

## Performance Materials

# *Dynamometertests mit Materialien für Brennkammerkomponenten zur Verbesserung der Effizienz unter gleichzeitiger Beibehaltung der Motorleistung und Abgasvorschriften*

### Autoren

Dave Krus, Andrew Tarrant und Steffen Mack - Materion Corporation  
Andrew Egger und Dave Gudd - Cosworth Ltd.



+49.711.830.93-0 | [materion.de.com](http://materion.de.com)

### ZUSAMMENFASSUNG

Verbrennungsmotoren sind eine sehr ausgereifte Technologie, die seit über 120 Jahren beständig weiterentwickelt wird. In dieser Zeit wurden durch Änderungen beim Design, der Verarbeitung und den Materialeigenschaften erhebliche Verbesserungen der Leistungsdichte und des thermischen Wirkungsgrades realisiert. Fortschritte bei der Computersimulation, insbesondere in den letzten dreißig Jahren, haben es ermöglicht, Design und Verarbeitung gründlich zu erforschen und zu nutzen, wobei die Entwicklung neuer Materialien der grundlegende Schlüssel zur Erschließung weiterer Effizienzgewinne ist. Diese Studie fasst die Konstruktionsvorteile und Motortestergebnisse für eine Reihe alternativer Werkstoffe zusammen, aus denen Kolben, Pleuelringe, Pleuel, kleine Pleuelaugen, Ventilsitze und Ventilführungen gefertigt wurden. In einer Zusammenarbeit zwischen dem Werkstoffhersteller Materion Corp. und den Experten für Fahrzeugantriebe der Firma Cosworth Ltd. wurde ein Ford® Eco-

Boost® 2.3 Liter Motor (Motorcode YUDA) als Basismotor ausgewählt und Teile des Pleuelmotors derart neugestaltet, um die vorteilhaften Eigenschaften der neuen Materialien zu nutzen. Pleuelmasse, mechanischer Wirkungsgrad und die Einsparungen beim Pleuelstegvolumen wurden anhand der neu gestalteten Komponenten Pleuel, Pleuelringe, Pleuel, Pleuel und Pleuelager demonstriert. Ein Dynamometer-Testprogramm wurde entwickelt, um die Nettoverbesserungen in der Effizienz des modifizierten Motors zu bewerten. Basierend auf einer Reihe von Referenzpunkten im stationären Zustand wurden der Basis- und modifizierte Motor verglichen. Schließlich wurden Langzeittests durchgeführt, um das Potenzial der neu gestalteten Komponenten für den Einsatz in Serienfahrzeugen zu demonstrieren. Statische Dichtkomponenten wie Ventilsitze und Ventilführungen aus Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit kamen dabei ebenfalls zum Einsatz.



## EINFÜHRUNG

Die Steigerung der Effizienz von Verbrennungsmotoren (ICEs) ist manchmal ein unterschätzter, aber entscheidender Punkt zur Reduzierung der Kohlendioxid-Emissionen einer Flotte. Bedeutende Entwicklungen in der Energiespeichertechnologie, der Produktionskapazität für Elektrofahrzeuge und der Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen (EV) sind erforderlich, damit eine vollständig batterieelektrische Fahrzeugflotte (BEV) überhaupt möglich wird. ICE-Effizienzverbesserungen können die Flottenemissionen mit geringfügigen Änderungen der Technologie, der Produktionswerke und der Infrastruktur erheblich reduzieren. Innerhalb der Europäischen Union legt die Verordnung 2019/631 die CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge fest. Diese Verordnung setzt Emissionsziele von 15 % Reduktion bis 2025 und 37,5 % Reduktion bis 2030 (ausgehend von 2021) fest. Es gibt auch Anreize für ZLEV (Null- und Niedrigemissionsfahrzeuge) mit CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 0 und 50 g/km. Dies sind ehrgeizige Ziele und es sind erhebliche Änderungen am gesamten Antriebsstrang erforderlich, damit die Hersteller diese Ziele im Flottendurchschnitt erreichen. Darin eingeschlossen sind weitere, erhebliche Verbesserungen der Effizienz von Verbrennungsmotoren.

Ein logischer Weg, Emissionsminderungen mit minimaler Auswirkung auf die Fahrzeugleistung zu erreichen, ist die Einführung kleinerer Motoren mit höherer Leistungsdichte. Zukünftige Entwicklung von Verbrennungsmotoren werden sich auf das Wärmemanagement sowie das „Downsizing“ bzw. „Rightsizing“ zur Verbesserung der Verbrennungseffizienz konzentrieren.<sup>2</sup> Angesichts der hochentwickelten Technologie, die für die Konstruktion, Simulation und Fertigung von Motorenkomponenten zur Verfügung steht, sind die Materialeigenschaften heute die Hauptbeschränkungen für die Steigerung der Motorleistung und Effizienz. Insbesondere in und um den Brennraum herum fehlen Werkstoffe, die zuverlässig bei erhöhten Temperaturen und Drücken einsetzbar sind, um so die Emissionsziele zu erreichen. Derzeit werden Serienmotoren traditionell aus Gusseisen, Stahl, Aluminium- und Kupferlegierungen hergestellt. Diese Studie beschreibt die Vorteile der Verwendung fortschrittlicher Werkstoffkonstruktionen in drei Hauptkomponenten des Motors: Kolben, Kolbenringe und Pleuel; ferner eine Kupferlegierung mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit für den Kompressionsring, die Ventilsitze und Ventilführungen. Diese Komponenten werden üblicherweise aus Aluminium-, Kupfer- oder Eisenbasislegierungen gefertigt. Nachfolgend werden Materialoptionen für diese drei Komponenten skizziert und gezeigt, wie Verbesserungen durch den Einsatz leichterer Komponenten mit verbesserten mechanischen Eigenschaften konstruiert werden können.

Als Basismotor wurde ein Ford EcoBoost 2,3-Liter-Motor (Motorcode YUDA) ausgewählt. Dieser Motor wurde zwischen 2016 und 2018 im Ford Focus RS eingebaut. Er ist fast baugleich zum 2,3-Liter-Mustang-Motor. Leistungsdaten des Motors sind in Tabelle IA zusammengefasst. Kolben, Kompressionsring und Pleuel wurden auf der Grundlage verbesserter Materialeigenschaften neu konstruiert. Die Ventilführungen und Ventilsitze wurden in den gleichen Abmessungen wie die entsprechenden OEM-Teile gefertigt. Die für die Komponenten ausgewählten Werkstoffe sind in Tabelle Ib aufgeführt.

TABELLE IA: Motor Eckdaten.

Typ		Turboaufgeladener Reihen 4-Zylinder Quermotor (Benzin)
Hubraum	cm <sup>3</sup>	2261
Bohrung	mm	87,6
Hub	mm	94
Verdichtung		9,4:1
Max Leistung	PS (kW)	350 (257)
Bei	U/Min	6000
Max Drehmoment	Nm	440 (470 vorübergehender Überlastbetrieb)
Bei	U/Min	2000-4500
Ventiltrieb		DOHC mit 4 Ventilen/Zylinder
Zylinder		4 linear
Zylinderkopf		Aluminiumguss mit Auskleidung aus Gusseisen
Zylinderblock		Aluminiumguss
Antrieb Nockenwelle		Zwei unabhängige variable Nockenwellensteuerungen (Ti-VCT)
Kurbelwelle		Gusseisen, 8 Gegengewichte, 5 Hauptlager
Motorsteuerung		Bosch MEDG17-I4
Einspritzsystem		Hochdruckeinspritzung; 200 bar Einspritzdruck
Abgaskontrolle		3-Wege Katalysator
Abgasnorm		Euro 6 Norm
Turbolader		Honeywell Twin-Scroll-Turbolader mit fester Geometrie
Schmiersystem		Druckgespeist mit mech. Ölpumpe
Schmiersystem Kapazität	Liter	5,4
Kühlsystem		Wasserpumpe mit Thermostat und Ventil, Wärmemanagementsystem
Kühlsystem Kapazität	Liter	6,9

Es werden die Motorkennfelder und Langzeittests des Basis- und modifizierten Motors vorgestellt.

## WERKSTOFFE FÜR VERBRENNUNGSMOTOREN

Die für die Neugestaltung der Komponenten ausgewählten Materialien und deren, aus Konstruktionssicht, vorteilhaften Eigenschaften sind in Tabelle 1B zusammenfasst.

**TABELLE 1B: Modifizierte Teile für den Ford EcoBoost 2.3L RS-Motor. OEM-Werkstoff und der Werkstoff für diese Studie.**

Komponente	Ford EB 2.3L RS	Modifizierter Motor
Kolben	Aluminiumguss mit Kompressionsring aus Gusseisen	SupremEX® 225CA MMC (AA2124 mit 25% SiC)
Pleuel	Stahl	SupremEX 225CA MMC
Kleines Pleuelauge	Stahl mit Kupferbeschichtung	ToughMet® 3 alloy AT110 (Cu-15%Ni-8%Sn)
Kolbenringe	Gusseisen	PerforMet® AT alloy (Cu-7% Ni-2%Si-Cr)
Ventilsitze und -führungen	Gesinterte Eisenlegierungen	PerforMet AT alloy

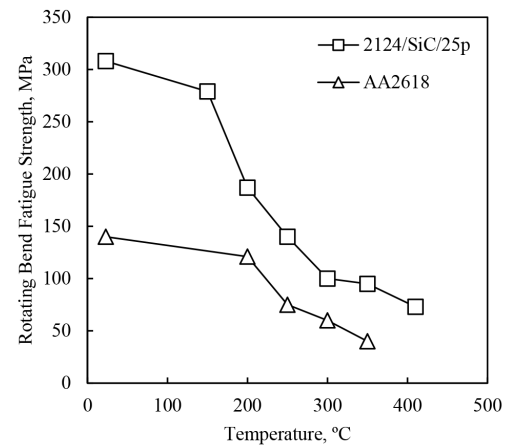
### 2124A/SIC/25P, SIC-PARTIKELVERSTÄRKTER ALUMINIUMVERBUNDWERKSTOFF

SupremEX® 225 CA ist ein partikelverstärkter Aluminium-Metallmatrix-Verbundwerkstoff (MMC) mit Zusätzen von 25 Vol.-% Siliziumkarbid. Aktuelle Daten finden sich in anderen Studien.<sup>3</sup> Dieser Verbundwerkstoff wird in vielen Hochleistungsanwendungen eingesetzt, und die Arbeiten zur Reduzierung der Herstellungskosten haben die Verwendung dieses Materials in Kraftfahrzeugen ermöglicht.<sup>4</sup> (Verweis auf die Cosworth-Webseite über die Verwendung von SupremEX-Kolben im GMA T.50-Sportwagen). Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften dieses Materials haben das Potenzial, die Verbrennungseffizienz entscheidend zu verbessern und gleichzeitig Gewicht und Reibung zu reduzieren. Typische Eigenschaften von SupremEX 225 CA sind in Tabelle 2 dargestellt.

**TABELLE 2: Typische mechanische und physikalische Eigenschaften von geschmiedeten Komponenten aus SupremEX 225CA.**

E-Modul	115 GPa
Dichte	2,88 g/cm <sup>3</sup>
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (24-200°C)	16,3 ppm/°K
Zugfestigkeit	580 MPa
Streckgrenze	435 MPa
Bruchdehnung	3%
Ermüdungsgrenze R=-1@10 <sup>6</sup> Zyklen @ 25°C	310 MPa
Wärmekapazität @25°C	0,829 J/g.K

Im Vergleich zur konventionellen Aluminiumlegierungen AA2618 zeigt SupremEX 225 CA MMC eine außergewöhnliche, um Faktor 2 höhere Ermüdungsfestigkeit im Temperaturbereich 150 bis 400°C (vgl. Figur 1). Eine höhere Ermüdungsfestigkeit ermöglicht eine Reduzierung der Kolbenmasse durch eine geringere Wand-



dicke.

**FIGUR 1: Temperaturabhängigkeit der Biege-wechselfestigkeit (@10<sup>6</sup> Zyklen) für Kolben und Pleuel aus SupremEX 225CA MMC. Das Diagramm zeigt im Vergleich zur herkömmlichen Al-Legierung 2618 eine Verdopplung der Ermüdungsfestigkeit zwischen Raumtemperatur und 400°C (R=-1, Kt=1).**

Die Zugabe von harten SiC-Partikeln verbessert die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen im Vergleich zu Aluminium oder hypereutektischen Al-Si-Legierungen erheblich. Dies, ermöglicht, zusammen mit den verbesserten Ermüdungseigenschaften, die Ringnut näher an den Kolbenboden zu konstruieren. Der Feuersteg wird dadurch verkleinert, die Menge unverbrannten Kraftstoffes gesenkt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) von 16 ppm/°C ist niedriger als bei Standard Al-Legierungen. Dieser ist etwas niedriger als bei einigen hypereutektischen Al-Si-Legierungen und deutlich niedriger als bei Standardlegierungen wie z.B. AA2618. Der reduzierte CTE ermöglicht eine engere Anpassung des Kolbens an die Bohrung beim Anfahren, wodurch Leckage und Öleintritt unter Kaltstartbedingungen minimiert werden.

Die Zugabe von Partikeln zur Al-Matrix erhöht den spezifischen Modul des Materials auf 39 GPa/g.cm<sup>3</sup>. Dieser ist 50% höher als bei herkömmlichen monolithischen Metalllegierungen wie Stählen, Aluminium- und Titanlegierungen und höher als bei hyper-eutektischen Al-Si-Legierungen mit einem typischen spezifischen Modul von 32 GPa/g.cm<sup>3</sup>.

Die Wärmeleitfähigkeit des Verbundwerkstoffs SupremEX 225 CA ist mit etwa 150 W/m.K vergleichbar mit anderen monolithischen Al-Legierungen (siehe Tabelle 3) und etwas höher als bei Al-Si-Legierungen (ca. 120 W/m.K). Dies ist auf die höhere Wärmeleitfähigkeit von SiC gegenüber Si zurückzuführen. Im Vergleich zu Stählen haben partikelverstärkte Aluminiumlegierungen eine höhere Wärmeleitfähigkeit und niedrigere Dichte.

**TABELLE 3: Spezifische Wärme und Wärmeleitfähigkeit von SupremEX 225CA im Temperaturbereich -50°C bis 300°C gemäß ASTM E1461. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit beträgt 156 W/m.K.**

Temperatur, °C	Wärmekapazität, J/g.K	Diffusivität, mm <sup>2</sup> /s	Wärmeleitfähigkeit, W/m.K
-50	0,753	72,7	157,7
25	0,829	64,3	153,5
100	0,918	60,3	159,4
200	0,946	56,4	153,7
300	1,020	51,1	150,1

### NICKELSILIZIDVERSTÄRKT KUPFERLEGIERUNG

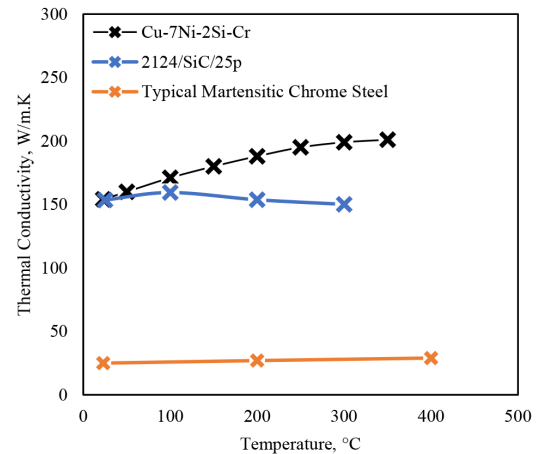
PerforMet® AT-Legierung (Cu-7Ni-Si-Cr) ist eine durch nickel-silizid verstärkte Cu-Legierung<sup>5</sup> die in Ventillführungen, Ventilsitzen, Kolbenringen, Zylinderlaufbuchsen und Gleitlagern verwendet werden kann. Die typischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 4 aufgeführt.

**TABELLE 4: Mechanische und physikalische Eigenschaften von PerforMet AT-Legierung.**

E-Modul	130 GPa
Dichte	8,69 g/cm <sup>3</sup>
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	17,5 ppm/K
Wärmekapazität @ 25°C	0,41 J/g.K
Wärmeleitfähigkeit @ 25°C	155 W/m.K
Wärmeleitfähigkeit @ 250°C	215 W/m.K
Ermüdungsgrenze R=-1@10 <sup>6</sup> Zyklen	240 MPa

Die Legierung hat mehrere interessante mechanische und physikalische Eigenschaften, vor allem eine höhere Wärmeleitfähigkeit und geringeren Reibkoeffizienten im Vergleich zu den Kupfer- und Eisenlegierungen, die üblicherweise für diese Komponenten verwendet werden. Figur 2 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Cu-Ni-Si-Cr-Legierung im Vergleich zu einer Chromstahllegierung, die für Kompressionsringe verwendet wird. Die Wärmeleitfähigkeit gegenüber Stählen ist viermal höher, aber auch höher als bei dem

2124/SiC/25p-Werkstoff, insbesondere bei höheren Betriebstemperaturen. Dies ermöglicht eine hervorragende Wärmeübertragung vom Kolben zur Zylinderwand und vom Ventilkopf zum Ventilsitz, was eine bessere Kühlung der Zylinderkomponenten ermöglicht und dadurch mehr Spielraum für die Optimierung der Verbrennungsbedingungen bzgl. Emissionen und Leistung bietet.



**FIGUR 2: Wärmeleitfähigkeit von PerforMet im Vergleich zu einem martensitischen Chromstahl.<sup>6</sup> Über den gesamten Temperaturbereich ergibt sich ein vierfach höherer Wert. Zu Vergleichszwecken ist ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit des Kolbenwerkstoffs SupremEX 225CA eingezeichnet.**

### SPINODAL AUSHÄRTBARE CU-NI-SN-LEGIERUNG

ToughMet® 3 AT110 (Cu-15Ni-8Sn) ist eine spinodal gehärtete Bronzelegierung<sup>7</sup>, die häufig als Lagerwerkstoff für die Luft- und Raumfahrt sowie in industriellen Anwendungen eingesetzt wird. Die typischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 5 aufgelistet.

**TABELLE 5: Typische mechanische und physikalische Eigenschaften von ToughMet 3 AT110 alloy.**

E-Modul	144 GPa
Dichte	9,0 g/cm <sup>3</sup>
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	16,4 ppm/K
Zugfestigkeit	895 MPa
Streckgrenze	760 MPa
Bruchdehnung	10%

ToughMet 3 wird im Rahmen dieser Studie als Lagerwerkstoff verwendet, da er aufgrund der Verschleißigenschaften und dem geringen Reibkoeffizienten ideal für das kleine Pleuelauge geeignet ist (vgl. Tabelle 5).

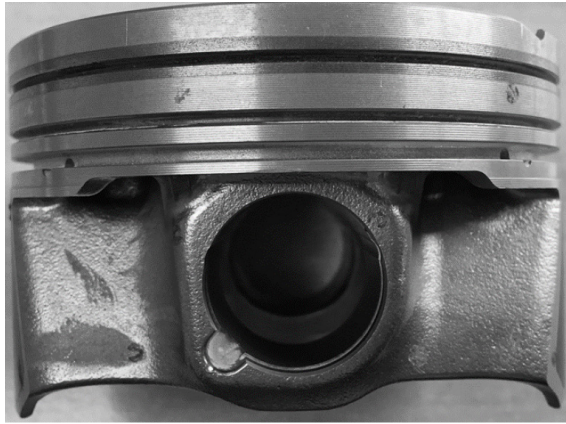


## DESIGNÄNDERUNGEN FÜR BESSERE LEISTUNG UND REDUZIERTE CO<sub>2</sub>-BILDUNGS

Im Verbrennungsmotor können an mehreren Stellen existierende Lösungen durch Sonderwerkstoffe ersetzt werden. Dazu zählen Komponenten wie Kolben, Kompressionsring, Pleuel, Ventilsitze, Ventilfehrungen und Zylinderlaufflächen innerhalb der „heißen Zone“ der Brennkammer. Nachfolgend werden Überlegungen zur Auslegung von Kolben, Kolbenbolzen, Kompressionsringen, Ventilsitzen und Ventilfehrungen diskutiert.

### KOLBEN/KOLBENBOLZEN

Figur 3 und 4 zeigen den Kolben des Ford EcoBoost 2.3L RS. Durch den Wechsel des Kolbenwerkstoffs auf SupremEX 225CA konnten gegenüber dem gegossenen Aluminiumkolben mit Guss-eiseneinsatz für den Kompressionsring mehrere Verbesserungen erreicht werden.



Durch den Wegfall des Ringnuteinsatzes wird der Wärmeentzug vom Kolben zur Zylinderwand erhöht, da SupremEX eine höhere Wärmeleitfähigkeit hat als der Einsatz aus Gusseisen und dem OEM Kolben aus Aluminium. Durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit und Verlegung der obersten Ringnut näher an den Kolbenboden wird die Bildung von „Hot Spots“ reduziert und die Klopfempfindlichkeit verringert. Die Reduzierung der Klopfneigung erlaubt eine optimalere Verbrennung unter Vollast oder, alternativ, eine Erhöhung der Kompression in Fällen, wo bei kleinen Lasten eine gute Effizienz erwünscht ist.

Die Ermüdungsbeständigkeit von SupremEX ermöglicht eine Verkürzung des Kolbenbolzen, so dass die Kontaktfläche in der Bohrung zwischen Bolzen und Kolben kleiner wird. Aufgrund der Konstruktion des Kolbens aus SupremEX konnte der Bolzen um 9,1 mm verkürzt und der Durchmesser um 0,5 mm verkleinert werden. Dies wiederum erbrachte eine Gewichtseinsparung von 19,4 g. Der Bolzen des Basismotors wurde aus Stahl hergestellt, der des modifizierten Motors aus einem 3%MoCrV Stahl.



FIGUR 3

Links: Kolben eines Ford EcoBoost 2.3L RS-Motors mit Hinweis auf den gusseisernen Ringträger.  
Rechts: Fertiger SupremEX-Kolben ohne Nuteinsatz.

Der Ringnuteinsatz für den Kompressionsring soll den Nutverschleiß reduzieren und den Kolben robuster gegen mögliche Vorzündungen im unteren Geschwindigkeitsbereich (LSPI) machen (vgl. Figur 3). Bei Verwendung von SupremEX als Kolbenwerkstoff kann auf den Stahleinsatz verzichtet und eine Gewichtsreduzierung von 20 g erreicht werden. Wegen des besseren Verschleißverhaltens bei erhöhter Temperatur und dem besseren Ermüdungsverhalten wird diese Gewichtseinsparung pro Kolben möglich und die Lebensdauer verbessert. Aufgrund des besseren Ermüdungsverhaltens kann die Ringnut näher an den Kolbenboden eingebracht werden. Dadurch wird das Feuerstegvolumen erheblich reduziert. Die Nut konnte um 1,67 mm nach oben verlegt werden, wodurch das Feuerstegvolumen um 58,2% reduziert wurde. Mehrere Studien belegen, dass die Verringerung des Feuerstegvolumens eine signifikante Effizienzsteigerung erbringt<sup>8</sup>.

Der Basismotor verwendet Kolben aus einer Aluminiumgusslegierung. Bei der Herstellung des modifizierten Kolbens wird die Unterkrone endkonturnah geschmiedet, um die Bearbeitungskosten zu minimieren. Das verbesserte Ermüdungsverhalten von SupremEX erlaubt eine Reduzierung des Querschnitts des Kolbenbodens. Der Querschnittsreduzierung durch Schmieden sind jedoch wegen überhängender Merkmale im Gegensatz zu Gussteilen Grenzen gesetzt. Dennoch konnte das Kolbenvolumen um 26,6% reduziert werden, was zu einer Abnahme der Masse um 76,5 g gegenüber dem herkömmlichen Kolben führte.

Die Eigenschaften ermöglichen es auch, die Bolzenbohrung weiter nach oben zu versetzen, wodurch der Kompressionsweg reduziert und das Pleuel unter Beibehaltung des Kompressionsverhältnisses verlängert wird. Ein längerer Pleuel reduziert die Reibung, indem die Seitenbelastung des Kolbens auf die Zylinderlaufflächen verringert wird. Beim modifizierten Kolben wurde der Kompressionsweg um 4,95 mm reduziert. In dieser Ausführung

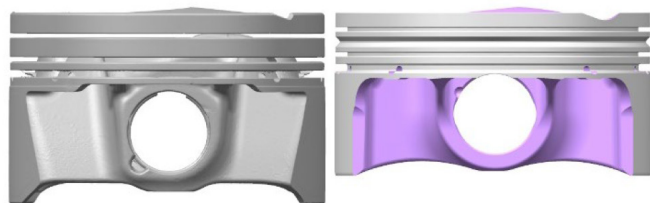
hat der Pleuel die maximale Länge. Eine weitere Verkürzung des Kompressionsweges kann nur durch eine Querschnittsreduzierung des Kolbenbodens erreicht werden. Zum direkten Vergleich der Verdichtungs- und Verbrennungsverhältnisse wurde der Kolbenboden in beiden Motoren jedoch nicht modifiziert.

Eine Zusammenfassung der vorgenommenen Veränderungen gegenüber dem Basismotor zeigt Tabelle 6.

**TABELLE 6: Vergleichsdaten Basismotorkolben zu modifiziertem Kolben.**

	OEM Kolben	Materion Kolben	Differenz
Volumen	138880 mm <sup>3</sup>	101844 mm <sup>3</sup>	-26,6%
Gewicht	372,2 g	295,7 g	-20,6%
Kolben- und Stiftgewicht	491,9 g	393,6 g	-19,9%
Kompressionsweg	32,80 mm	27,85 mm	-15,1%
Position des Kompressionsrings	--	+1.67 mm	n/a
Spaltvolumen	0,62l cc	0,259 cc	-58,2%

In Figur 4 werden die beiden Kolbenausführungen vergleichend dargestellt.



**FIGUR 4: Modelle von OEM-Kolben und Materion-Kolben.**

Links: OEM-Kolbendesign.

Rechts: Materion SupremEX 225CA MMC Design (das abgebildete OEM-Modellkolben stammt aus einem GOM-Scan).

## DER PLEUEL

Der Pleuel wird in der Regel aus geschmiedetem Stahl hergestellt, die modifizierte Version besteht aus SupremEX CA.

Der E-Modul von SupremEX ist mit 115 GPa niedriger als beim Stahl (205 GPa), aber die spezifische Steifigkeit ist aufgrund der geringeren Dichte deutlich höher. Das E-Modul eines Pleuel aus einer Titanlegierung ist ähnlich, allerdings mit einer um 35% höheren Dichte. Das resultierende Design ist damit 41% leichter als ein Pleuel aus Stahl. Abbildung 5 zeigt den Pleuel aus Stahl und SupremEX 225CA.

Aufgrund des längeren Kompressionsweges wurde der Pleuel um 4,95 mm (3,3 %) verlängert.



**FIGUR 5:**

Links: Pleuel vom Basismotor.

Rechts: Modifizierter Pleuel aus SupremEX 225CA.

SupremEX, mit sich selbst gepaart, ist wesentlich reib- und verschleißärmer als eine Stahl-/Aluminiumgusspaarung. Durch diesen tribologischen Vorteil wird es möglich, den Pleuel kolben- und nicht kurbelgeführt auszulegen wodurch eine weitere Reduzierung der Reibung bei höheren Motordrehzahlen erwartet wird.

Darüber hinaus wurde das kleine Pleuelauge aus der Legierung ToughMet 3 AT110 hergestellt. Dieses monolithische Lager hat im Vergleich zu bestehenden Mehrschichtlagerlösungen eine bessere Verschleißfestigkeit bei gleichzeitiger Beibehaltung eines niedrigen Reibkoeffizienten.

Tabelle 7 zeigt die Vorteile des Materion-Motorpleuels gegenüber der OEM-Version.

**TABELLE 7: Vergleich des OEM Pleuel zu modifizierten Pleuel.**

	OEM Pleuel	Materion Pleuel	Differenz
Gesamtmasse	589,7 g	346 g	-41%
Länge	149,285 mm	154,235 mm	+3,3%

Neben einer leichteren Baugruppe reduziert eine Erhöhung der Pleuellänge die Reibung, da die Radialkräfte gegen die Zylinderlaufflächen abnehmen.



FIGUR 6:  
Links: OEM Zusammenbau von Kolben/Bolzen und Pleuel.  
Rechts: Materion Design von Kolben/Bolzen und Pleuel.

### GEWICHTSEINSPARUNG BEI KURBELWELLEN

Die beschriebene Gesamtreduzierung von Kolben- und rotierender Masse (1,37 kg) ermöglicht eine entsprechende Gewichtsreduzierung der Kurbelwelle durch Entfernung von Massen aus den Gegengewichtsbahnen. Bei diesem Vergleichstest wurde im modifizierten Motor die Originalkurbelwelle verwendet. Eine mögliche Gewichtsreduktion von 718 g wurde jedoch unter den folgenden Annahmen berechnet:

- Der Gewichtsabgleich bleibt wie in der ursprünglichen Ausführung unverändert (90%/10%).
- Maximale und durchschnittliche Kurbellagerbelastungen stimmen mit den berechneten OEM-Lasten überein.
- Die gesamte Massenträgheit des Systems bleibt durch Gewichtserhöhung am Schwungrad erhalten, das Fahrverhalten wird nicht beeinflusst.

Tabelle 8 enthält alle konstruktiven Änderungen, die notwendig sind, um mögliche Gewichtseinsparungen zu berechnen.

TABELLE 8: Einflussfaktoren auf die Gewichtsreduzierung der Kurbelwelle.

Typ	Rotierende Masse (g)	Schwingende Masse (g)	Länge Pleuel (mm)	mr per bay (kg.mm)	Massenänderung der Kurbelwelle (g)	Massenänderung Schwungrad (g)	Differenz (g)
Standard	422,25	708,3	149,325	26,47	0	0	0
Materion Komponenten	276,75	516,75	154,235	16,16	-877	+159	-718

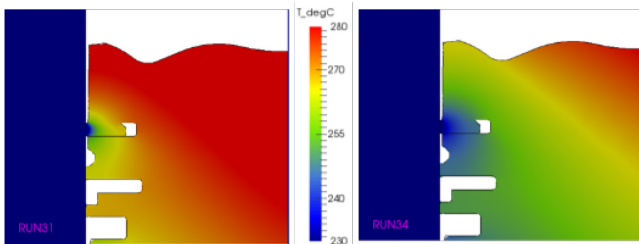
## KOMPRESSIONSRING

Kolbenringe in Verbrennungsmotoren haben drei Hauptaufgaben:

- Abdichtung der Brennkammer zur Minimierung der Gasverluste in das Kurbelgehäuse "blowby".
- Wärmeübertragung vom Kolben auf die Zylinderwand.
- Regulierung des Ölverbrauchs durch Abkratzen von Öl von den Zylinderwänden zurück in den Sumpf.

Der Kompressionsring ist in erster Linie mit den ersten beiden Funktionen verbunden. Kompressionsringe in bestehenden Verbrennungsmotoren werden typischerweise aus Chromstählen oder Gusseisen hergestellt. Diese Materialien bieten eine gute Verschleißfestigkeit. Sie haben jedoch eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, insbesondere im Vergleich zu Kolben aus Aluminiumlegierungen.

Arbeiten von Bredda<sup>9</sup> haben gezeigt, dass durch Materialumstellung des Kompressionsrings von Eisenbasis auf einen Werkstoff mit höherer Wärmeleitfähigkeit wie beispielsweise die PerforMet AT-Legierung die maximale Kolbenbodentemperatur um 19°C und die durchschnittliche Gesamtkolbentemperatur um 17°C gesenkt werden kann (siehe Abbildung 7). Die Reduzierung der Kolbenbodentemperatur kann zu einer Klopfminderung führen, was einen Funkenfortschritt ermöglicht, der zu einer verbesserten Verbrennungseffizienz führt. Eine niedrigere durchschnittliche Kolbentemperatur gestattet eine Gewichtsreduzierung des Kolbens bei unveränderter Festigkeit und Steifigkeit, wenn eine Neukonstruktion des Kolbens möglich ist.



FIGUR 7

Links: Temperaturprofil eines Kolbens inklusive Kolbenring aus einer Eisenlegierung.

Rechts: Ein Kolbenring aus seiner Cu-Ni-Si-Cr-Legierung mit wesentlich höherer Wärmeleitfähigkeit erniedrigt die Kolben-temperatur um 17°C.

Die PerforMet Kolbenringe wurden so konzipiert, dass sie sowohl zum vorhandenen Ford-Kolben als auch zum modifizierten Motorkolben passen. Eine diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung (DLC) wurde auf die ber-, Unter- und Außenseite der PerforMet-Ringe aufgetragen.

## MOTORKENNFELDER BEIDER MOTOREN

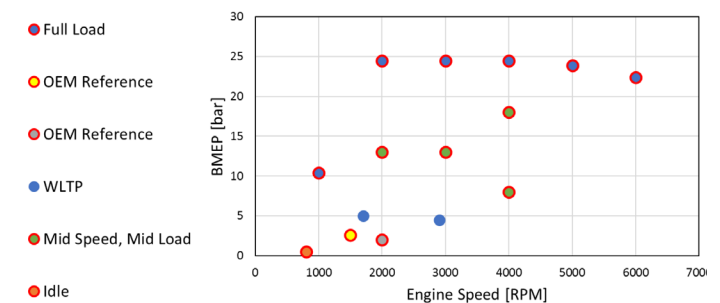
Alle durchgeführten Veränderungen an den beschriebenen Komponenten innerhalb des Verbrennungsmotors sollen messbare

Auswirkungen auf die BSFC und die Verbrennungseffizienz des Motors haben und Probleme mit dem Wärmemanagement minimieren. Folgende Verbesserungen werden erwartet:

- Verminderung der Reibung durch eine reduzierte Normallast und Verwendung von Werkstoffen mit niedrigeren Reibkoeffizienten.
- Durch Gewichtsreduzierungen (einschließlich oszillierender Gewichte) ergeben sich Vorteile bei den Reibverhältnissen sowie der Geräuschentwicklung, den Vibrationen und den Rauheiten.
- Verbesserung der Klopfestigkeit durch verbesserte Wärmeübertragung und reduziertem Feuersteg, was zu einem verbesserten spezifischen Kraftstoffverbrauch bei hohen Lasten führt.

Die Verbesserungen wurden mit Motortests bei Cosworth Ltd. in Northampton, Großbritannien, gemessen. Diese Motortests wurden an einem unverändertem Ford EcoBoost 2.3L RS-Motor und einem modifizierten Motor mit SupremEX-Kolben und Pleuel sowie einem neu dimensionierten Kolbenbolzen und Kompressionsring aus PerforMet durchgeführt.

Die Motortests berücksichtigten die in Abbildung 8 eingezeichneten Referenzpunkte im Motorkennfeld. Neben typischen Standardreferenzpunkten wurden "High Residency" Betriebspunkte des WLTP-Fahrzyklus sowie Vollastreferenzpunkte gewählt. Das Testprogramm berücksichtigt auch einige Mittellast/mittlere Geschwindigkeits-Referenzpunkte, um dadurch einen Vergleich für die Effizienz im Mittellastbereich zu erhalten und eine Abschätzung für den gesamten Fahrbereich unter einem definierten Kraftstoffverbrauch zu erlauben. Diese Auswahl gibt einen direkten Hinweis auf die Flexibilität der Modifikationen (d. h. in Bezug auf das Fahrzeuggewicht und die Auswahl des Übersetzungsverhältnisses), die immer noch zu einem kraftstoffsparenden Betrieb führt.



FIGUR 8

Gewählte Referenzpunkte im Motorkennfeld des Ford EcoBoost 2.3L RS und des modifizierten Motors.

Bei der Motorprüfung wurden Leistung, Drehzahl, Drehmoment usw. erfasst. Eine vollständige Liste der gemessenen Prozessgrößen zeigt Anhang A.

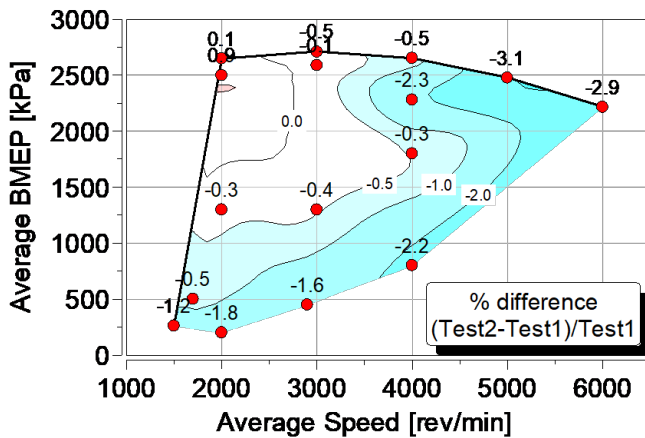


Die Aufnahme der Kennfelder wurde an zwei modifizierten Motoren mit der Bezeichnung MR001 und MR002 durchgeführt. Beide Motoren wurden nach dem Standardprogramm getestet. Ein dritter Motor, MR003, wurde ausschließlich für Langzeittests verwendet.

### MR001-MOTORKENNFELD

Dieser Motor war mit Kolben und Pleuel aus SupremEX, einem modifizierten Kolbenbolzen, dem kleinen Pleuelauge aus ToughMet 3 AT II0 (monolithisch, d.h. ohne Beschichtung) und mit einem DLC-beschichteten (Diamond Like Carbon) Kompressionsring aus PerforMet ausgelegt.

Die prozentuale Veränderung des bremspezifischen Kraftstoffverbrauchs (BSFC) ist im Vergleich zum Basisverlauf in Figur 9 und Tabelle 9 dargestellt.



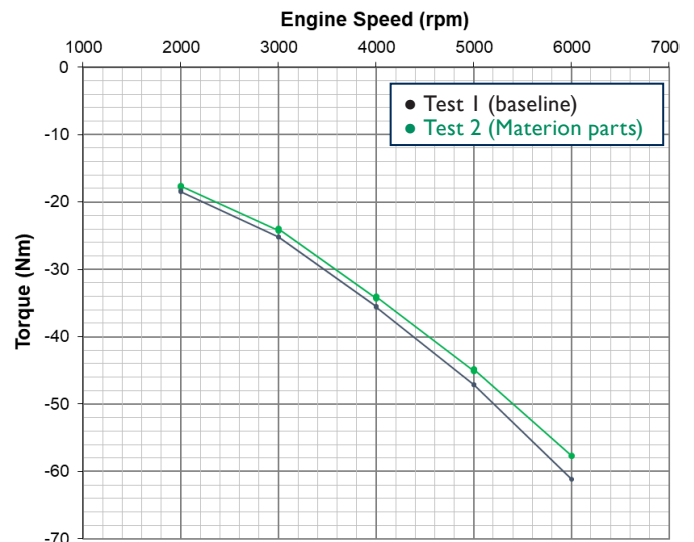
FIGUR 9  
Veränderung des Kraftstoffverbrauchs von Basis- zu modifiziertem Motor.

TABELLE 9  
Referenzpunkte gemäß Figure 9.

		BSFC Veränderung (%)		
		Motorgeschwindigkeit		
Motorlast	OEM Pleuel	2000 rpm	4000 rpm	6000 rpm
	Hoch	0,3	-0,4	-3,0
	Niedrig	-1,8	-2,3	

Der BSFC wurde im Vergleich zur Basis in allen außer den Niedriggeschwindigkeit/Hochlast-Punkten reduziert. Die Zylinderdruckdaten deuten auf keine signifikante Änderung der Verbrennung zwischen beiden Motorkonfigurationen hin. Daraus lässt

sich schließen, dass reduzierte Reibverhältnisse der dominierende Faktor für die Leistungssteigerung und den niedrigeren BSFC sind. Reibungsdaten über den gesamten Motorreibdaten über den gesamten Drehzahlbereich sind in Figur 10 dargestellt.



FIGUR 10  
Motor Reibverhältnisse im Vergleich Basismotor/modifizierter Motor.

Die signifikanteste Abnahme der BSFC wurde bei hohen Geschwindigkeiten und Lasten gemessen. Der Gewinn war bei gleicher Geschwindigkeit größer, als aus den Motorreibversuchen abzulesen ist. Bei niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Lasten war der Nutzen weniger ausgeprägt (siehe Abbildung 10). Dies deutet darauf hin, dass sich das Verhalten des Kompressionsrings bei Gasbelastung wesentlich vom Basismotor unterscheidet, möglicherweise wegen der DLC-Beschichtung auf der Lauffläche. Es gab keine Unterschiede bei der Klopfschwelle und kein Hinweis auf eine verbesserten Wärmeübertragung zwischen dem Basis- und modifiziertem Motor. Auch die Gesamtemissionen von Kohlenwasserstoffen wurden nicht wesentlich verändert. Die Motorvibration vom MR001 war größer, was angesichts der Änderung der Kolbengewichte zu erwarten war.

Studien belegen, dass durch Verringerung des Feuerstegvolumens um 58,2% der BSFC um etwa 3% bis 5% abnehmen kann. Überraschenderweise zeigen die gesamten Kohlenwasserstoffemissionen (THC), der Zylinderdruck und die Motorreibdaten keinen Hinweis auf einen solchen Vorteil im MR001. Eine mögliche Erklärung ist, dass das modifizierte Kolbenbodendesign und möglicherweise das Einspritzstrahlbild des Ford-Motors die Menge an Kraftstoff, die in den Feuersteg gelangt, effektiv minimiert.

## MR001-AUSBAU DER AUSGLEICHSWELLE

Der 2,3-Liter-EcoBoost verfügt, wie die meisten Reihen-4-Zylinder-Motoren, über eine Ausgleichswelle, um die Sekundärkräfte auszugleichen. Ohne die Ausgleichswelle können die sekundären Kräfte von den Fahrzeuginsassen wahrgenommen und als mangelhaftes Fahrverhalten gewertet werden. Wie bereits erwähnt, hat die reduzierte Masse der neu gestalteten Komponenten den Motor aus dem Gleichgewicht gebracht, was zu einer Zunahme der Vibration führt, einschließlich einer Überkompensation durch die Ausgleichswelle. Die Kräfte zweiter Ordnung sind direkt proportional zur Pleuellänge im Quadrat und umgekehrt proportional zur Länge des Pleuels im Quadrat. Die Sekundärkräfte des modifizierten Motors wurden durch die verminderte Pleuellänge und der Verlängerung des Pleuels deutlich reduziert.

Aus den Werten der Reibungstests folgte die Vorhersage, dass die Ausgleichswelle nicht mehr notwendig ist, und dadurch ein zusätzliches Drehmoment von 2,1 Nm möglich ist. Das tatsächliche zusätzliche Drehmoment bei hoher Drehzahl und Last wurde mit 3,4 Nm gemessen. Das deutet darauf hin, dass die Entfernung der Ausgleichswelle den Verbrennungsprozess nicht beeinflusst. Diese Aussage wird durch die folgenden Verbrennungsdaten gestützt:

- Drehmoment und Zündzeitdaten zeigen, dass die durch die Klopfgrenze vorgegebene maximale Zündlänge nicht beeinflusst wird.
- Mittlerer Arbeitsdruck (IMEP) vs. 10% Verbrennungsmasse (A110) sind mit und ohne Ausgleichswelle ähnlich.
- Der Koeffizient aus IMEP und A110 zeigt einen unverändert stabilen Verbrennungsprozess.

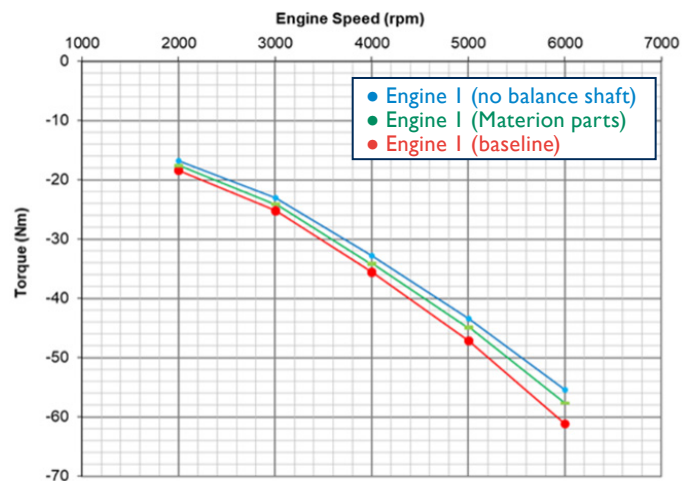
TABELLE 10

Unwuchten 2. Ordnung für unterschiedliche Motorkonfigurationen.

Motorvariante	Rotierende Masse (g)	Kolben Masse (g)	Pleuellänge (mm)	Kräfte 2. Ordnung (N)	Ausgleichswelle	Resultierende Unwucht (N)
Standard 2.3L EcoBoost	422,25	708,3	149,325	19419	Yes	0
Standard 2.0L EcoBoost	430,11	712,24	154,775	14724	No	14724
Standard ohne Ausgleichswelle	422,25	708,3	149,325	19419	No	19419
Modifizierter Kolben und Pleuellänge	289,68	523,75	154,235	13902	Yes	5703
Modifizierter Kolben und Pleuellänge ohne Ausgleichswelle	289,68	523,75	154,235	13902	No	13716

Eine Neugestaltung der Ausgleichswelle hätte den Rahmen dieser Studie gesprengt. Unter der Annahme, dass die Ausgleichswelle im Basismotor 100% der Sekundärkräfte ausgleicht, ist es jedoch möglich, die aus dem Gleichgewicht geratene Kraft im modifizierten Motor mit und ohne Ausgleichswelle zu berechnen. Die berechneten Werte sind in Tabelle 10 aufgeführt. Zu Vergleichszwecken wurde die Berechnung auch für einen serienmäßigen 2,0-Liter-EcoBoost-Motor durchgeführt, der in einigen Versionen ohne Ausgleichswelle ausgestattet ist. Die aus dem Gleichgewicht geratene Kraft des modifizierten Motors ohne Ausgleichswelle ist etwas geringer als die des 2,0-Liter-EcoBoost.

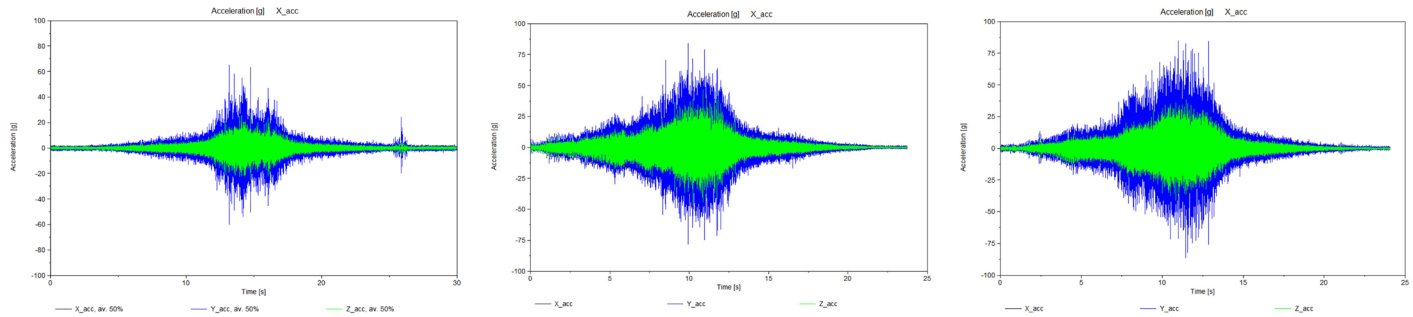
Wie erwartet, führte die Entfernung der Ausgleichswelle beim modifizierten Motor zu einer signifikanten Verringerung der Reibung, wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Die Reduktion reichte von 0,9 Nm bei 2000/min bis 2,1 Nm bei 6000/min. Die Schwingungssignaturen der drei Konfigurationen sind in Abbildung 12 dargestellt.



FIGUR 11

Motorreibungsdaten des Basismotors im Vergleich zu den Varianten MR001 mit und MR001 ohne Ausgleichswelle.

Acceleration:  
 • Horizontal  
 • Vertical



FIGUR 12 Schwingungssignaturen von Basismotor mit Ausgleichswelle (a) und den Varianten MR001 mit (b) und MR001 ohne Ausgleichswelle (c).

### MR002-MOTOR MIT OEM TOP KOLBENRING

Nach 81 h Laufzeit (davon 17,5 h bei WOT) des MR001-Motors wurden erhöhte Konzentrationen von Kupferpartikeln in einer Öl-Probe nachgewiesen. Es gibt keine Hinweise darauf, dass die zu diesem Zeitpunkt gesammelten Daten durch die Partikel beeinflusst wurden. Die Daten der Öl-Proben deuten auf eine rasche Entwicklung des Problems hin. Als Ursache wurde ein teilweiser Abrieb (Delaminierung) der DLC-Beschichtung auf der Ober- und Unterseite bei einem der Kompressionsringe nachgewiesen. Die Oberflächen der oberen Ringnut waren glänzend und optisch gut zu erkennen, es gab jedoch keine nennenswerte Änderung der Nutbreite. Die Zylinderblockbohrungen wurden durch den abrasiven Verschleiß beschädigt, was mit der DLC-Delaminierung übereinstimmte, und Partikel wurden in die Kolbenschräge eingebettet. Zu diesem Zeitpunkt wurde ein zweiter Motor, MR002, in Betrieb genommen. Nach den Standardtests wurde der MR002 mit neuen SupremEX-Kolben und OEM-Kompressionsringen ausgestattet. Die OEM-Kompressionsringe wurden aus Gusseisen mit einer (wahrscheinlich) Chromnitrid-Schicht auf den Laufflächen hergestellt. Pleuel und Bolzen wurden unbeschädigt aus dem vorherigen Motor (MR001) übernommen.

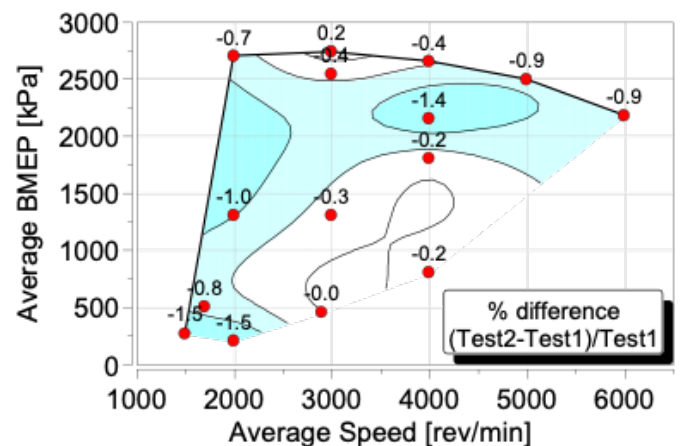
Die prozentuale Veränderung des bremspezifischen Kraftstoffverbrauchs (BSFC) im Vergleich zu den Standardwerten ist in Abbildung 13 und Tabelle 11 dargestellt.

TABELLE 11: Referenzpunkte gemäß Figur 13.

		BSFC Änderung (%)		
		Motorgeschwindigkeit		
		2000 rpm	4000 rpm	6000 rpm
Motorlast	Hoch	-0,7	-0,4	-1
	Moderat	-1,0	-0,2	
	Niedrig	-1,5	-0,2	

### KOLBENRINGBESCHICHTUNGEN

Die in MR001 verwendeten PerforMet-Top-Ringe wurden von Total Seal hergestellt sowie einer weiteren Firma beschichtet. Nach dem Scheitern der DLC-Beschichtung auf den Ringflächen in MR001 arbeitete Materion mit den Beschichtungsfirmen Industrial Hard Carbon in den USA, HEF in Frankreich und Diamond Hard Surfaces in England zusammen, um für die Kolbenringe aus PerforMet eine besser haftende Beschichtung zu entwickeln. Abrasive Verschleißprüfungen haben demonstriert, dass die DLC-Beschichtungen der angegebenen Lieferanten auf PerforMet ein wesentlich besseres Abriebverhalten zeigen. Auch CrN-Beschichtungen konnten mit gutem Erfolg aufgetragen werden. Während der Erstellung dieses Artikels haben mehrere professionelle Rennteams PerforMet-Top-Ringe getestet und planen, diese in einer kommenden Rennsaison einzusetzen.



FIGUR 13 Reibdatenvergleich Basismotor und MR001-Variante.

Zwei Unterschiede sind im BSFC-Kennfeld zu erkennen:

1. Im Volllastbereich und bei niedriger Geschwindigkeit erkennt man bei der MR001-Version einen unerwarteten Anstieg des BSFC, in der MR002-Version einen Abfall, wie aus den Reibungsdaten vorhergesagt. Die Menge des am Kolben vorbeiströmenden Verbrennungsgases (Blowby) war bei der MR001-Version leicht erhöht. Dies kann für PerforMet mit einem kleineren E-Modul gegenüber dem Gusseisen erklärt werden. Die richtige Spaltauslegung und Vorspannung der PerforMet-Ringe hat schließlich zu einem vergleichbaren Verhalten geführt.
2. Bei Volllast und hohen Geschwindigkeiten verzeichnet man bei der MR002-Version einen 1% Rückgang beim BSFC gegenüber 3% bei der MR001-Version. Dies kann mit der reduzierten Reibung der DLC-Beschichtung mit der Zylinderwand erklärt werden, insbesondere wenn die Kolbenringe durch den Abgasdruck nach außen gedrückt werden.

Wie bei der MR001-Variante zeigt auch der MR002-Motor keine auffällige Änderung der THC-Emissionen und Klopfgrenze. Der Anstieg beim Drehmoment, der auf veränderte Reibungsverhältnisse zurückgeht, hatte keinen Einfluss auf den Verbrennungsprozess.

#### **MR002-MOTOR MIT MODIFIZIERTEM ZYLINDERKOPF**

Bei der MR002-Version wurde ein zweiter Zylinderkopf mit Ventilsitzen und -führungen aus PerforMet ausgestattet. Die jeweiligen Abmessungen wurden unter Einhaltung der OEM-Toleranzen 1:1 übernommen. Beide MR002-Versionen wurden mit Thermoelementen an folgenden Stellen versehen:

- Auspuffsitzbrücke
- Zylinder Einlassseite
- Zylinder Auslassseite

Der Vergleich der Daten mit und ohne modifiziertem Zylinderkopf zeigt keine bedeutenden Änderungen des BSFC, des Drehmoments, der Klopfgrenze oder Temperaturen an den angegebenen Messstellen. Diese Ergebnisse sind nicht überraschend, da im Allgemeinen die iterative Weiterentwicklung von Motoren wenig Einfluss auf das Wärmemanagement hat.

#### **MR002-MOTOR ZERLEGUNG UND ZUSAMMENBAU DER MR003-VARIANTE**

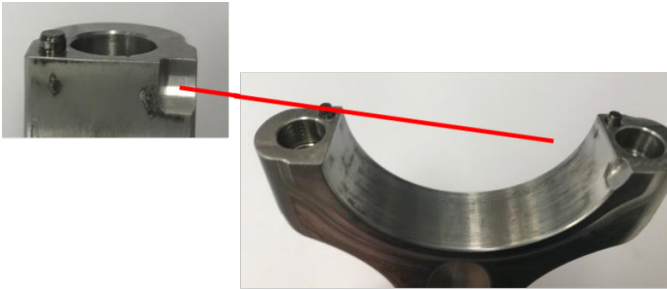
Nach dem Abschluss aller Tests bei der MR002-Version wurde der Motor zerlegt, um den Zustand aller Einzelkomponenten zu untersuchen, bevor der Langzeittest gestartet wurde. Zu diesem Zeitpunkt war diese Version 187 h im Betrieb, davon 23,5 h mit weit geöffneter Drosselklappe.

Beschreibung einzelner Komponenten:

- Das Lager am großen Pleuelauge zeigte Spuren von Reibkorrosion, insbesondere in den Entlastungszonen der Pleuelwelle (Figur 14). Die Reibkorrosion kann mit Passungsproblemen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten zwischen SupremEX 225CA und dem OEM Stahl erklärt werden. Durch Anpassung auf die veränderten Verhältnisse kann das Lager am Pleuelende anders ausgelegt und die Reibkorrosion zukünftig reduziert werden.
- Der Kompressionsring zeigte einen mittleren Verschleiß von 0,06 mm auf der Ober- und Unterseite. Der Verschleiß hatte offenbar keinen nachteiligen Einfluss auf die Motorleistung oder -komponenten. Zum ersten Mal wurde ein Kolbenring aus Gusseisen in einer Nut und einem SupremEX-Kolben getestet. In allen anderen Anwendungen mit SupremEX-Kolben, inklusive Serien-, Renn- oder Versuchsmotoren wurde der Kompressionsring aus Werkzeug- oder Chromstahl gefertigt. In allen Fällen ergaben sich mit SupremEX Kolben auch im beschleunigten Langzeitversuch keine nennenswerten Unterschiede im Verschleißverhalten der Stahlringe oder SupremEX-Ringnut.
- Der Pleuel wies eine Geradheitsabweichung von 0,83 mm/100 mm Länge auf. Die Ursache dafür scheint in der Spannungsrelaxation des Materials und nicht an der Verformung unter einer Last zu liegen. Der Pleuel wurden aus geschmiedeten Platten endabmessungsnah gefertigt. Nachdem die Spannungsrelaxation als Ursache für die Geradheitsabweichung erkannt war, wurde, wenn möglich, der Pleuel aus SupremEX in einem dreistufigen Prozess, der eine Spannungsfreiglühung bei niedriger Temperatur zwischen der Grob- und Feinbearbeitung beinhaltet, gefertigt.
- Es gab weitere Hinweise auf Verschleiß oder Materialübertragung, die sich auf die Geradheitsabweichung der Stange zurückführen lassen. Dazu zählen:
  - Polierte Oberflächen der Zylinderbohrungen an den Einfassungsecken der Schub- und Gegenschubseiten.
  - Materialübertragung vom Kolben auf die Bohrung im Zylinder 3 (Figur 15).
  - Materialübertragung von den Zylinderlauflächen am kleinen Ende.
  - Anzeichen von Ermüdung und/oder Erosion an den oberen Seiten des Innendurchmessers des großen Pleuelauges.







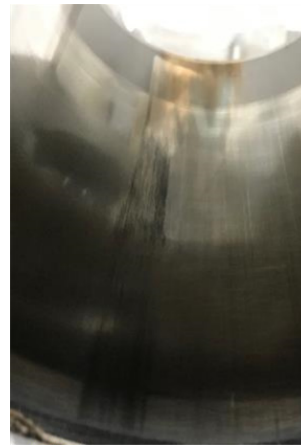
FIGUR 14

Anzeichen von Reibkorrosion am großen Pleuelage von Zylinder 1. Dieser Effekt kann unter Beachtung des höheren Ausdehnungskoeffizienten von SupremEX gegen Stahl bei der Auslegung und Wahl des Lagers gemindert oder eliminiert werden.

### BESCHLEUNIGTER LANGZEITTEST

Nach der Zerlegung des MR002-Motors und der anschließenden Identifikation der verschlissenen oder beschädigten Komponenten wurde entschieden, folgende Veränderungen vor dem Langzeittest durchzuführen:

- Beschaffung eines neuen Zylinderblocks (Version MR003) wegen der Beschädigungen der Zylinderbohrungen aus den früheren Tests.
- Neuer Pleuel mit vorheriger Spannungsfreiglühung nach dem Schmieden, um Restspannungen zu entfernen, die sich bei der Grobbearbeitung aufgebaut haben. Nach der Glühung waren nur noch minimale Materialabnahmen notwendig, wodurch die restlichen inneren Spannungen auf ein Mindestmaß reduziert wurden. Keine konstruktiven Veränderungen des Pleuels.
- Neue Kolben unter Beibehaltung der ursprünglichen Geometrie.
- Neue Standardventiltriebkomponenten wie Ventil, Federn und Ventilsitze.
- Neue Motorlager – Großes Pleuelage und Hauptlager.
- Neue Pleuelschrauben.
- Ein modifizierter Zylinderkopf mit Ventilsitzen und -führungen sowie Kolbenbolzen gemäß der MR002-Variante. Der Zylinderkopf war 83 h im Einsatz, davon 14 h unter WOT-Bedingungen.



FIGUR 15

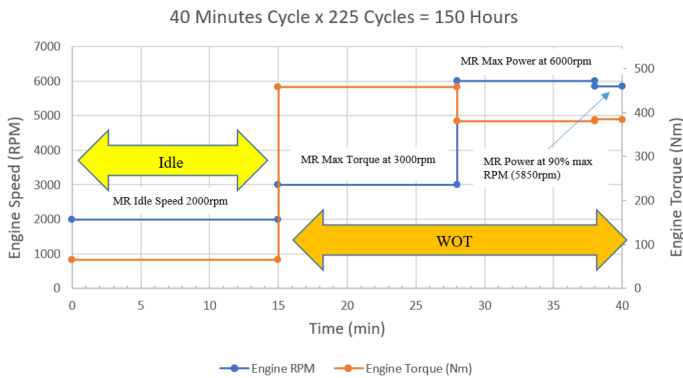
Materialübertragung von der Zylinderwand auf der Druckseite von Zylinder 3.

Um das Langzeitverhalten der neuen Komponenten zu testen, wurde ein 150 Stunden Hochgeschwindigkeitstest (HST) gewählt. Diese Bedingungen repräsentieren einen typischen, beschleunigten OEM-Verschleißtest. Dabei werden wiederholt 40 Minuten Zyklen durchfahren, die die folgenden vier Phasen enthalten:

1. Leerlauf – 15 Minuten Leerlauf, damit sich die Komponenten vor den Belastungsphasen thermisch angleichen. Diese Stabilisierungsphase kann zu thermischer Ermüdung nach den Hochlastphasen (max. Geschwindigkeit und Drehmoment) führen.
2. Maximales Drehmoment – In dieser 13 Minuten langen Phase erfahren die Zylinder den maximalen Druck.
3. Maximale Geschwindigkeit – Das System wird 10 Minuten hohen Wärmelasten ausgesetzt. Die hohe Geschwindigkeit und das träge Verhalten bezüglich der Wärmeverteilung setzen die Standzeit der Ventiltriebkomponenten Nockenwelle, Kipphebel und Ventildfedern fest.
4. 90% max. Geschwindigkeit – Diese 2 Minuten dauernde Phase ähnelt der vorherigen, aber mit reduzierter Geschwindigkeit.

Die grafische Veranschaulichung der vier Phasen wird in Figur 16 vorgenommen.





**FIGUR 16**  
Hochgeschwindigkeits Testzyklus.

Inklusive Unterbrechungen und Einlaufphase ergab sich eine gesamte Testdauer von 198 h mit 97 h auf einem >90% WOT Niveau.

Eine Kalibrierung zur Optimierung der Laufeigenschaften wurde vor jeder Testserie durchgeführt. Alle Parameter (Nockenwelle, Kraftstoffphasenwinkel, -druck) wurden als feste Größen während des Langzeittests angenommen. Während des Volllast- und 90%-Betriebs wurde der Kraftstoff angereichert, um die Abgastemperaturen auf normalem Niveau zu halten. Während dieser Betriebsphasen wurden sowohl die Kühlmittel- (vom Motor kommend) als auch die Öltemperatur bei 90°C +/- 5°C gehalten. Die Lufttemperatur im Ansaugplenum lag bei 40°C +/- 5°C. In der Leerlaufphase wurde das Kühlmittel weiterhin bei 90°C +/- 5°C gehalten, allerdings war eine Kontrolle der Öltemperatur nicht möglich.

Der Motor beendete den kompletten Langzeittest von 150 h zusätzlich 48 Stunden an Unterbrechung und Einlaufphase mit keinen erkennbaren mechanischen Problemen. An den Zündkerzen ließen sich Undichtigkeiten beobachten, die zu Fehlzündungen führten. Die Zündkerzen wurden insgesamt zweimal gewechselt, die Zündspule einmal. Nach 122 bzw. 151 h (kurz vor Ende des Langzeittest) Laufzeit traten Probleme mit der Zylinderkopfdichtung auf.

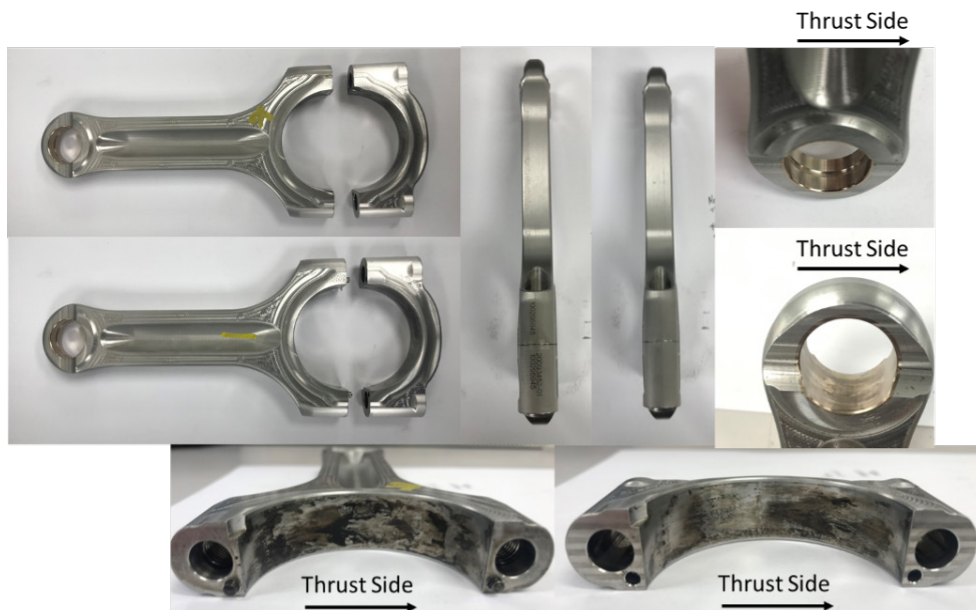
Nach dem ersten Ausfall der Dichtung wurden die Dichtflächen gesäubert und eingeebnet, bevor eine neue Dichtung eingelegt wurde. Der zweite Ausfall schien sich kurz vor Beendigung des Langzeittest ereignet zu haben. Daraufhin wurde die Kühlmittelmenge derart angepasst („durch Erhöhung des Arbeitsdrucks“), um den Test unter Volllastbetrieb komplett abzuschließen.

Nach dem Langzeittest wurde der Motor komplett zerlegt. Alle Komponenten wurden mittels Farbeindringprüfung auf Risse untersucht. Der Zustand von Zylinderkopf, Zylinderdichtung und Ventiltrieb lässt sich wie folgt beschreiben:

- Zylinderkopfdichtung – sichtbare Beschädigung, Austritt von Kühlfüssigkeit zwischen den Dichtflächen.
- PerforMet Ventilsitze – Allgemein guter Zustand.
  - Keine Fressspuren oder Verschleiß.
  - Minimaler Rückgang des Spiels beim Stößel um 1 – 2 µm.
- PerforMet Ventilführung – kein sichtbarer Verschleiß.
- Einspritzdüsen – keine sichtbaren Schäden.
- Nockenwellenzapfen am Ein- und Auslass – kein signifikanter Verschleiß.
- Einlass- und Auslassstößel – kein nennenswerter Verschleiß oder Verformung.
- Ein- und Auslassventile – kein übermäßiger Verschleiß oder Fressen.

Insgesamt hat der Pleuel aus SupremEX den Langzeittest sehr gut bestanden. Figur 17 zeigen Aufnahmen des Zylinders und Pleuel nach dem Langzeittestest. Wie bei Version MR002 bereits beobachtet, konnten Spuren von Reibkorrosion auf der Schubseite der großen Endbohrung festgestellt werden. Dies hatte jedoch keinen Einfluss auf die Leistung, noch konnte ein erhöhter Verschleiß festgestellt werden. Das kleine Pleuelauge aus ToughMet 3 wies insbesondere am Zylinder 2 und 4 an einigen Stellen hell glänzende Oberflächen auf. Es war jedoch kein erhöhter Verschleiß nachweisbar.





FIGUR 17  
Zerlegter Pleuel vom Zylinder I nach dem Langzeittest.

Aufgrund der Beobachtungen aus MR002 wurde ein Spannungsfreiglühen der bearbeiteten Stangen notwendig. Dies wurde an allen vier Pleuel, die im Langzeittest waren, durchgeführt. Bei der Inspektion der vormontierten Teile zeigte sich, dass ein Pleuel außerhalb der Toleranz lag. Um im vorgegebenen Zeitfenster des Cosworth Dynamometertests zu bleiben, wurde der Austausch des Pleuels durch beschleunigte Bearbeitung ohne die Spannungsfreiglühung durchgeführt. Der Pleuel wurde im Zylinder vier installiert.

Erwartungsgemäß zeigte sich bei dem Pleuel aus Zylinder vier eine Geradheitsabweichung von  $95 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  gegenüber der üblichen Toleranz von  $5 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ . Verbunden mit dem Geradheitsproblem kam es zum Kontakt mit den Zylinderlaufflächen

auf der Schubseite am schmalen Pleuelende und zu einem Abrieb der DLC Beschichtung auf den Kolbenbolzen. Insgesamt hatte die Krümmung keine Leistungseinbußen zur Folge. Die Pleuel und Kolbenbolzen der anderen Zylinder zeigen keine Anzeichen einer Schubbelastung und unterstreichen die Behauptung, dass eine Spannungsrelaxation im Zylinder vier für die Schubbelastungen verantwortlich ist.

Alle vier SupremEX Kolben waren nach dem Langzeittest in gutem Zustand und zeigten keinerlei Verschleiß. Erwartungsgemäß ließen sich Spuren einer Oberflächenverfärbung am Kolbenboden sowie ein geringer Abrieb der Molykotebeschichtung erkennen. Figur 18 zeigt den Kolben von Zylinder I nach dem Langzeittest.

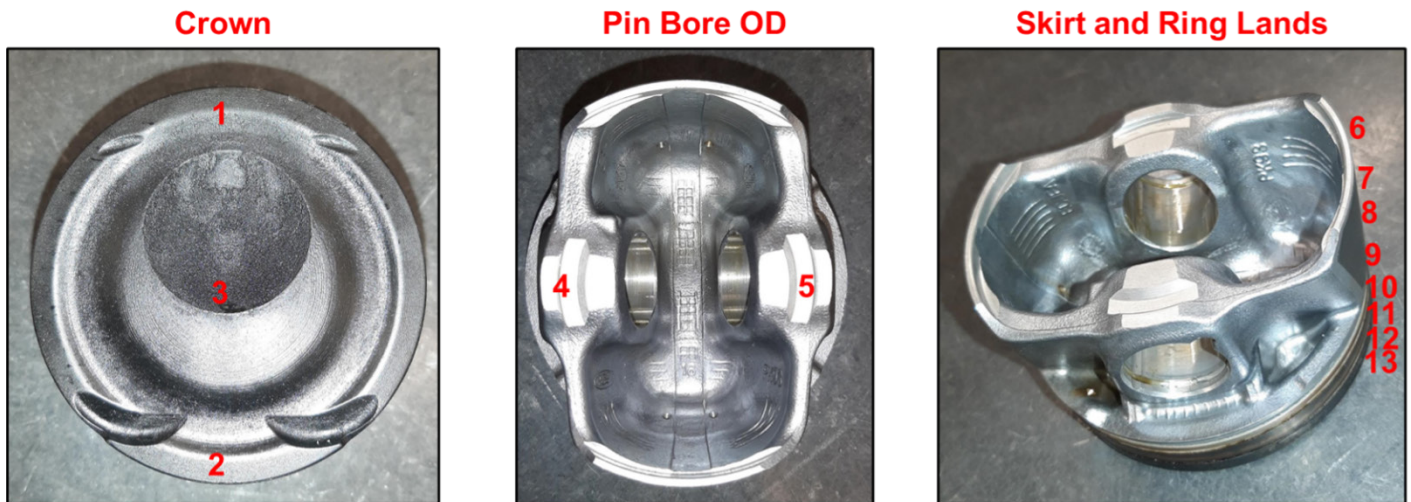


FIGUR 18  
Zerlegter Kolben aus Zylinder I nach dem Langzeittest.



**FIGUR 19**  
 Härtemessungen (HV 10) nach dem Langzeittest an verschiedenen Messstellen (vgl. Figur 20).

Härtemessungen wurden nach den Tests an 13 Positionen, wie in Figur 20 gezeigt, durchgeführt. Die Ausgangshärte des SupremEX 225CA-Kolbens liegt typischerweise zwischen 200-220 HV10. Figur 19 zeigt die Härte an den Messstellen zweier SupremEX Kolben nach dem Langzeittest und dem OEM-Gusskolben sowie dem SupremEX 225CA Kolben nach der Kennfeldaufnahme.



**FIGUR 20**  
 Lage der Härtemesspunkte am Kolben nach dem Langzeittest.

Auffällig ist die Ebenheit der oberen Auskehlung. Während diese mit 15 µm vor dem Test gemessen wurde, lag der Wert nach dem Test bei 42 µm. Dies kann wiederum mit der Spannungsrelaxation des Materials erklärt werden. Eine Spannungsfreiglühlung wie sie beim Pleuel angewendet wurde hat auch in diesem Fall das Problem abgeschwächt.

Der Kompressionsring zeigte eine signifikanten Verschleißstufe auf der Unterseite was mit den Erfahrungen aus der MR002-Trestreihe übereinstimmt. Die Spur am Kompressionsring von

Zylinder Nr. 3 war 67 µm tief, die an Zylinder 1 mit 175 µm am stärksten ausgeprägt. Wie bereits festgestellt, weist ein weicher Gusseisenring gegenüber einer Nut aus SupremEX eine höhere Verschleißtendenz als beispielsweise einer Nut aus Chrom- oder Werkzeugstahl auf. Bedenkt man die Härte und den Verschleißwiderstand von SupremEX 225CA, kann der Verschleiß des Kompressionsrings durch Auftragung von „red grease“ während der Ringinstallation oder durch eine Beschichtung der Ringflächen aus Wolframsulfid vermindert werden.



## ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Ziel dieser Arbeit war zu demonstrieren, dass Werkstoffe, die bereits im Rennsport erfolgreich eingesetzt worden sind, auch die Effizienz und damit auch die Emission in Serienfahrzeugen ohne Leistungseinbußen verbessern.

Aufbauend auf einem seit 2018 im Ford EcoBoost 2.3 Liter kommerziell verfügbaren 4 Zylindermotor wurden Schlüsselkomponenten im und um den Verbrennungsmotor herum neu ausgelegt und bei Cosworth Ltd. (UK) getestet. Dabei wurden die verbesserten Materialeigenschaften von Werkstoffen, die von Fa. Materion für Antriebsstrangkomponenten entwickelt worden sind, ausgenutzt.

Konstruktive Veränderungen im modifizierten Motor zielten auf eine signifikante Reduzierung der Kolbenmasse und die Änderung der Reibverhältnisse, die Erhöhung der Verbrennungseffizienz sowie ein verbessertes Wärmemanagement. Trotz der teils einschneidenden Konstruktionsänderungen wurde darauf geachtet, eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten. Obwohl Nocken- und Kurbelwelle konstruktiv nicht verändert wurden, zeigten Berechnungen und Schwingungsmessungen, dass bedeutende Reduzierungen dadurch erreicht werden, wenn die neue Kolbenbolzen-Pleuel Konfiguration dem Gegengewicht angepasst wird.

Die gemessenen Reibungsreduktionen lagen zwischen 0,7% bei niedriger und 2,1% bei hoher Geschwindigkeit. Die Verminderung der Reibung, die aus der Reduzierung der Kolbenmasse resultiert, ergab die höchsten BSFC-Abnahmen (0 – 1,5% im Motorkennfeld). Aus anderen Arbeiten geht hervor, dass eine Verkleinerung des Feuerstegs und der Einsatz von hoch wärmeleitfähigen Werkstoffen für Kolbenringe und Ventilsitze die Verbrennungseffizienz steigern und das Klopfen vermindern. Einen Beweis dafür konnte in dieser Studie nicht erbracht werden. Nach Meinung der Autoren ist dies nicht verwunderlich, bedenkt man die Herkunft und den Entwicklungsstand des Serienvergleichsmotors. Die Firma Ford wirbt damit, dass der „Eco Boost Motor“ trotz kraftvoller Leistung einen geringeren Benzinverbrauch als Motoren mit größerem Hubraum aufweist<sup>12</sup> Der Motor wurde in Jahr 2009 auf den Markt gebracht und die 2.3 I-Version 2015 vorgestellt. Dabei durchlief der Motor viele Entwicklungsschritte, die auch Grundlage dieser Arbeit waren, eine verbesserte Effizienz unter Beibehaltung von Leistung und Lebensdauer.

Obwohl die konstruktiven Veränderungen und die neuen Werkstoffe einen geringeren Effekt als angenommen auf den Basismotor hatten, werden sie bei der Entwicklung von Hochleistungs- und Hocheffizienzmotoren als wünschenswert akzeptiert. Neue Technologien, die im Rennsport oder als Versuchsmotor einen Vorteil demonstrieren haben, müssen aber erst einen Dauertest

bestehen, bevor die Materialien für eine Serienproduktion in Frage kommen.

Der modifizierte Motor lief in einem Hochgeschwindigkeitsdauerstest 150 h, davon waren 96 h bei WOT. Es traten keine mechanischen Probleme auf. Alle Komponenten aus Materion-Werkstoffen, inklusive dem Pleuel aus einer Aluminiumlegierung, überstanden den Test ohne sichtbaren Verschleiß. Es waren keine Leistungsveränderungen gegenüber dem Basismotor feststellbar. Geringfügige Unebenheiten der oberen Ringnut aus SupremEX und Toleranzabweichungen in der Geradheit des Pleuels aus SupremEX resultierten aus der Relaxation der maschinell stark bearbeiteten Komponenten. Diese Beobachtungen lassen sich durch ein gezieltes Spannungsfreiglühen reduzieren. Durch eine andere Materialwahl oder entsprechende Beschichtung kann der Verschleiß des Kompressionsrings aus Gusseisen in der Ringnut aus SupremEX reduziert werden. Um Reibkorrosion in den Lagerbohrungen zu vermeiden, sollte der thermische Ausdehnungskoeffizient des Lagers am unteren Pleuelende dem Wert von SupremEX angepasst werden.

Alle genutzten Komponenten aus Materion-Werkstoffen sind für die Anfertigung von Fertigteilen, die in diesem Versuch getestet wurden, kommerziell verfügbar. Dort, wo es aus Kostengründen für eine Serienfertigung notwendig erschien, wurden bzw. werden neue Methoden zur endkonturnahen Herstellung entwickelt. Ventilsitze und Ventilführungen aus PerforMet, geschmiedete Kolben aus SupremEX sowie kleine Pleuellager aus ToughMet werden von einer Vielzahl von Anbietern hergestellt und vertrieben. Da die Lebensdauer von Pleuel aus SupremEX in dieser Studie zum ersten Mal bewiesen wurde, ist deren Fertigungsweg weniger detailliert ausgearbeitet, aber eine Prototypenfertigung ist verfügbar. Für Kolben aus einer gegossenen Aluminiumlegierung hat Materion eine Methode entwickelt, in der die obere Ringnut aus Gusseisen durch SupremEX ersetzt wird. Dieser Prozess gewährleistet dieselbe Lebensdauer ohne die Nachteile der höheren Masse und geringeren Wärmeleitfähigkeit einer Ringnut aus Gusseisen.

Die zulässigen Emissionswerte werden auch zukünftig weiter abgesenkt. Letztendlich stellt die Elektrifizierung aller Verkehrsmittel eine zukünftige Lösung dar. Allerdings bedingt dies Entwicklungen bei der Energiespeicherung, weiteren Kostensenkungen und einer Infrastruktur, die überall verfügbar und effizient sein muss. Zwischenzeitlich lassen sich Verbesserungen bei Verbrennungsmotoren durch die in dieser Arbeit vorgestellten Maßnahmen kurzfristig umsetzen und sollten nicht unterschätzt werden.

Zu den weiteren Werkstoffentwicklungen, die eine Kosteneinsparung für eine Serienfertigung ermöglichen, sollten zukünftige Studien folgendes beinhalten:

- Einsatz von Kompressionsringen mit hoher Wärmeleitfähigkeit für einen optimierten Verbrennungsprozess.
- Selektive Verstärkung von Aluminiumgusslegierungen mit SupremEX für weitere Gewichtsreduzierungen sowohl als Kolbenmaterial wie auch Strukturelementen.
- Untersuchungen zu den Vorteilen solcher Materialien im Hinblick auf deren Korrosionswiderstand, deren Wärmeleitfähigkeit und tribologischen Eigenschaften in alternativen Kraftstoffkonzepten inklusive synthetischen Kraftstoffen und Wasserstoff (HICE).

Für weitere Informationen zu den Werkstoffen, die in dieser Studie zum Einsatz kamen, sowie den Testdaten kontaktieren Sie bitte unseren technischen Kundenservice +49.711.830.93-0 or <https://materion.de.com/das-unternehmen/kontakt>.

## LITERATURQUELLEN

1. Regulation (EU) 2019/631 of the Europe Parliament and of the Council, "Setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011", <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0631>
2. Weinowski, R., Sehr, A., Wedowski, S., et. al., "Future Downsizing of S.I. Engines - Potentials and Limits of 2- and 3-Cylinder Concepts", 30<sup>th</sup> Vienna Motor Symposium, 7-8 May 2009, Vienna, Austria
3. Xia, J., Lewandowski, J., Willard, M., "Tension and fatigue behavior of Al-2124A/SiC particulate metal matrix composites", Mat. Sci. Eng. A, in press, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138518>
4. Falsafi, J., Rosochowska, M., Jadhav, P., Tricker, D., "Lower Cost Automotive Piston from 2124/SiC/25p Metal Matrix Composite", SAE Int. J. Engines (10)4:1984-1992, 2017, doi: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1048>
5. "Improving Engine Performance with High Performance Alloys", <https://Materion.com/access-forms/improving-engine-white-paper>
6. High Temperature Characteristics of Stainless Steels, Figure 24, A Designers' Handbook Series, No. 9004, AISI
7. Cribb, R., Gedeon, M.J., Grensing, F.C., "Performance Advances in Copper-Nickel-Tin Spinodal Alloys", Advanced Materials & Processes, September 2013, p20-25, ASM International

8. Smith, P., Cheng, W., Heywood, J., "Crevice Volume Effect on Spark Ignition Engine Efficiency", SAE Technical Paper 2014-01-2602, 2014, doi: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2602>
9. Bredda, S., Tricker, D., "High Performance Alloys and Extending the Operating Limits of the Combustion System" 9<sup>th</sup> Int. Downsizing Conference, Offenbach, Germany, 9-11 May 2017
10. Tricker, D., Egger, A., Krus, D., and Bredda, S., "Impact of High Performance Combustion Chamber Alloys on Fuel Efficiency," SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 2(5):2918-2924, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-1338>.
11. Smith, Patrick M., "Crevice Volume Effect on Spark Ignition Engine Efficiency," Massachusetts Institute of Technology, Master of Science in Mechanical Engineering Thesis, M.I.T., 2013.
12. "What is the Ford EcoBoost® Engine?" <https://www.ford.com/support/how-tos/more-vehicle-topics/engine-and-transmission/what-is-the-ecoboost-engine/>

## KONTAKTINFORMATIONEN

**David Krus** ([david.krus@Materion.com](mailto:david.krus@Materion.com)),  
Materion Corporation; Mayfield Heights, OH

**Steffen Mack** ([steffen.mack@materion.com](mailto:steffen.mack@materion.com))  
Materion Brush GmbH, Stuttgart, DE

## DEFINITIONEN/ABKÜRZUNGEN

IC	Verbrennungsmotoren
MMC	Metall Matrix Verbundwerkstoffe
TC	Thermischel Leitfähigkeit
CTE	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
SiC	Siliziumcarbid
Al	Aluminium
BSFC	Bremsspezifischer Kraftstoffverbrauch
WLTP	Weltweit harmonisiertes Testverfahren für leichtgewichtige Nutzfahrzeuge
DLC coating	Diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung

## ANLAGE

Messbare Kenndaten des Basismotors Ford EcoBoost 2.3L RS und des „Materion“ Motors :

- Leistung
- Geschwindigkeit
- Drehmoment
- Indicom Referenzsoftware
- Verbrennungszentrum
- Reibungsdruck
- Indirektes Drehmoment
- Zündwinkel
- Lamda
- Überstromventil
- Nockenwellenstellung Ein- und Ausgang
- Position Drosselklappe
- Öltemperatur Hauptkanal
- Öldruck Hauptkanal
- Öltemperatur im Sumpf
- Wassereinlasstemperatur
- Wasserauslasstemperatur
- Wasserauslassdruck
- Wasserdurchsatz
- Kurbelgehäusedruck
- Blowby
- Lufteinlasstemperatur vor dem Luftfilter
- Lufteinlasstemperatur gemäß Luftfilter
- Lufteinlasstemperatur vor der Drosselklappe
- Lufteinlasstemperatur nach der Drosselklappe
- Ansaugdruck vor der Drosselklappe
- Ansaugdruck nach der Drosselklappe
- Einlassdruck vor dem Luftfilter
- Temperatur der Versuchskammer
- Druck in der Versuchskammer
- Abgasgegendruck vor der Turbine
- Abgasgegendruck nach der Turbine
- Abgastemperatur vor der Turbine
- Abgastemperatur an der Turbine
- Turbinengeschwindigkeit
- Anzahl Klopfereignisse
- Zündzeitpunktrücknahme aufgrund von Klopfen
- Spezifischer Kraftstoffverbrauch
- Kraftstoff Vorlaufdruck
- Kraftstoffdruck im Verteilerrohr
- Kraftstoffdurchsatz