



Verbesserung der Motoreffizienz  
durch Werkstoffe



### ZUSAMMENFASSUNG

Häufig konzentrieren sich Konstrukteure von Verbrennungsmotoren auf die Erhöhung der Leistungsdichte, sei es zur Aufrechterhaltung der Leistung bei Downsizing oder zur Maximierung der Leistung bei einem gegebenen Hubraum. Mit steigender Leistungsdichte erhöhen sich Drücke und Temperaturen. Ein limitierender Faktor des Downsizing und der Erhöhung der Leistungsdichte ist die Fähigkeit der Werkstoffe, den gestiegenen Temperaturen und Drücken im Verbrennungsraum standzuhalten. Das gilt insbesondere für Ventilsitze, Ventileführungen und Kolbenringe, die Kolben und Ventile kühlen.

In dieser Veröffentlichung wurden mehrere Legierungen auf Kupferbasis hinsichtlich ihrer Wärmeextraktionsmöglichkeiten als Ventilsitze, Ventileführungen und Kolbenberringe bewertet. Im Auftrag von Materion, hat GE Precision Engineering Ltd. (GEPE) verschiedene Werkstoffe mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) untersucht. Anschließend wurden Tests an einem Einzylindermotor durchgeführt. Der Produktbrief erörtert auch mögliche Designverbesserungen in Bezug auf die erhöhte Wärmeleitfähigkeit dieser Dichtungskomponenten.

Füllen Sie dieses Formular aus, um Ihr Exemplar des Produktbriefs zur Verbesserung der Motorleistung mit Hochleistungslegierungen zu erhalten.

Entwicklungsdruck aus der Industrie sowie Gesetzesänderungen zwingen Automobilhersteller dazu, mehr denn je auf die Entwicklungen im Rennsport zurückzugreifen. Downsizing und Turboaufladung sind ein zielführender Weg um die aufkommenden Anforderungen an den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu erfüllen und Abgasemissionen zu reduzieren.

Genauso wichtig für das Sportwagen- und Luxussegment ist jedoch die Fahrdynamik der jeweiligen Fahrzeuge beizubehalten, um nicht den Ruf oder Marktanteile zu verlieren. Mit Downsizing wird der effektive Mitteldruck (BMEP) maximiert, etwas dass die Konstrukteure aus dem Rennsport zu einer Kunstform entwickelt haben.

Ein limitierender Faktor des Downsizing und der Erhöhung der Leistungsdichte ist die Fähigkeit der Werkstoffe, den gestiegenen Temperaturen und Drücken im Verbrennungsraum standzuhalten. Das gilt insbesondere für Ventilsitze, Ventilführungen und Kolbenringe, die Kolben und Ventile kühlen. Materions fortschrittliche Werkstoffe adressieren dieses Problem.

Materion blickt auf eine 30 Jahre lange Erfahrung im Motorsport zurück. Bis jetzt wurden jedoch keine Daten veröffentlicht, die den Vorteil erhöhter Wärmeleitfähigkeit quantifizieren. Die hier veröffentlichte Untersuchung soll den Entwicklungsabteilungen helfen, wohl informierte Entscheidungen treffen zu können.

Im Auftrag von Materion, hat GE Precision Engineering Ltd. (GEPE) verschiedene Werkstoffe mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) untersucht. Anschließend wurden Tests an einem Einzylindermotor durchgeführt

Ziel der CFD-Untersuchung war, den Einfluss von hochwärmeleitfähigen Ventilsitzen, Ventilführungen und Kolbenringen auf den Motor zu quantifizieren.

Das CFD-Modell basiert auf dem Jaguar Landrover UltraBoost Motor, wie er in der SAE Ausgabe 2014-01-1185 "Ultra Boost for Economy: Extending the Limits of Extreme Engine Downsizing" vorgestellt wurde. Der Test am Prüfstand wurde an einem Moto3 250 cm<sup>3</sup> Einzylindermotor durchgeführt, um Daten für die Haltbarkeit (Ventilsitze- und Führungen) und Funktionsfähigkeit (Kolbenringe) der Komponenten zu erhalten.

### Hintergrund

Ab 2020 treten hohe Strafen in der EU für die Verfehlung der CO<sub>2</sub> Emissionswerte in Kraft. Technologien wie z.B. Hybridisierung und Leichtbau bieten Lösungsansätze, stellen aber gleichzeitig einen signifikanten Eingriff in die Fertigung und eine grundlegende Neugestaltung der Fahrzeuge dar.

Aufgrund des Zeitdrucks spielt Downsizing bei den Automobilherstellern eine wichtige Rolle. Kleinere Motoren sind leichter und verursachen weniger Reibungs- und Drosselverluste. Dies wirkt sich günstig auf den Kraftstoffverbrauch aus. Kunden profitieren von einer verbesserten Motoreffizienz und Hersteller von reduzierten Fertigungskosten. Gerade im Sport- und Luxussegment darf eine gesteigerte Effizienz nicht zu Lasten der Fahrleistungen einhergehen.

Die Hersteller, die diese Kriterien erfüllen entgehen nicht nur den Strafen, sondern können sich zusätzliche Marktanteile sichern.

Das Resultat dieser Entwicklung werden Motoren sein, die auf Downsizing und Turboaufladung setzen, um einen höheren effektiven Mitteldruck (BMEP) zu erreichen und den spezifischen Kraftstoffverbrauch senken (BSFC). Die Anforderungen sind mit denen aus dem Rennsport vergleichbar.

### Maximierung des BMEPs

Der BMEP ist proportional zum Drehmoment per Hubraum. Typische BMEP-Werte für Saug- und Turbomotoren:

Motorentyp	Automotive OEM (Benzin)	Motor Sport
Saugmotor BMEP (bar)	12-14	>15
Aufgeladen BMEP (bar)	24 (downsized)	>35

**TABELLE I**

Zukünftige Ziele für Downsizing und Turboaufladung übertreffen 30 bar, nahe den Werten für Turbomotoren im Rennsport. Auf die Serienentwickler kommen die gleichen Herausforderungen zu wie auf die Entwickler im Motorsport:

- Höhere Drücke
- Höhere thermische Beanspruchung, speziell im Kolbenkopf, der Kolbenringnut, der Auslassventilbrücke und der Ventile
- Erhöhte Neigung zum Klopfen durch höhere Abgastemperaturen

Im Allgemeinen müssen die Komponenten nicht nur den höheren Temperaturen und Drücken standhalten, sondern auch gleichzeitig die Wärme zuverlässig an die Kühlmedien abführen.

### Werkstoffauswahl

In Serienanwendungen wurden für Ventilsitze, Ventilführungen und Kolbenringen bisher vorwiegend Eisenbasiswerkstoffe verwendet. Diese sind günstig und bieten eine gute Haltbarkeit. Im Motorsport werden seit Jahrzehnten für Ventilsitze und Ventilführungen Kupferbasiswerkstoffe verwendet. Diese bieten eine hohe Wärmeleitfähigkeit und geringe Reibwerte.

Materion stellt eine Vielzahl von Kupferwerkstoffen her, die im Rennsport seit mehr als 30 Jahren verwendet werden. Dazu gehören Legierung 3 (C17510), Legierung 10X, Legierung 25 (C17200), PerforMet™ - und ToughMet®-Legierung.

Unsere Werkstoffe bieten eine ausgezeichnete Kombinationen aus Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Verschleißbeständigkeit, Gleiteigenschaften, Dauerfestigkeit und Korrosionswiderstand für die oben aufgeführten Anwendungen. Im Falle eines Kompressionsringes sind folgende Vorteile denkbar:

1. Eine Verkürzung des Feuerstegs
2. Niedriger Reibungskoeffizient, der keine Beschichtung erfordert und gleichzeitig den Verschleiß der Kolbenringnut reduziert

# VERBESSERUNG DER MOTOREFFIZIENZ DURCH WERKSTOFFE

Basierend auf den obigen Überlegungen, wurden Materions Werkstoffe mit Standardwerkstoffen verglichen. Eine Übersicht der Untersuchten Werkstoffe ist in Tabelle 2 dargestellt. Als Kolbenringwerkstoff wurde ToughMet®-Legierung 3 AT110 und PerforMet™-Legierung untersucht. PerforMet™ ist eine neue entwickelte ausscheidungsgehärtete Nickelsilizid-Bronze.

Werkstoff	Härte	Wärmeleit-	Anwendung
	ca. Hv	fähigkeit W/m²K	
Goetze Chromstahl GOE 65)	360 (Kern)	50	Kolbenring
Federal Mogul FM-3115	525	41	Ventilsitz
Federal Mogul PMF 10	163	38	Ventilführung
Goetze Spheroidal Graphite Cast Iron GOE 52)	327	36	Kolbenring, Ventilsitz
Materion Legierung 25 HT	363	105	Sitz & Führung
Materion Legierung 3 HT	238	240	Ventilsitz
Materion 10X HT	195	225	Ventilsitz
Materion PerforMet™-Legierung	302	160	Sitz, Führung & Ring
Materion ToughMet®-Legierung 3 AT110	302	38	Ventilführung
Materion ToughMet®-Legierung 3 TS95	222	38	Ventilführung
Materion PerforMet™-Legierung*	324	160	Kolbenring

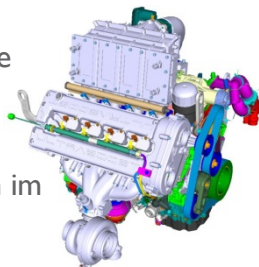
\*Vorläufige Eigenschaften

**TABELLE 2**

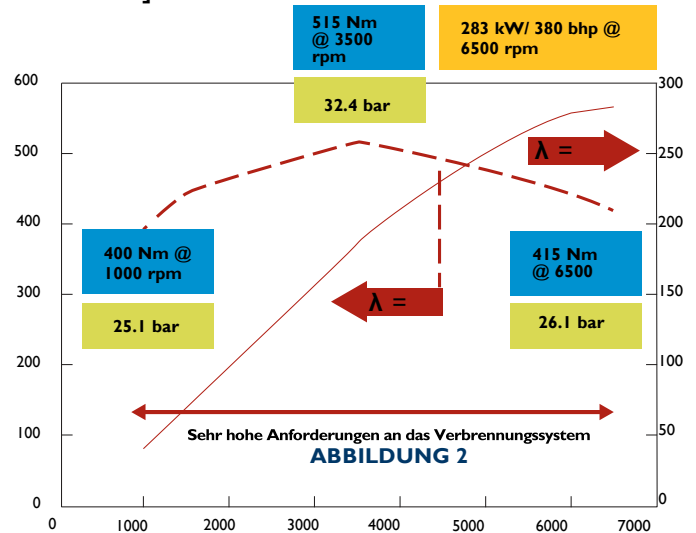
## Wärmeübertragungsanalyse

GEPE geht davon aus, dass eine Erhöhung der Wärmeübertragung in manchen Komponenten eine deutliche Reduzierung der Temperaturen zur Folge haben kann.

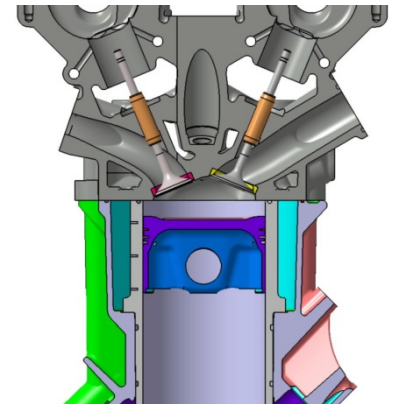
Die Werkstoffe aus Tabelle 2 wurden im CFD-Modell des Jaguar Land Rover UltraBoost experimental Motors simuliert. Bei dem UltraBoost-Motor handelt es sich um einen 2.0 Liter Reihenvierzylinder mit Turboaufladung. Die Drehmomentkurve ist in Abbildung 2 zu sehen.



**UltraBoost**  
5.1 LV8 2.0L I4 ➔ [Bohrung 83mm; Hub 92mm]



Das CFD-Modell wurde im statischen Zustand mit geschlossenen Ventilen simuliert. Es wurde nur feste Materialien verwendet.



- Wärmeeintrag nur auf den Oberflächen innerhalb des Zylinders spezifiziert
- Feste Temperatur der Wassergekühlten externen Oberflächen
- Wärmeübergangskoeffizient an der Kolbeninnenseite und den freiliegenden Ventiloberflächen
- Thermischer Widerstand aufgrund des Ölfilms zwischen dem Kompressionsring und der Zylinderlaufbahn, sowie der Luftspalt zwischen den Ventilen und den Ventilführungen

- Für die Wärmeübertragung wurde nur solid to solid und keine Konvektion berücksichtigt
- Die Freigeschnittenen Oberflächen auf beiden Seiten des Zylinders wurden als adiabat simuliert

Der Wärmefluss wurde als stationär modelliert, mit Wärmeleitung durch die Festkörper. Abbildung 3 zeigt einen Schnitt durch das vernetzte CFD-Modell. Die Wärmeleitfähigkeit, die für die Komponenten angenommen wurde ist in Appendix B Tabelle 3 zu finden. Die Randbedingungen finden sich in Appendix B Tabelle 4.

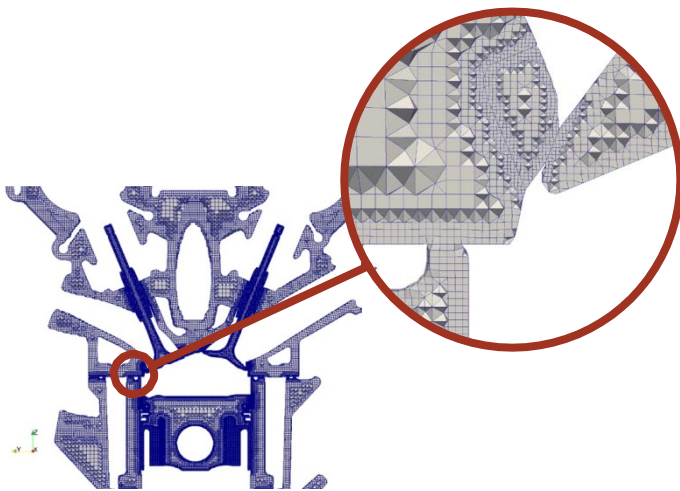


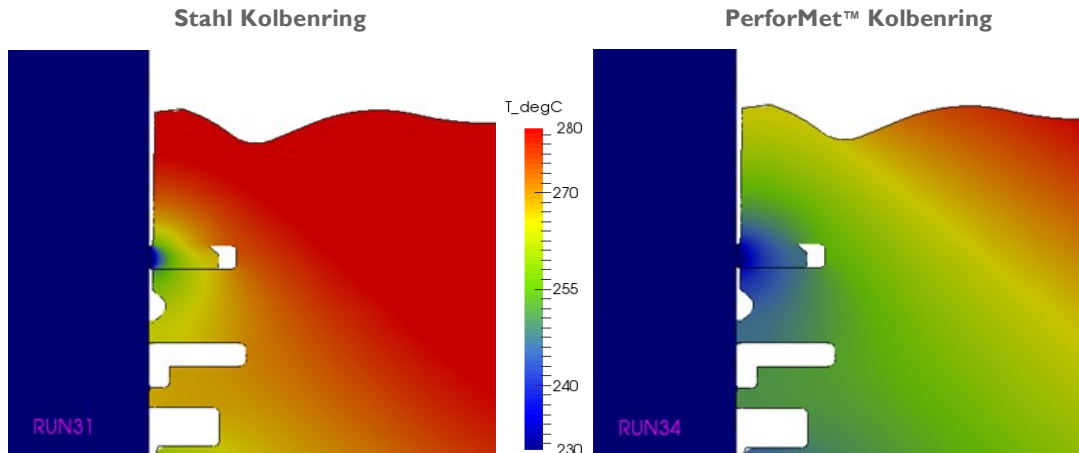
ABBILDUNG 3

Die Simulationsergebnisse; je nach unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit der Komponenten; sind in Appendix B Tabelle 5 zu sehen.

Bemerkenswertes:

- In Abbildung 5 sind die Temperaturreduzierungen bei **Kolbenringen** aus PerforMet™-Legierung im Vergleich zu Stahl dargestellt. PerforMet™-Legierung reduziert die Kolbentemperatur drastisch. Durch die gesenkten Temperaturen lässt sich zum Beispiel die Kolbenringnut näher an den Kolbenkopf konstruieren und der Feuersteg wird somit kleiner. Ein weiterer Vorteil ist die Steigerung der Klopfestigkeit, die sich durch eine Änderung des Zündzeitpunktes oder der Kompression positiv auf den Verbrauch auswirkt.
- In Abbildung 6 sind die Temperaturen für unterschiedliche **Ventilsitzwerkstoffe** dargestellt. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit reduziert die Temperatur der Kontaktstelle zwischen Sitz und Ventil (-48°C), sowie die maximale Ventiltemperatur (-47°C). Des Weiteren wird die Temperatur der Zylinderkopfbrücke auf der Abgasseite reduziert (-7°C). Dies ermöglicht breitere Strömungskanäle und/oder weniger thermische Ermüdung.
- Die Temperaturreduzierung bei **Ventilschäften** aus Vollmaterial ist minimal. Für natriumgekühlte Auslassventile sind deutlich bessere Ergebnisse zu erwarten.

## Deutliche Reduzierung der Temperatur bei PerforMet™-Legierung Kolbenringen

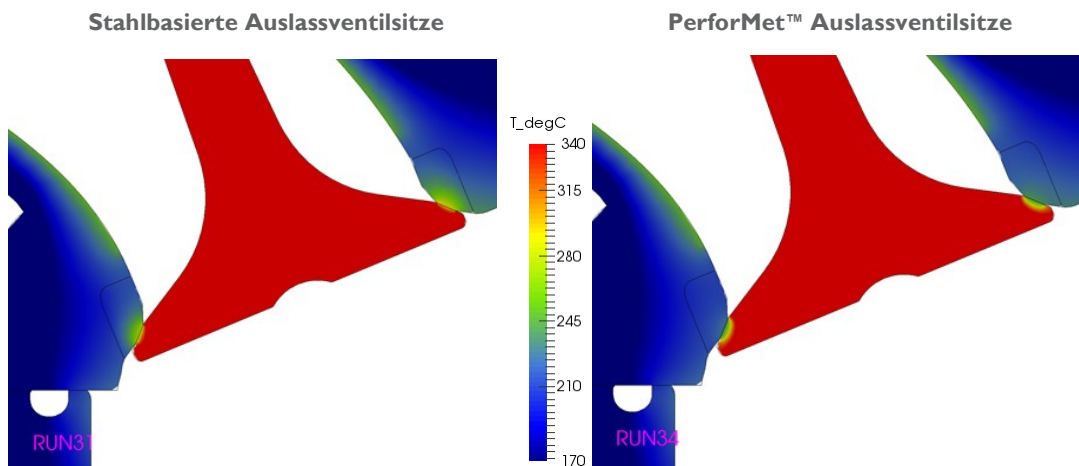


### Reduzierung der Komponententemperatur durch PerforMet™-Legierung

Maximale Temperatur Kompressionsring	-22°C
∅-Temperatur obere Ringnut	-21°C
Maximale Temperatur Kolbenkopf	-19°C
∅-Temperatur Kolben	-17°C

ABBILDUNG 5

## Deutliche Reduzierung der Temperatur bei PerforMet™-Legierung Auslassventilsitzen



### Reduzierung der Komponententemperatur durch PerforMet™-Legierung

∅-Temperatur Auslassventilsitz	-11°C
Maximale Temperatur Auslassventil	-47°C
∅-Temperatur Auslassventildichtfläche	-48°C
Maximale Temperatur Auslassventilsitz	-64°C
Maximale Temperatur Auslassventilbrücke	-7°C

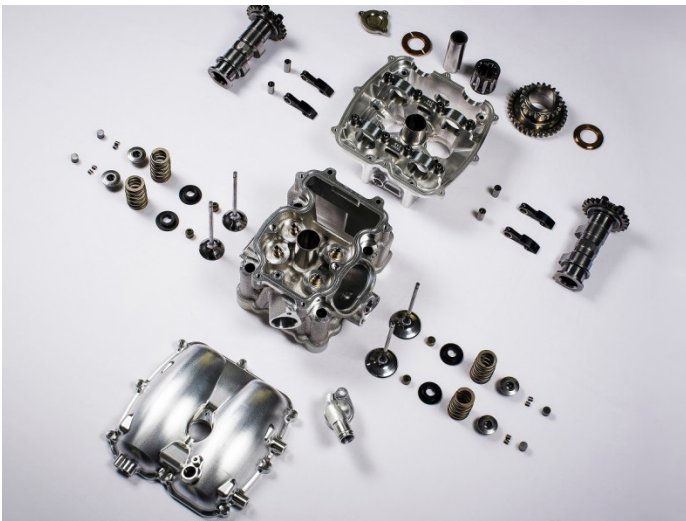
ABBILDUNG 6

### Einzylindertest – GE250R

Neben der Wärmeleitfähigkeit müssen Werkstoffe ebenso Hitze, Druck und Ermüdung standhalten. Materions Werkstoffe haben ihre Haltbarkeit bereits im Rennsport bewiesen, dies muss nun auch für Serienfahrzeuge erprobt werden.

Um erste Indikatoren zu finden, ob die untersuchten Werkstoffe den Anforderungen gerecht werden können, wurden Ventilsitze, Ventilführungen und Kompressionsringe in einem GE250R Rennmotor getestet. Dieser wurde von GE Precision Engineering entwickelt und in der Mai Ausgabe 2016 von Race Engine Technology vorgestellt. Motordaten:

- 250cc Einzylinder Rennmotor (siehe Bild)
- Moto3 FIM Reglement
- 13,500 rpm; ~55 bhp (220 bhp/L; 164 kW/L)
- BMEP 15.5 bar bei max. Drehmoment



Der Test soll einen 1500 Stunden Moto3 Renneinsatz simulieren:

- Dyno break-in prove-out (BIPO) + Leerlauf bis Vollgas (x3)
- Ausdauertest (5 h) @ >90% Drosselklappenöffnung
- Vollgastest (x3)

Der Test wurde in drei Werkstoffkonfigurationen durchgeführt:

- Drei unterschiedliche Ein- und Auslassventilsitzwerkstoffe: Legierung 3, Legierung 10X und PerforMet™-Legierung
- Drei Ventilführungswerkstoffe: ToughMet®-Legierung 3 im ATI 10, TS95 und TSI60U Vergütungszustand
- Ventilwerkstoff: Ti-6242Si mit CrN PVD Beschichtung
- Drei Kolbenringwerkstoffe: Stahl mit DLC-Beschichtung, ToughMet®- und PerforMet™-Legierung ohne Beschichtung

Folgende Messungen wurden vor und nach dem Test durchgeführt: Ventilspiel, Ventilführung Innendurchmesser, Rundheit, Zylindrizität, Oberflächenrauheit und Ventilsitzprofil. Ein Dichtheitstest wurde ebenso durchgeführt. Alle getesteten Ventilsitzwerkstoffe zeigten keine messbaren Änderungen des Ventilspiels oder der Oberflächenbeschaffenheit. Die Ventilprofile waren unverändert und die Dichtheitsmessungen zeigten keine Auffälligkeiten.

Die Ventilführungswerkstoffe ToughMet®-Legierung 3 ATI 10 und ToughMet®-Legierung 3 TS95 zeigten keine Anzeichen von Verschleiß, Kratzern und Deformation.

Ventilführungen aus TSI60U zeigten oval ausgeprägten Verschleiß. Dies ist überraschend, da TSI60U der härteste



Vergütungszustand von ToughMet®-Legierung 3 ist. Tests mit Unterlegscheiben haben jedoch bereits gezeigt, dass TS95 und AT110 unter denselben Bedingungen weniger verschleiben als TSI60U. Auch andere Kupferbasislegierungen die bereits GE250R getestet wurden, zeigten eine ovale Verformung. In der Tabelle 6 sind die Messergebnisse für die Ventilfehrungen aufgelistet.

Zustand	Einlassventilführung Ø			Auslassventilführung Ø		
	Oben (-3mm)	Mitte	Unten (-3mm)	Oben	Mitte	Unten
TS95	4,000	4,000	4,002	4,005	4,004	4,009
	(neu 3,999)			(neu 4,002)		
AT110	4,000	4,000	4,001	4,010	4,004	4,011
	(neu 3,999)			(neu 4,003)		
TSI60U	4,030	4,002	4,040	4,009	4,003	4,011
	Zylindrizität 0,037/ Geradheit 0,007 (neu 4,000)			(neu 4,002)		

Bemerkung 1: falls nicht anders vermerkt, sind Zylindrizität und Geradheit innerhalb der Toleranzen.

Bemerkung 2: gemessener Ventilschaftdurchmesser weicht weniger als 0,002 mm vom Neuzustand ab.

**TABELLE 6**

## Kolbenringe

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit von Kolbenringen wurde durch Wärmeübertragungssimulation ermittelt. Folgende Vorteile könnten zum Tragen kommen:

Effekte erhöhter Wärmeleitfähigkeit	Vorteile
Verringerung der Abgastemperatur	Erhöhte Klopfestigkeit, verbesserter Zündwinkel
Verringerung der Kolbentemperatur	Verbesserte Dauerfestigkeit des Kolbens, oder Reduzierung der Masse möglich
Verringerung der Kolbenringnuttemperatur	Ringnut kann näher an den Kolbenkopf konstruiert werden um damit den Feuersteg zu verkleinern, Verbesserung BSFC, Emissionen und Klopfestigkeit

Es gibt weitere Eigenschaften, die für eine Entwicklung von Kompressionsringen aus ToughMet®-oder PerforMet™-Legierung sprechen (könnten):

Eigenschaften	Vorteil
Einsatz ohne Beschichtung	Kostenreduzierung, Steigerung der Zuverlässigkeit
Niedriges E-Modul	Verbesserte Anpassungsfähigkeit gegenüber dem Zylinder
Niedriger Reibungskoeffizient	Verbesserte Verschleißverhalten für Zylinder und Kolbenringnut
Wärmeausdehnungskoeffizient ähnlich zu Aluminium	Weniger Blowby durch geringeres Kolbenringnutspiel

Die Kolbenringe wurden als ToughMet®-Legierung, PerforMet und Standardwerkstoffen auf dem Prüfstand eingelaufen (BIPO), gefolgt von drei Vollast-Leistungskurven. ToughMet®-Legierung zeigte einen kleinen Leistungsverlust und eine kleine Vergrößerung des Blowbys, die jedoch über die Testdauer abnahmen. Es ist zu erwähnen, dass Ringe aus ToughMet®-Legierung bereits erfolgreich in anderen Motoren mit hohem BMEP getestet wurden, sodass die Ursache nicht unbedingt im Werkstoff, sondern im Design oder der Fertigung der Ringe (in diesem Fall aus dem Vollen gefräst) liegen kann. Weitere Tests sind notwendig, um das Potential von ToughMet®-Legierung zu ermitteln.

Legierung	Max. Leistung verglichen mit Standard		Blowby (L/min.)		Druck Kurbelwellengehäuse (mbar)	
	Ist RUN	3rd RUN	Ist RUN	3rd RUN	Ist RUN	3rd RUN
Durchschnitt aus 3 Läufen						
Standard	–	–	7	8	450	385
PerforMet	Keine Änderung	Keine Änderung	8	7	505	445

**TABELLE 7**

Auf der anderen Seite hat PerforMet™ - Legierung deutlich besser abgeschnitten als erwartet. In Tabelle 7 ist zu sehen, dass es gegenüber dem Standardwerkstoff zu keinem Leistungsverlust gekommen ist. Zudem hat sich der Blowby zwischen dem ersten und dritten Lauf verringert. Dies deutet auf ein schnelles Einlaufen des Ringes hin.

Die folgenden drei Tests mit PerforMet-Kolbenringen für je 5 Stunden, zeigten einen stabilen Blowby. Auswertungen nach den Läufen zeigten keine Probleme, keine Veränderung des Stoßspieles und Dicke; keine Anzeichen von Verzug und keine messbaren Veränderungen der Kolbenringnut. Sowohl der Außendurchmesser der Standardringe, als auch der PerforMet-Ringe war um 0,003 bis 0,005 mm geringer. Dies ist möglicherweise auf den Einlaufprozess zurückzuführen.

Die bisherigen CFD- und Prüfstandtests zu PerforMet-Kompressionsringen fallen sehr positiv aus. Das ist ein starker Indikator für weitere Tests in Verbrennungsmotoren mit hoher spezifischer Literleistung. Weitere Tests mit hochaufgeladenen Motoren, unterschiedlichen Kraftstoffen und das Zusammenspiel mit unterschiedlichen Zylinderlaufbahnwerkstoffen sind von Interesse. Potentielle Testprogramme, die die Haltbarkeit von 250 000 km nachweisen, werden angegangen.

### Weitere Überlegungen

Die fortlaufenden Untersuchungen fokussieren sich auf die Vorteile von Werkstoffen mit gesteigerter Wärmeleitfähigkeit im Zusammenhang mit steigendem BMEP. Dies ist relevant für Downsizing in PKW- und Rennmotoren.

Es gibt weitere Kriterien zur Auswahl der Werkstoffe, die von Art und Größe des Motors, sowie Kraftstofftyp und Betriebsparametern abhängt. Korrosionswiderstand (Wassereinspritzung, Schwefelhaltiger Treibstoff), Druckfestigkeit, Anti-Kaltschweißverhalten und maximale Betriebstemperatur (Wasserstoff) sind Eigenschaften die bei der Wahl der Werkstoffe für Ventilsitze, Ventilführungen und Kompressionsringe berücksichtigt werden müssen. In Appendix A ist eine Übersicht derartiger Überlegungen.

Bei Interesse an einem technischen Seminar oder Informationen über Prototypen und zukünftige Verfügbarkeit für Serienanwendungen, wenden Sie sich bitte an

Dipl.-Ing. Steffen Mack  
[Steffen.Mack@Materion.com](mailto:Steffen.Mack@Materion.com)  
**+49 (0)711 830 93-20**

## APPENDIX A

Legierung	Legierung 3	Legierung 25	Legierung 10X	ToughMet® 3	PerforMet™
Chem. Komposition	CuBe	CuBe	CuBe	CuNiSn	CuNiSiCr
<b>POWERTRAIN</b>					
Auslassventilsitz	✓		✓		✓
Einlassventilsitz		✓			✓
Kolbenbolzen, Pleuelaufe		✓		✓	✓
Kolbenringe				✓	✓
Ventilführungen	✓	✓	✓	✓	✓

Bei der Wahl eines geeigneten Werkstoffes helfen wir Ihnen gerne weiter. Kontaktieren Sie hierzu +49 711 830930

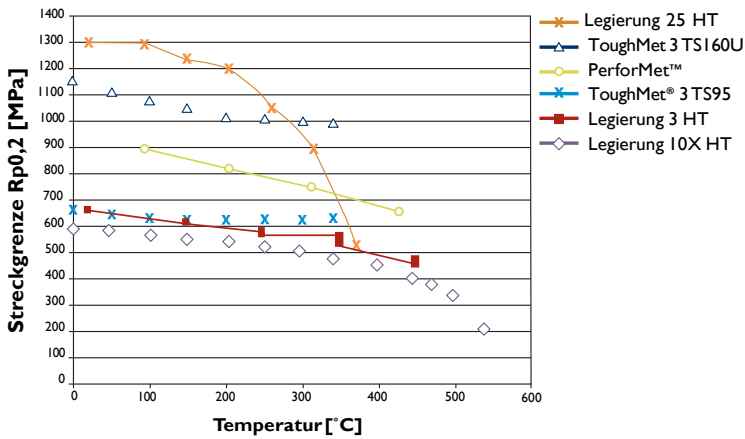
Ventilsitzlegierungen	
<b>Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochfeste Kupferlegierung mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Bewährt im Rennsport und Motoren mit hoher spezifischer Leistung</li> <li>• 4 bis 8 mal so hohe Wärmeleitfähigkeit gegenüber Eisensinter-Werkstoffen</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überwindung bestehender Limitierungen</li> <li>• Erhöhung der Leistungsdichte</li> <li>• Verringerung der Ventil- und Ventilsitztemperatur</li> <li>• Vermeidung lokaler Überhitzung und frühzeitiger Ausfall der Komponenten</li> <li>• Gleichmäßigere Temperaturverteilung im Zylinderkopf</li> <li>• Weniger Verzug im Zylinderkopf</li> <li>• Keine Eingriffe in Fertigung oder Konstruktion notwendig, einfache Integration unserer Legierungen</li> </ul>

Ventilführungslegierungen	
<b>Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochfeste Kupferlegierung mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Bewährt im Rennsport und Motoren mit hoher spezifischer Leistung</li> <li>• Unerreichte Verschleißfestigkeit (Lager/Buchsen Legierung der Wahl für Airbus Boeing und internationalen Rennteams)</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlere Ventile, Option von natriumgekühlten Ventilen auf Vollmaterial zu wechseln</li> <li>• Weniger lokale Überhitzungen</li> <li>• Wesentliche Reduzierung von Verschleiß</li> <li>• Einfache Integration unserer Legierungen</li> </ul>

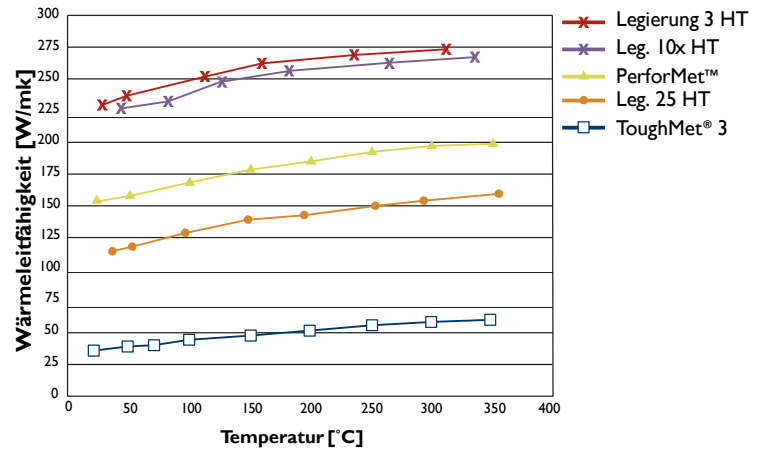
Kompressionsringe – Derzeit in Entwicklung	
<b>Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochfeste Kupferlegierung mit hoher Wärmeleitfähigkeit</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revolutionieren die Entwicklungsmöglichkeiten für Kolben</li> <li>• Signifikante Reduzierung der Kolbentemperatur</li> <li>• Erlaubt einen kleineren Feuersteg</li> <li>• Keine Beschichtung notwendig</li> <li>• Weniger Blowby als mit herkömmlichen Legierungen</li> <li>• Längere Lebensdauer der Kolbenringnut</li> </ul>

## APPENDIX A

### Streckgrenze vs. Temperatur

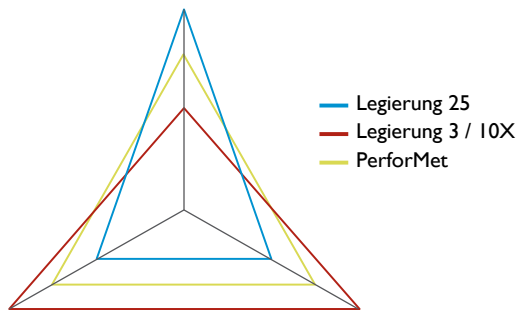


### Wärmeleitfähigkeit vs. Temperatur



### Ventilsitzigenschaften

#### Verschleißfestigkeit



Wärmeleitfähigkeit

Festigkeit bei erhöhten Temperaturen

Eigenschaft	Legierung 25 HT	PerforMet™	Legierung 3 HT	Legierung 10X HT	T3 TS95	T3 AT110	T3 TS160U
Wärmeausdehnung @ RT [1/K E-06]	17.00	17.00	17.60	17.60	16.40	16.40	16.40
Dichte @ RT [g/cm³]	8.36	8.69	8.83	8.83	9	9	9
Härte @ RT	40 HRC	27 HRC	100 HRB	92 HRB	97 HRB	HRC 30	32-36 HRC
Wärmekapazität @ RT [J / g K]	0.36	0.41	0.335	0.414	0.377	0.377	0.377
Wärmekapazität @ 100°C [J / g K]	0.406	0.41	0.381	0.414	0.389	0.389	0.389
E-Mod @ RT [GPa]	131	130	138	138	144	144	144
Chemische Zusammensetzung	CuBe2	CuNiSi2Cr	CuNiBe	CuCoBeZr	CuNi15Sn8	CuNi15Sn8	CuNi15Sn8
Dauerfestigkeit R=-1 10e7 [MPa]	350	240	280	k.A.	420	260	370

## APPENDIX B

Feste Oberflächentemperatur	
Teil	Temperatur °C
Wasserbenetzten Oberflächen	115
Block Exterieur	115
Kopf Exterieur	135
Liner (Innere Oberfläche, unterhalb des Kolbens)	130
Auslasskanal	250
Einlasskanal	105

Feste HTC Oberflächen		
Komponente	HTC, W/m <sup>2</sup> K	lokale Temp. °C
Einlassventilschaft (im Stößel)	100	125
Einlassschaft (im Kanal)	100	105
Einlassventilführung (im Stößel)	100	120
Einlassventilführung (im Kanal)	100	105
Auslassventilschaft (im Stößel)	100	130
Auslassventilschaft (im Kanal)	100	250
Auslassventilführung (im Stößel)	100	125
Auslassventilführung (im Kanal)	100	250
Kolbenboden	100	100

**TABELLE 3**

Wärmequellen Zylinderoberfläche				
Teil	angestrebte T,	Wärmeeingang	Berechnete T,	Anmerkungen
Kopf (innerhalb Zylinder)	205	4541.0	207.6	Ø Zylinderkopf T (innerhalb Zylinder)
Kolbenkopf	300-320	1405.0	319.9	Maximale Temperatur Kolbenkopf
Liner (innerhalb Zylinder)	200	6624.0	199.0	Ø Liner T (innerhalb Zylinder)
Auslassventiloberfläche Ø aus beiden		759.0	617.9	Ø Auslassventiloberfläche T (innerhalb Zyl.)
Einlassventiloberfläche Ø aus beiden		374.0	331.4	Ø Einlassventiloberfläche T (innerhalb Zyl.)

Thermischer Widerstand durch schmalen Spalt				
Teil	Materie	Dicke (m)	Leitfähigkeit (W/mK)	Anmerkungen
Kolbenring zu Liner	Öl	3.00E-06	0.134	Motorenöl 127 °C
Ventilschaft zu Führung	Luft	3.00E-05	0.0371	Luft 177 °C
Kolbenhemd	Luft	1.50E-04	0.0371	Luft 177 °C

**TABELLE 4**

## APPENDIX B

Werkstoff und Wärmeleitfähigkeit (W/mK)				
Bauteil	Einlassventilsitz	Auslassventilsitz	Ventilführung	Kompressionsring
RUN31	GOE 52 (36)	FM-3115 (41)	PMF 10 (38)	GOE 65 (50)
RUN32	Leg. 25 (105)	Leg. 3 (240)	ToughMet® (38)	ToughMet® (38)
RUN34	PerforMet™ (105)	PerforMet™ (105)	PerforMet™ (105)	PerforMet™ (105)

maximale Temperatur innerhalb Bauteil (°C)								
	Ventil Einlass	Sitz Einlass	Führung Einlass	Ventil Auslass	Sitz Auslass	Führung Auslass	Kolben	Ring
RUN31	393.2	228.6	127.4	825.0	340.7	245.3	320.2	273.0
RUN32	369.2	198.9	127.4	772.0	267.8	245.2	326.8	281.0
RUN34	363.6	194.2	125.6	777.9	277.0	235.5	302.6	251.2

Ø Temperatur durch Bauteil (°C)									
	Ventil Einlass	Sitz Einlass	Führung Einlass	Ventil Auslass	Sitz Auslass	Führung Auslass	Kolben	Ring	Kopf
RUN31	254.8	157.9	119.4	437.4	231.3	175.5	275.4	257.8	136.8
RUN32	238.9	152.9	119.3	405.0	218.2	175.4	281.7	264.1	136.7
RUN34	235.0	151.5	118.7	408.4	219.7	175.4	258.4	241.5	136.7

	Temperatur Kolbenringnut (°C)		Ø Temperatur Oberflächen im Zylinder (°C)			
	Oben	Unten	inlet valve face	exhaust valve face	Kolben -kopf	Kopf
RUN31	264.9	260.7	331.4	617.9	298.8	207.6
RUN32	272.7	267.6	305.8	563.8	305.8	205.1
RUN34	244.4	242.8	299.8	569.8	280.2	204.8

TABELLE 5