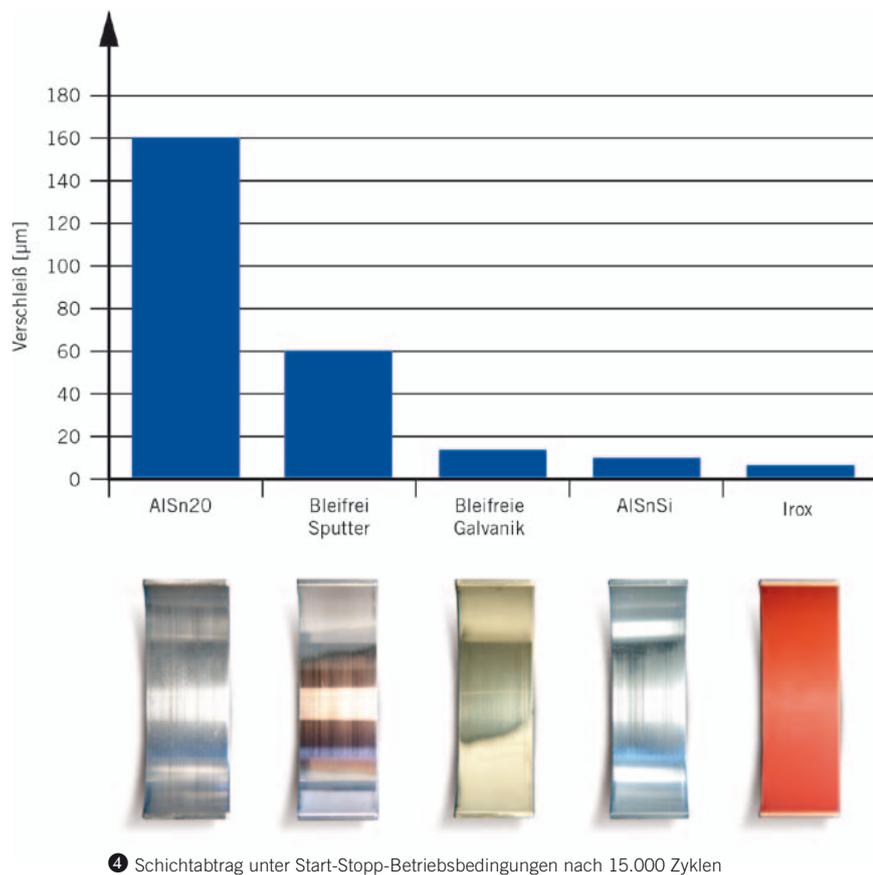
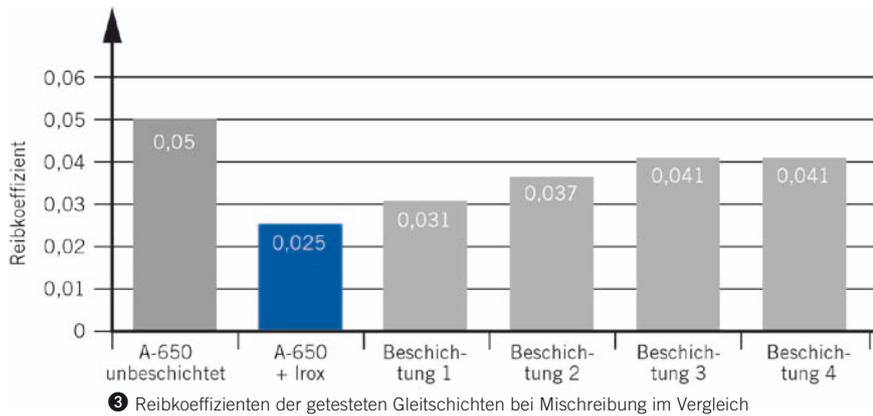


Fundierte Qualitätskriterien entscheiden über die Realisierungsmöglichkeiten zukünftiger Antriebskonzepte. Das Buch liefert eine Übersicht zur Analyse der Prozesse, zu Antriebsmaschinen und Energieträgern, die in komplexen Energie-Management-Systemen für Automobile kombinierbar sind. Die 2. Auflage wurde um aktuelle Entwicklungen erweitert, alle Kapitel wurden aktualisiert.

2., erw. Aufl. 2008. XVI, 344 S. 200 Abb. Geb.  
ISBN 978-3-540-76372-7  
► € (D) 114,95 | € (A) 118,17 | \*sFr 154,50

Mehr Infos auf ► [springer.de](http://springer.de)

Bei Fragen oder Bestellung wenden Sie sich bitte an ► Springer Customer Service Center GmbH, Haberstr. 7, 69126 Heidelberg ► Telefon: +49 (0) 6221-345-4301  
► Fax: +49 (0) 6221-345-4229 ► Email: [orders-hd-individuals@springer.com](mailto:orders-hd-individuals@springer.com) ► € (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt; € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit \* gekennzeichneten Preise für Bücher und die mit \*\* gekennzeichneten Preise für elektronische Produkte sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. ► Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.



Bei weiteren Tests auf einem HFRR-Prüfstand (High Frequency Reciprocating Rig) zeigte sich, dass die Irox-Schicht den Reibungskoeffizienten gegenüber einer unbeschichteten Aluminiumauflagefläche aus A-650 um die Hälfte reduziert. Auch im Vergleich zu anderen Polymerschichten, wie sie etwa zur Kolbenhemdbeschichtung verwendet werden, lag der Reibkoeffizient von Irox um 20 bis 40 % niedriger, ③.

④ zeigt die Ergebnisse verschiedener Lagertypen in einem von vielen Tests, hier

aus dem sogenannten Sapphire-Prüfstand. Der Verschleiß der Irox-Gleitlager lag bei einem Start-Stopp-Betriebszyklus in vielen Versuchsläufen sogar deutlich unter dem Niveau von Lagern mit Sputterschicht, die für ihre ausgezeichnete Verschleißbeständigkeit bekannt ist. Das Ergebnis war durch sämtliche Tests hinweg konsistent und reproduzierbar:

Bei Motorentests wurden die Lager sowohl mit normalem Ottokraftstoff als auch mit E85 getestet. Trotz des Ethanol-

anteils im E85 und der damit einhergehenden Ölverdünnung durch den Alkohol veränderte sich das Verschleißverhalten des Irox-Schichtsystems nicht, während ein Aluminiumzweischichtlager mit dem bisher gängigen Substrat A-590 (AlSn6Si-4CuMnCr mit größerem Si-Korn) im Test mit E85 versagte.

Aus diesen Ergebnissen kann man ableiten, dass das neue Schichtsystem ein Potenzial zur Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz von Motorölen mit geringerer Viskosität bietet. Außerdem ließ sich in Tests nachweisen, dass die Irox-Gleitschicht im Vergleich zu anderen Schichten unempfindlicher gegen geringe Lagerspiele ist.

**ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Mit dem neuen Irox-Schichtsystem steht eine Lösung für Verbrennungsmotoren mit hohem Mischreibungsanteil zur Verfügung. Die Lebensdauerschicht aus mikroarmiertem PAI verhindert einen vorzeitigen abrasiven Verschleiß, den metallische Gleitflächen unter solchen Betriebsbedingungen zeigen können. Wegen ihrer hohen Temperaturbeständigkeit, den guten Dämpfungseigenschaften und der Toleranz gegenüber Ölverdünnung, beispielsweise bei der Verwendung von E85, ist das neue Schichtsystem geeignet für moderne Pkw- und Nfz-Motoren mit hoher thermomechanischer Effizienz und entsprechend hohen Anforderungen an die motorischen Gleitlager. Auch zum Einsatz niedrig viskoser Motoröle (High-Temperature High-Shear Rate, HTHS 2,6...2.1) kann die mikroarmierte PAI-Schicht einen Beitrag leisten. Die Fertigung für die erste Serienanwendung in hohen Stückzahlen ist für den April 2011 geplant. Im Zuge der weiteren Entwicklung soll erforscht werden, welches Potenzial das Irox-Schichtsystem für Gleitlager in hoch belasteten Nebenaggregaten, bei Anlaufscheiben oder in Automatikgetrieben, bietet.

DOWNLOAD DES BEITRAGS  
www.MTZonline.de

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
order your test issue now:  
SpringerAutomotive@abo-service.info

# Ihr zündendes Autowissen

## **Detailwissen**

### **Konkret, themenspezifisch, flexibler Einband**

Für den Bedarf an inhaltlich enger zugeschnittenen Themenbereichen bietet die siebenbändige broschiierte Reihe das ideale Angebot. Mit deutlich reduziertem Umfang, aber gleicher detaillierter Darstellung wird das Hintergrundwissen zu konkreten Aufgabenstellungen professionell erklärt.



### **Batterien, Bordnetze und Vernetzung**

2010. 228 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1310-7

### **Dieselmotor-Management im Überblick**

einschließlich Abgastechnik  
2010. 210 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1313-8

### **Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe**

mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen  
2010. 213 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1303-9

### **Bremsen und Bremsregelsysteme**

2010. 159 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1311-4

### **Moderne Diesel-Einspritzsysteme**

Common Rail und Einzelzylindersysteme  
2010. 172 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1312-1

### **Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme**

2010. 222 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1314-5

### **Sensoren im Kraftfahrzeug**

2010. 176 S. Br. EUR 24,95  
ISBN 978-3-8348-1315-2