



Verbrauch und Emissionen senken

Reibungsreduktion bei Ottomotoren

Die Reduzierung der inneren Reibung und die Untersuchung der tribologischen Einflüsse ist eines der primären Entwicklungsziele für zukünftige Motorenkonzepte, um Verbrauch und Emissionen zu senken. Die Mahle-Gruppe intensiviert daher ihre Entwicklungsaufwände zur weiteren Reibungsoptimierung des vorhandenen und zukünftigen Produkt-Portfolios. Neben der direkten Optimierung der Einzelkomponenten steht daher besonders die Untersuchung der Einflüsse der Optimierungsansätze auf das Reibungsverhalten des Vollmotors im Vordergrund der Entwicklungsarbeit. Als Beispiel diente bei den Untersuchungen ein aufgeladener Pkw-DI-Ottomotor mit 2 l Hubraum.

1 Einführung

Neben neuen Brennverfahren und Hybridkonzepten wird auch das Teilgebiet Reibungsoptimierung immer wichtiger, um zukünftige Verbrauchsziele und Emissionsgrenzen zu erfüllen. Bei modernen Ottomotoren mit Magerkonzepten oder variablen Ventiltriebssystemen nimmt der Einfluss der Reibung besonders im Teillastbetrieb in Folge des entdrosselten Betriebs signifikant zu.

Da eine Lastpunktverschiebung in Folge reduzierter Reibungsverluste nicht mit steigenden Drosselverlusten einhergeht, können die erzielten Reibungspotenziale bei modernen Motoren noch effektiver umgesetzt werden.

2 Gesamtmotor

Als Versuchsmotor diente ein 2-l-Ottomotor mit Abgasaufladung und Direkteinspritzung. Entscheidend für die Auswahl dieses Motors waren ein moderner Aufbau nach neuestem Stand der Technik, Direkteinspritzung und hohe Spitzendrücke. Primäres Ziel bei den durchgeführten Untersuchungen war es, jeden Reibungsparameter einzeln und im Bezug auf das Gesamtsystem zu betrachten, um daraus Empfehlungen für den Einsatz neuer Technologien für neue Motorkonzepte ableiten zu können.

Zur Ermittlung der Reibungsverluste des Gesamtmotors beziehungsweise der Bauteileinflüsse wurde ein so genanntes Tear-down-Verfahren verwendet. Zusätzlich wurde für die Ventiltriebsuntersuchungen ein speziell für diese Bedingungen ausgelegter Schleppprüfstand eingesetzt. Um Einlaufeffekte zu vermeiden, wurden die Versuchsmotoren vor den eigentlichen Reibungsuntersuchungen einem sechzigstündigen Stabilisierungszyklus unterzogen.

Betrachtet man die Reibungsaufteilung des serienmäßigen Versuchsmotors, **Bild 1**, so fällt besonders der Reibungsanteil der Pleuellagerung und der Pleuelbolzen, bestehend aus Pleuelbolzen, Pleuelnuten und Pleuelbolzenbolzen auf. All diese Bauteile zusammen werden auch Pleuel Power Cell Unit (PCU) genannt. Auch in modernen Motoren zählen diese Motorkomponenten mit über 40 % Reibungsanteil zu den größten Einflussfaktoren in Bezug auf die motorischen Reibungsverluste. Einen weiteren signifikanten Beitrag zur Reibung trägt der Ventiltrieb bei, dessen Einfluss besonders bei niedrigen Drehzahlen bis zu 16 % ausmacht.

3 Ventiltriebsoptimierung

Die Hauptbestandteile des Ventiltriebs sind die sechsfach gelagerten Ein- und Auslassnockenwellen und die Rollen-

Die Autoren



Dipl.-Ing.
Jörg Rückauf
ist Leiter der zentralen Voraussentwicklung bei der Mahle International GmbH in Stuttgart.



Dipl.-Ing.
Boris Lerch
ist Versuchsingenieur in der zentralen Voraussentwicklung der Mahle International GmbH in Stuttgart.

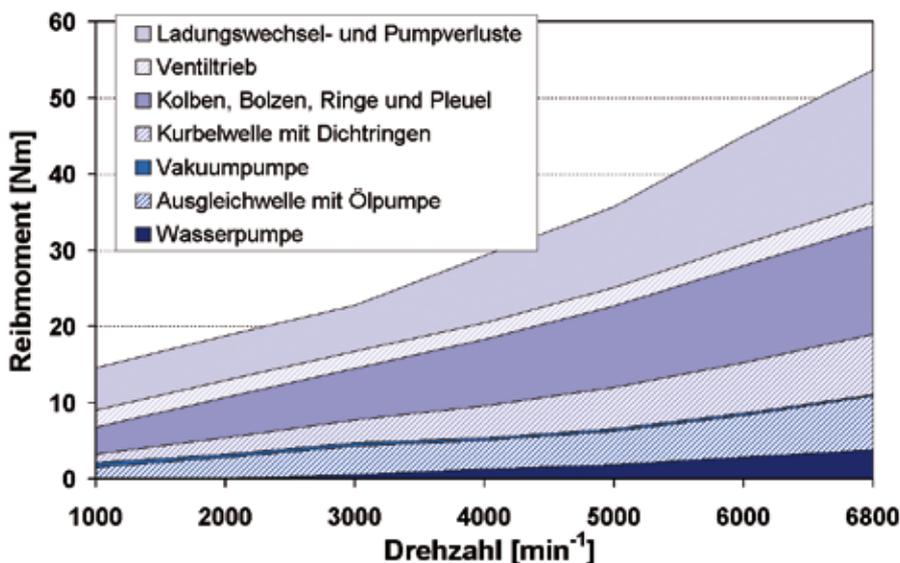


Bild 1: Messergebnisse der Reibungsaufteilung der einzelnen Motorkomponenten für den Serienmotor

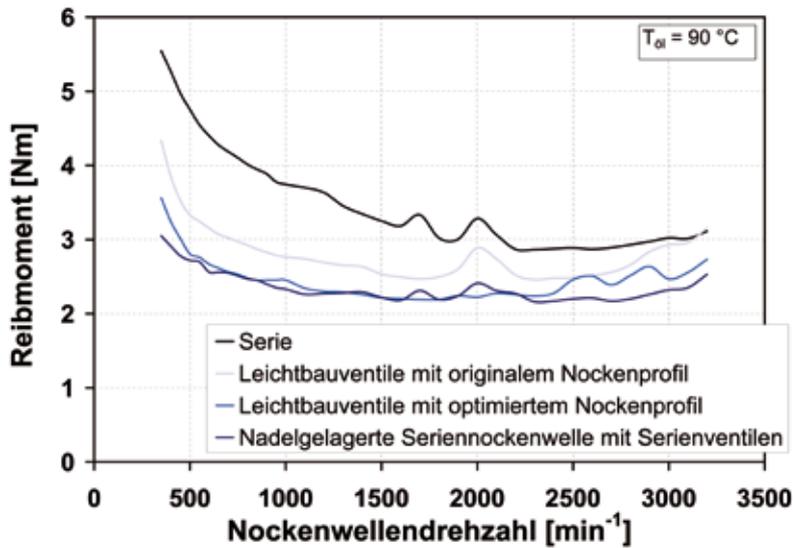


Bild 2: Messergebnisse der Reibleistungsuntersuchung für den Ventiltrieb

schlepphebel mit hydrodynamischem Ventilspielausgleich. Durch diese Konfiguration wird schon im Serienzustand ein sehr niedriges Reibungsniveau realisiert. Bei den Untersuchungen wurden die gewählten Optimierungsansätze in zwei Gruppen unterteilt: Der erste Ansatz war die Optimierung der Nockenwellenlagerung, indem gebaute Nockenwellen mit Wälzlagerung verwendet wurden. Der zweite Ansatz war die Verwendung von Leichtbauventilen in Kombination mit angepassten Ventilfederraten und Federkennlinien.

Der Einfluss der Hauptlagerreibung zeigt sich im Ventiltrieb besonders bei niedrigen Drehzahlen. Durch den Mischreibungsbereich der Hauptlager sind die Reibungsverluste in niedrigen Drehzahlen größer als bei maximaler Motordrehzahl. Durch den Einsatz einer Wälzlagerung kann hier eine signifikante Verbesserung realisiert werden. Der Vorteil der Wälzlagerung zeigt sich auch bei höheren Drehzahlen. Die Reduzierung der Reibungsverluste bei höheren Drehzahlen lässt sich an Hand der nicht optimal arbeitenden hydrodynamischen Gleitlagerung erklären. Die stoßartigen Kraftimpulse, welche im Betrieb auftreten, müssen durch den hydrodynamischen Schmierfilm der Gleitlager aufgefangen werden. Dadurch treten im gesamten Drehzahlbereich erhöhte Scherkräfte auf, die zu Mischreibungszuständen führen können.

Die Ergebnisse der Ventiltriebsuntersuchungen in Bild 2 zeigen ein maximales Reduzierungspotenzial von bis zu 44 % bei niedrigen Drehzahlen. Bei maximaler Motordrehzahl liegt das Reibungsniveau immer noch 20 % unter dem Serienventiltrieb. Ein weiterer Vorteil einer wälzgelagerten Nockenwelle ergibt sich aus der geringeren Ölbedarfsmenge des Ventiltriebs. In Folge dessen sinkt die nötige Antriebsleistung der Ölpumpe; im Einzelfall kann sogar eine kleinere Ölpumpe verwendet werden. Für den hier beschriebenen Aufbau konnte eine ausreichende Schmierung der Wälzlager durch das

im Zylinderkopf befindliche Spritzöl bewerkstelligt werden.

Die Verwendung von Leichtbauventilen (LBV) war der zweite Ansatz, der während des Optimierungsprozesses angewandt wurde. In Folge der um 40 % reduzierten Gesamtmasse der Leichtbauventile können die Ventilfederkräfte abgesenkt werden. Mit Hilfe einer 1D-Simulation wurden die Ventilfederkennlinien neu ausgelegt und die Federrate um 50 % verringert, ohne dass die Dynamik des Ventiltriebs verschlechtert wurde. Bei aufgeladenen Motoren muss hier den Federn der Auslassventile aufgrund des hohen Abgasgedruckes besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um ein ungewolltes Öffnen zu verhindern. Während des Auslegungsprozesses wurden mehrere Federvarianten intensiven Tests unterzogen. Mit den optimal ausgelegten Ventilfedern wird ein Verbesserungspotenzial von bis zu 35 % erreicht. Der Hauptgrund für die ebenfalls starke Reduzierung der Reibungsverluste ist die herabgesetzte Lagerbelastung in Folge des reduzierten Gewichts der Leichtbauventile und der niedrigeren Federraten. Ebenso wurde die Kontaktreibung am Rollenabgriff durch diese Parameter reduziert, deren Einfluss am Gesamtpotenzial ist allerdings deutlich geringer als die Hauptlagerreibung. Das Potenzial des Leichtbauventils kann durch ein angepasstes Nockenprofil noch weiter gesteigert werden.

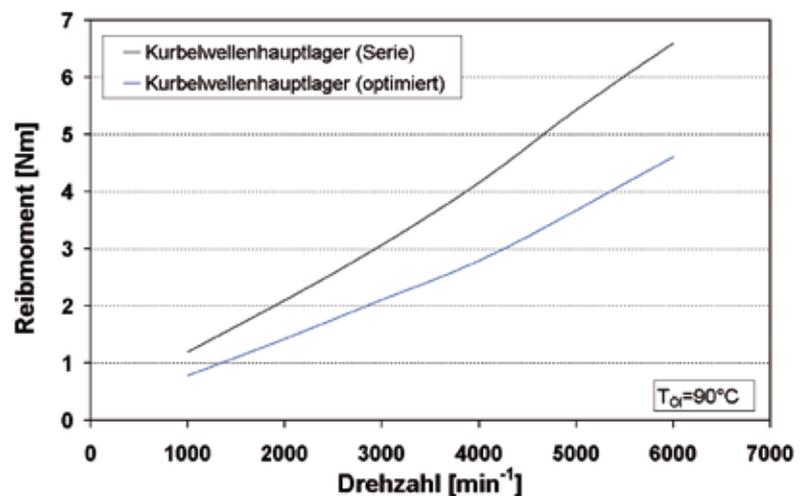


Bild 3: Hauptlagerreibung der Gleitlager der Kurbelwelle (Variation der Breite)

Die Paarung von Leichtbauventilen mit reduzierten Ventildfederkräften erlaubt es, mit höheren Ventilbeschleunigungen zu arbeiten. Somit kann mit einer steileren Öffnungs- und Schließflanke gearbeitet und gleichzeitig der maximale Ventilhub reduziert werden. Dieser Ansatz wurde gewählt, um die Reibung zu senken, ohne die Luftmasse im Vergleich mit dem Serienprofil negativ zu beeinflussen. Im Vergleich mit dem Serienprofil konnten so die Reibungsverluste im Durchschnitt um weitere 5 % über den gesamten Drehzahlbereich verringert werden.

4 Optimierung der Lagereinheit für die Kurbelwelle

Die PCU hat, wie einleitend beschrieben, den größten Anteil der inneren Reibung bei Verbrennungsmotoren. Die beiden Haupteinflussgrößen sind hierbei die Kolbengruppe und die Lagereinheit der Kurbelwelle.

Die Lagereinheit der Kurbelwelle ist der zentrale Schnittpunkt der PCU-Reibung. Oftmals wirken sich Optimierungsansätze im Kolbenbereich (zum Beispiel in Richtung einer Gewichtreduktion) erst in der Verringerung der Lagerbelastung aus. Durch eine vollständige Neuauslegung inklusive Berechnung und Simulation wurde ein neues Konzept für die hydrodynamische Gleitlagerung der Kurbelwellenhauptlager und der Pleuellager entwickelt.

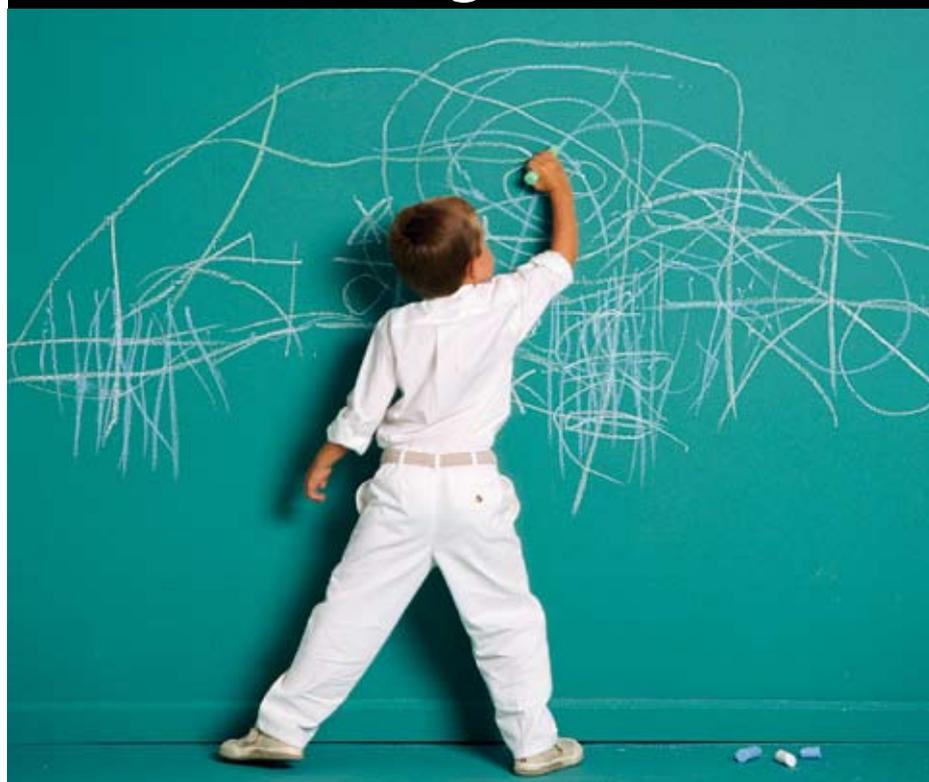
Die Lagerbreite konnte für beide Lager um 5 % reduziert werden. Die damit verbundene Erhöhung der Tragflächenbelastung erforderte eine vollständig neue Konstruktion der Gleitlager, um eine vergleichbare Haltbarkeit wie beim Serienmotor zu gewährleisten. Dafür wurden auch die Kurbelwelle und die Pleuel an die neuen Abmessungen angepasst und neu ausgelegt. Mit den beschriebenen Veränderungen war es möglich, die Hauptlagerreibung im Vergleich mit dem Serienmotor unter gleichen Betriebsbedingungen um 20–30 % abzusenken, **Bild 3**. Dies beinhaltet ein nominell reduziertes Reibmoment von 2 Nm bei 6000/min nur im Bereich der Hauptlagerung.

5 Verbesserungen an der Kolbengruppe

Den zweiten wesentlichen Anteil der PCU-Reibung hat die Kolbengruppe selbst. Eine Optimierung der Kolbenreibung muss allerdings unter Betrachtung der für einen einwandfreien Motorbetrieb nötigen Randbedingungen erfolgen. Hierbei spielen Parameter wie Fressicherheit, Ge-

räuschemissionen, Ölverbrauch beziehungsweise Blow-by eine entscheidende Rolle. Die Haupteinflussfaktoren der Kolbenreibung sind die Kontaktreibung des Kolbenhemdes und das Einbau- beziehungsweise Laufspiel des Kolbens. Optimierungsansätze im Bereich der Ringe sind zum Beispiel: Ringhöhen, Tangentialspannungen und Ringform.

➔ Von Anfang bis Ende



Wir entwickeln Getriebe bis zur Serie

GEARS GO GIF



Gesellschaft für Industrieforschung mbH

www.gif.net | info@gif.net



Bild 4: Monotherm-Kolben aus Stahl – von der bisherigen Anwendung im Nutzfahrzeug zum Pkw-Ottomotor

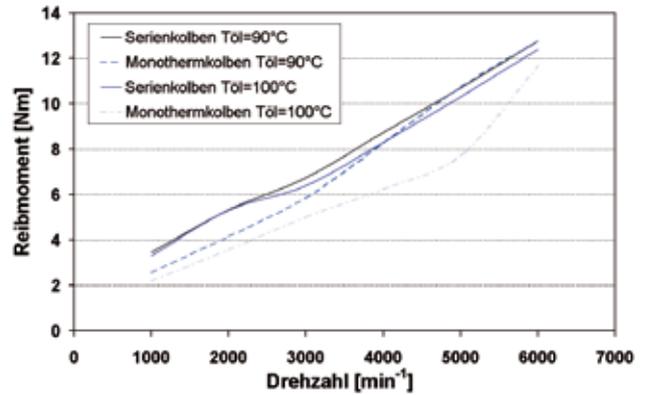


Bild 5: Kolbenreibung des Monotherm-Stahlkolbens bei Öltemperaturvariationen im Vergleich mit der des Serien-Aluminiumkolbens

Am beschriebenen Versuchsmotor wurde ein vollständig neuer Ansatz mit einem Stahlkolbenkonzept untersucht, das die Aluminiumkolben ersetzt. Dabei wurden Monotherm-Stahlkolben, **Bild 4**, mit einer Grafal-Beschichtung des Kolbenhemds, optimierten Kolbenringen und einem DLC-beschichteten Kolbenbolzen verwendet.

Monotherm-Kolben werden schon seit längerem serienmäßig in Nutzfahrzeugmotoren eingesetzt. Auch für Pkw-Dieselmotoren laufen erste Bestrebungen, einen Serieneinsatz zu realisieren. Für einen Pkw-Ottomotor ist das hier beschriebene Konzept der erste Einsatz. Der Monotherm-Kolben bietet neben höherer Steifigkeit

und Lebensdauer auch Reibleistungsvorteile. Diese resultieren hauptsächlich aus dem ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Grauguss-Stahl-Paarung von Zylinder und Kolben. Die deutlich geringere Wärmedehnung als bei Aluminium ermöglicht es, mit geringeren Einbauspielen zu fahren, was auch positive Auswir-



Stellen Sie sich vor,
Elektronik wäre orange ...



Orange – das ist die Farbe der aktiven Energie. Und die Farbe der Fachzeitschrift für den Bereich Automobil-Elektronik: **ATZelektronik**. Denn in kaum einer Branche gestalten sich Entwicklungen aktiver und dynamischer. ATZelektronik informiert 6 x im Jahr über neuste Trends und Entwicklungen. Auf wissenschaftlichem Niveau. Mit einzigartiger Informationstiefe. Als Abonnent profitieren Sie zusätzlich vom kostenlosen Download aller Fachbeiträge im Online-Fachartikelarchiv. Sichern Sie sich jetzt Ihr kostenloses Probe-Exemplar!

311 08 008

Ja, ich möchte die ATZelektronik jetzt gratis testen!

Bitte senden Sie mir unverbindlich die nächste Ausgabe der ATZelektronik zu. Möchte ich die Zeitschrift danach weiterlesen, brauche ich nichts weiter zu tun. Ich erhalte die Zeitschrift zum Preis von nur € 108,- zzgl. Versandkosten. Das Abonnement kann ich jederzeit zur nächsten erreichbaren Ausgabe kündigen. Zuviel gezahlte Beträge für nicht gelieferte Ausgaben erhalte ich zurück. Möchte ich nicht weiter lesen, melde ich mich innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt des Probeheftes schriftlich. (GWV-Fachverlage GmbH, Geschäftsführer: Dr. Ralf Birkelbach, Albrecht F. Schirmacher, AG Wiesbaden HRB 9754.)

_____ Firma

_____ Vorname/Name

_____ Straße/Nr.

_____ PLZ/Ort

_____ Datum/Unterschrift

Bitte schicken Sie mir regelmäßig ihren kostenlosen Newsletter an meine E-Mail-Adresse:

_____ E-Mail

Einfach Coupon ausfüllen und faxen an 0611.7878-423 oder online bestellen unter www.ATZonline.de

Vieweg+Teubner Verlag Leserservice
Abraham-Lincoln-Str. 46 | 65189 Wiesbaden
Telefon: 0611.7878-151 | Telefax: 0611.7878-423
www.ATZonline.de



kungen auf die Geräuschemissionen sowie eine Verbesserung der Blow-by- und Ölverbrauchswerte ohne gleichzeitigen Anstieg der Reibung hat.

Für den Einsatz in einem Ottomotor ist besonders die Klopfneigung in Folge der geringeren Wärmeleitfähigkeit von Stahl sowie das höhere Gewicht eines der Hauptprobleme. Bei der Auslegung wurde deshalb besonders diesen beiden Parametern erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. So gelang es, durch eine gezielte Auslegung das Gesamtgewicht des Kolbens mit Kolbenbolzen und Ringen um nur 80 g gegenüber dem Serienaluminiumkolben anzuheben. In Folge der höheren maximal zulässigen Flächenpressung von Stahl war es möglich, den Kolbenbolzen um 30 % gegenüber dem Serienbolzen zu kürzen. Die Wandstärken sind deutlich geringer als bei einem vergleichbaren Aluminiumkolben ausgeführt, wodurch zusammen mit der Kolbenbodenspritzkühlung die schlechtere Wärmeleitfähigkeit von Stahl kompensiert werden konnte.

Betrachtet man die Ergebnisse der Kolbenuntersuchungen, **Bild 5**, so zeigt sich bei einer Öltemperatur von 90 °C eine deutliche Reibungsreduzierung durch den Monotherm-Kolben. Der Reibungsanstieg ab 4000/min auf das Serieniveau resultiert aus den höheren Lagerbelastungen der Pleuellager. Durch das höhere Kolbengewicht egalisiert sich der Vorteil des Monotherm-Kolbens bei höheren Drehzahlen. Um den Einfluss der reduzierten Wärmedehnung und somit der besseren Zylinder-Kolben-Paarung darzustellen, wurde die Öltemperatur um 10 °C auf 100 °C angehoben. Unter diesen Betriebsbedingungen liegt die Reibung des Monotherm-Kolbens über den gesamten Drehzahlbereich um bis zu 35 % unter dem Serienkolben.

6 Fazit

Reibungsoptimierung am Verbrennungsmotor stellt eine zielführende Maßnahme dar, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren und die CO₂-Emissionen zu senken. Die von Mahle hier vorgestellten Maßnahmen an Ventiltrieb, Lagereinheit der Kurbelwelle und Kolbengruppe verdeutlichen, dass auch bei modernen Verbrennungsmotoren noch ein großes Po-

tenzial für Reibungsoptimierungsansätze vorhanden ist.

Zielführend ist hierbei nicht die reine Optimierung von Einzelparametern, sondern die Betrachtung des Gesamtsystems. Dies verdeutlicht besonders der Einfluss der Öltemperatur bei Einsatz eines Mono-

therm-Stahlkolbens statt des Serien-Aluminiumkolbens. Da die Reduzierung der Reibungsverluste signifikante Einsparpotenziale im Leerlauf und Teillastbereich bietet, lassen sich die so erzielten Potenziale auch vorteilhaft in kundenrelevanten Fahrzyklen darstellen. ■

➤ GIF-Getriebeentwicklung

Wir entwickeln Getriebe bis zur Serie

- Projekt- und Lieferantenmanagement
- Konzeptentwicklung
- Auslegung, Entwurf und Konstruktion
- Komponenten- und Teilsystementwicklung
- Regelung und Kalibrierung
- Untersuchung auf dem Prüfstand und im Fahrzeug

GEARS GO GIF

Gesellschaft für Industrieforschung mbH

www.gif.net | info@gif.net