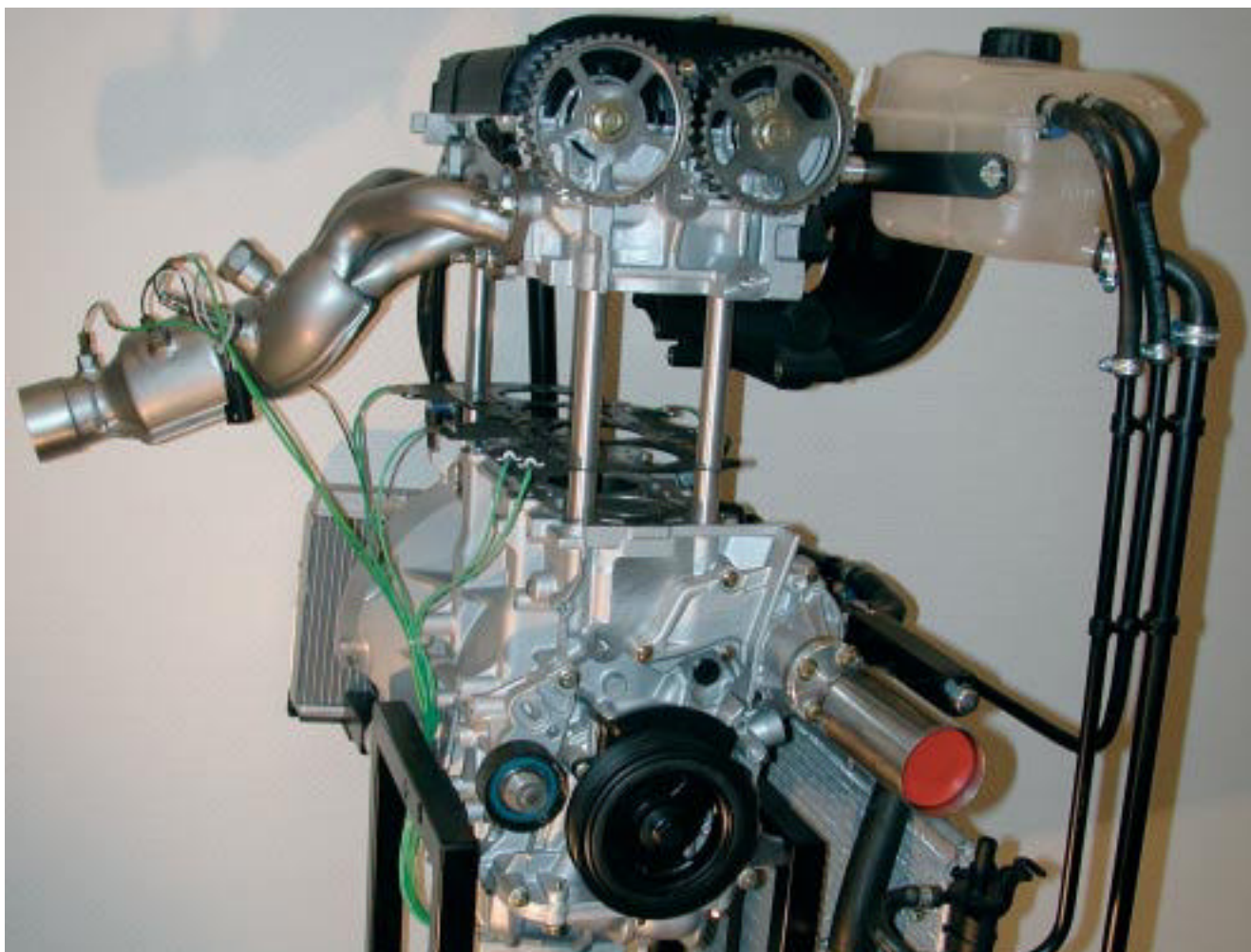


Bedarfsabhängig geregelte Motorkühlung

Versuch und Simulation

Die bedarfsabhängige Kühlung am Verbrennungsmotor wurde bereits in der Vergangenheit auf unterschiedliche Art realisiert. Nennenswerte Vorteile im Kraftstoffverbrauch lassen sich aber erst nachweisen, wenn ein Regelkonzept umgesetzt wird, das auch die völlige Abschaltung des Kühlkreises zulässt, wie dieser Beitrag der Elring-Klinger Motortechnik GmbH zeigt.



Die Autoren



Dr.-Ing. Gerald Eifler ist Geschäftsführer der Elring-Klinger Motortechnik GmbH.



Marco Burkard ist Projektsachbearbeiter bei der Elring-Klinger Motortechnik GmbH.



Frank Kawert ist Projektsachbearbeiter bei der Elring-Klinger Motortechnik GmbH.

1 Einleitung

Gerade in Zeiten, in denen das Bewusstsein über die nur endliche Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe zunimmt, tritt die Kraftstoffverbrauchsabsenkung am Verbrennungsmotor wieder stark in den Vordergrund. Die Entwicklung des ottomotorischen Brennverfahrens mit Direkteinspritzung wurde maßgeblich dadurch motiviert. Die Bestrebungen zur weiteren Reibleistungsoptimierung der Triebwerke sind weiterhin Kernbestandteil der Motorenentwicklung.

Umso mehr verwundert es deshalb, dass die Arbeiten zur Entwicklung eines bedarfsgerechten Kühlungsmanagements in den letzten beiden Jahren nicht forciert vorangetrieben wurden. Dies liegt sicherlich an den sehr positiven Potenzialabschätzungen, die später durch entsprechende Versuche im Feld nicht bestätigt werden konnten. Das grundsätzliche Potenzial zur Absenkung des Kraftstoffverbrauchs durch eine schnelle Aufheizung des Motors ist jedoch vorhanden – wichtig ist aber, wie die bedarfsabhängige Motorkühlung am Motor umgesetzt wird. In diesem Beitrag soll ein System vorgestellt werden, das die Temperatur in der Zylinderkopfdichtung als Führungsgröße heranzieht und das sich deshalb durch eine bessere Regel- und Dosierbarkeit auszeichnet.

2 Intention

Bild 1 zeigt die Verlustteilung eines Ottomotors in einem Betriebspunkt in der tiefen und in der oberen Teillast. Es ist ersichtlich, dass gerade in der Teillast – also dort, wo der Motor typischerweise im Straßenverkehr betrieben wird – sich große Verluste durch nicht ideale Verbrennung, Ladungswechsel, Kühlung und Reibung einstellen. Die Konzepte der bedarfsabhängigen Kühlung greifen in den letztgenannten Punkten. Grundidee ist, die Antriebsleistung der Kühlmittelpumpe an den tatsächlichen Bedarf des Motors hinsichtlich zirkulierendem Kühlmittel anzupassen. Die so in der Teillast eingesparte Pumpenantriebsleistung sollte die Wirkungsgradnachteile einer regelbaren Elektropumpe gegenüber der mechanischen Pumpe überkompensieren. Bisher waren jedoch alle Systeme von der Messung der Kühlwassertemperatur am Zylinderkopfaustritt abhängig, die einen gewissen Kühlmitteldurchfluss zwingend erforderte. Die Vorteile der bedarfsabhängigen Kühlung mit elektrischer Pumpe konnten so nie richtig ausgespielt werden und der Nachweis, dass mit diesem Konzept überhaupt Vorteile im Kraftstoffverbrauch erreicht werden, gestaltete sich schwierig. Eine auf Nulldurchsatz gedrosselte Zirkulation konnte man zwar über rechnerische Durchflussmodelle in der Aufheizphase des Motors darstellen, ein großer Sicherheitsabstand zur Überhitzungsgrenze des Motors war aber notwendig und schränkte die Effektivität solcher modellunterstützter Regelkonzepte ein.

2 Intention

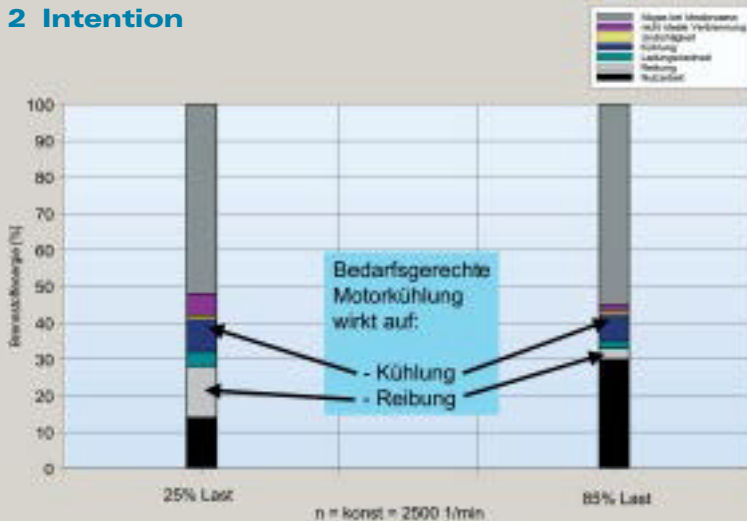


Bild 1: Verlustteilung eines Ottomotors bei mittlerer Drehzahl
 Figure 1: Power output and losses of an SI-engine at medium speed

3 Systemaufbau

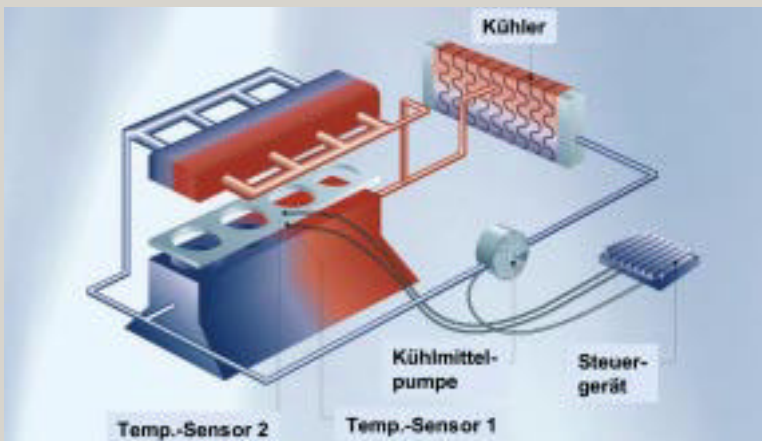


Bild 2: Systemaufbau der bedarfsgerechten Motorkühlung
 Figure 2: Construction of the control circuit of the "cooling on demand" system

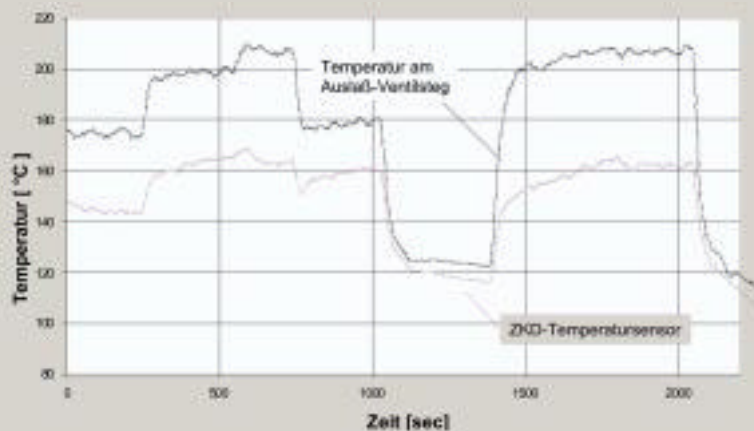


Bild 3: Vergleich unterschiedlicher Temperaturmessstellen im Motor hinsichtlich ihrer Sensitivität auf Last- und Drehzahländerung
 Figure 3: Comparison of various sensor-sensitivities when changing load and speed

3 Systemaufbau

Aufgabe war es deshalb, ein System zur Temperaturmessung im Kühlmantel des Brennraums zu entwickeln, und damit den Regelkreis zur bedarfsabhängigen Motorkühlung zu betreiben. Die Aufgabe wurde mittels einer Zylinderkopfdichtung (ZKD) gelöst, die mit einer redundant ausgeführten Temperatursensorik bestückt war, **Bild 2**. Das Gesamtsystem besteht aus einer elektrisch angetriebenen Wasserpumpe, einer Steuerung und der genannten Sensor-Zylinderkopfdichtung. Zur Positionierung der Temperatursensorik waren zuvor einfache Prinzipversuche durchgeführt worden, die bestätigten, dass im Prinzip eine Temperaturmessstelle im Zylindersteg genauso sensitiv auf Last- und Drehzahländerungen und den damit verbundenen erhöhten Wärmeeintrag in das Kühlsystem reagiert, wie ein Sensor im Steg zwischen den beiden Auslassventilen – bekanntermaßen die heißeste Örtlichkeit im Motor, **Bild 3**. Auch wenn sich im Steg der ZKD ein niedrigeres Temperaturniveau einstellte, so konnte doch nachgewiesen werden, dass der integrierte Sensor alle sprungförmig geänderten Wärmeinträge zuverlässig detektierte. Dabei war es unerheblich, ob auf der Unterseite, der Oberseite oder in der Zwischenlage der Kopfdichtung gemessen wurde. Für die schnelle Aufheizung des Motors eröffnete sich damit erstmalig die Chance, die Motorkühlung bei laufendem Motorbetrieb gänzlich abzuschalten. Im Gegensatz zum konventionellen Kühlkreislaufkonzept, das immer eines gewissen Kühlmitteldurchsatzes bedarf, damit der außerhalb des Motors platzierte Temperaturfühler Änderungen erkennt, kann der bedarfsgeregelte Kreis mit integrierter ZKD-Sensorik bis zum Stillstand gedrosselt werden, **Bild 4**. Temperaturen im Dichtverband, die auf die Überhitzungsgrenze zulaufen, werden trotzdem sicher erfasst.

4 Versuchsträger

Alle Grundversuche zur Konzeptentwicklung und erste Versuche im europäischen Fahrzyklus (NEUDC) wurden an einem 1,4-l-MPFI Motor von Ford durchgeführt. Alle weiteren Versuche zur Darstellung der im realen Fahrbetrieb realisierbaren Benefits fanden an einem 1,8-Ottomotor von Opel statt. Die technischen Daten der Motoren und der zugehörigen Fahrzeuge sind in der **Tabelle 1** dargestellt.

5 Testergebnisse im europäischen Fahrzyklus (NEUDC)

Das komplette System wurde am Motor appliziert und auf dem dynamischen Prüf-

stand in europäischen Fahrzyklen vermessen, **Bild 5**. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß das sehr viel bessere Aufheizverhalten des Motors mit bedarfsgeregelter Kühlung. Die Vorteile schlugen sogar – wenn auch nur marginal – auf das Light-Off-Verhalten des Katalysators durch.

In mehreren Wiederholungsversuchen konnte ein Vorteil im Kraftstoffverbrauchsverhalten von 2,9 % für den Motor mit bedarfsabhängiger Kühlung ermittelt werden. Auffällig war, dass dieser Vorteil nur durch die komplette Abschaltung der Wasserzirkulierung erreicht werden konnte. Die zeitlichen Testanteile, in denen der Motor mit abgeschaltetem Kühlwasserkreis lief, betragen deutlich über 50 %. Aus den Temperaturverläufen in der Sensor-ZKD wird ersichtlich, dass die Regelung an diesem ersten Motor noch nicht zufriedenstellend gleichmäßig arbeitet.

6 Ergebnisse im simulierten Stadtfahrt- und Überlandbetrieb

Um die Ergebnisse für den realen Fahrbetrieb zu verifizieren, wurden zunächst für zwei Fälle Straßenfahrkurven in einem Opel Meriva mit dem 1,8-l-Ottomotor (Z18XE, MFI) aufgezeichnet. Bei der Definition der Zyklen wurden die Prämissen entsprechend **Tabelle 2** eingehalten. Letztendlich handelt

3 Systemaufbau

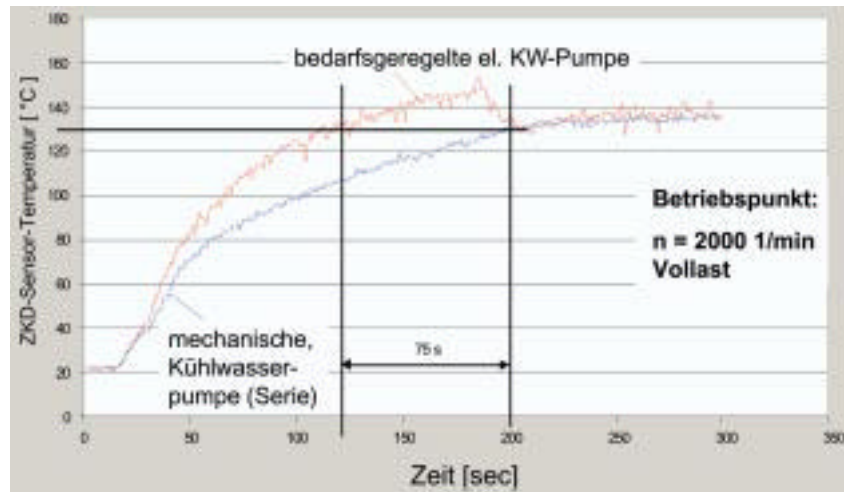


Bild 4: Verbessertes Aufheizverhalten durch die bedarfsgeregelte Kühlung im stationären Lastpunkt

Figure 4: Improvement in warm up behaviour by controlled cooling on demand

es sich um typische Einkaufsfahrten, die einen ganz anderen Belastungsfall für den Motor und den Kühlkreislauf des Motors darstellen als der NEUDC-Zyklus, **Bild 6**. Es ist sofort ersichtlich, dass alle Zyklen ganz unterschiedliche Belastungsfälle darstellen und nicht miteinander vergleichbar sind.

Insbesondere die Weildaueranteile für den Stadtfahrzyklus stellen sich ganz anders dar als der NEUDC: Der Motor wird in einem erheblich engerem Drehzahlband im Bereich vom Leerlauf bis 2000/min betrieben; die Betriebspunkte kumulieren vor allem in der Teillast im Bereich von 40 Nm.

4 Versuchsträger

Tabelle 1: Daten der Versuchsmotoren
Table 1: Data of the test engines

Versuchsträger 1	Versuchsträger 2
Ford 1,4-Zetec SE	Opel 1,8-Fam.1 Z18XE
57 KW bei 5500/min	92 KW bei 6000/min
109 Nm bei 2750/min	165 Nm bei 3600/min
Einspritzung MPFI	Einspritzung MPFI
Fahrzeug Ford Focus	Fahrzeug Opel Meriva
Fahrzeugmasse 1176 kg	Fahrzeugmasse 1375 kg

5 Testergebnisse im europäischen Fahrzyklus (NEUDC)

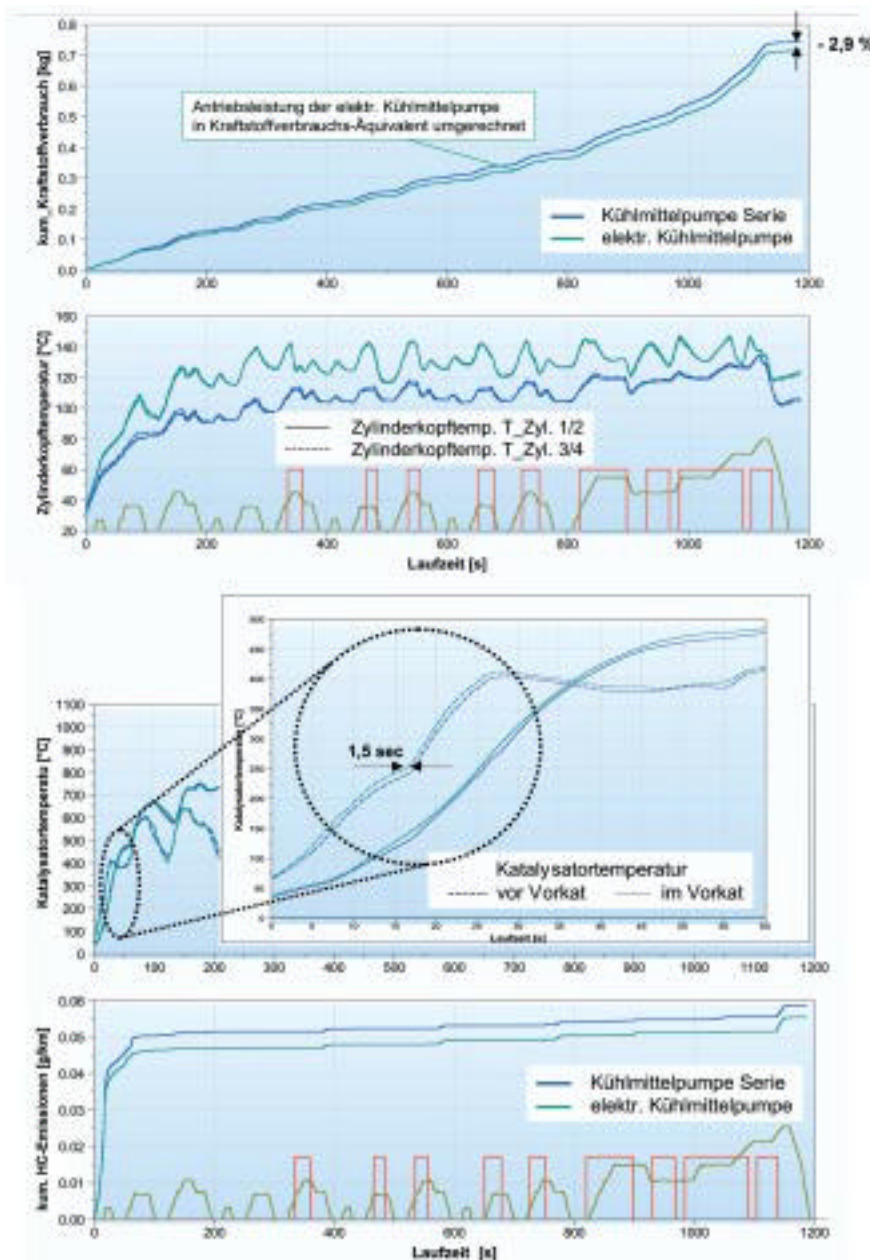


Bild 5: Betriebsverhalten eines Motors im NEUDC-Test – Standardmotor und Motor mit bedarfsabhängiger Kühlung im Vergleich
Figure 5: Behaviour of the engine in the NEUDC – comparison of the conventional engine and the engine with “cooling on demand”

Hinzu kommt das im **Bild 7** dargestellte unterschiedliche Motorverhalten bei Kaltstart oder bei einem Start nach einer Stunde Abkühlpause. Die zugehörigen Verweildauerpunkte, aufgetragen über der Kühlmitteltemperatur und der Motordrehzahl, zeigen, dass der Motor nach einer Stunde Abkühlpause auf einem Temperaturniveau von 60 bis 65 °C startet. Derartige Abkühlpausen sieht der gesetzliche NEUDC-Zyklus nicht vor. Die im Fahrzeug aufgezeichneten Geschwindigkeits-, Drehzahl- und Drehmomentverläufe waren die Grundlage für alle weiteren Versuche auf dem dynamischen Prüfstand, die mit dem 1,8-l-Motor von Opel durchgeführt wurden. Es fanden wiederum Vergleiche zwischen dem konventionellen und dem Motor mit bedarfsabhängig geregelten Kühlkreislauf statt.

7 Kaltgestarteter Motor und Motorstart nach Zwischenabkühlung im Vergleich

Das Verhalten des Motors mit bedarfsabhängiger Kühlung war wiederum geprägt von großen Zeitanteilen, in denen der Kühlkreislauf ohne Zirkulation betrieben werden konnte. Im ersten Zyklusteil nach Motorkaltstart war ein Kraftstoffverbrauchsvorteil von mehr als 4 % zu verzeichnen, **Bild 8**. In allen weiteren Teilen des Stadtfahrzyklus, denen ein Motorstart bei etwa 60 °C Kühlmitteltemperatur zugrunde lag, stellten sich Vorteile von im Mittel 3,8 % ein, **Bild 9**.

Die Charakteristiken für den ersten Teil des Stadtfahrzyklus machen deutlich, dass der Motor seine Vorteile nicht nur aus seiner schnellen Aufheizung gewinnt. Insbesondere die Tatsache, dass im ersten Stadtzyklus Pumpen-Einschaltdauerzeiten realisiert werden konnten, die deutlich unter 10 % der Zykluszeit liegen, zeigt die Bedeutung der Kühlkreisabschaltung. Konzepte, die den Kühlmittelkreis nicht abschalten sondern nur bedarfsabhängig drosseln können, nutzen die Vorteile nicht voll aus.

Die Verbrauchseinsparungen des Überland-Fahrzyklus lagen mit 3,1 % in ähnlichen Größenordnungen wie die des NEUDC-Tests, **Bild 10**. Allen kumulierten Verbrauchskurven liegt im Übrigen eine rechnerische Kompensation zugrunde, die den Generatorwirkungsgrad und den Batteriespeicherwirkungsgrad mit berücksichtigt. Die elektrische Kühlmittelpumpe wurde über den Batteriekreis des dynamischen Prüfstands gespeist. Es sei darauf hingewiesen, dass alle Funktionen der Motorelektronik noch von dem konventionellen Kühlwasser-Temperaturgeber gesteuert wurden (Zündwinkel, Anzeichnung). Eine speziell über den integrierten ZKD-Sensor geführte Kaltstarteinspritzmengen-Anreicherungsungsfunktion ließe noch weitere Vorteile erwarten.

6 Ergebnisse im simulierten Stadtfahrt- und Überlandbetrieb

Tabelle 2: Fahrzyklus mit Opel Meriva
Table 2: Driving cycles with Opel Meriva

Stadtfahrt:	■ Motorkaltstart	6 x Wiederholung vom Stadtfahrbetrieb und Pausenzeit
	■ 15 min. Stadtfahrbetrieb	
	■ 60 min. Pause	
	■ 15 min. Stadtfahrbetrieb	
	■ 60 min. Pause	
■ :		
Überlandfahrt:	■ Motorkaltstart	6 x Wiederholung vom Stadtfahrbetrieb und Pausenzeit
	■ 30 min. Überlandfahrt	
	■ 60 min. Pause	
	■ 30 min. Überlandfahrt	

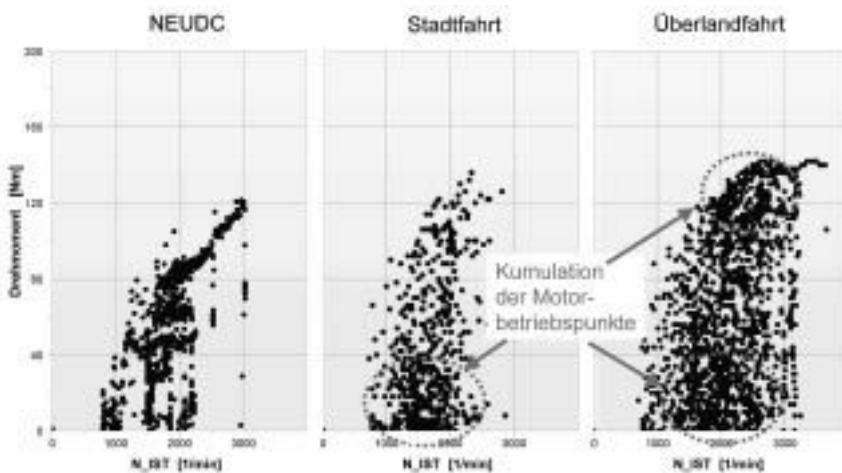


Bild 6: Verweildauerkenfelder für unterschiedliche Fahrzyklen
Figure 6: Map of engine speed/load-points which were measured in the cycle second by second

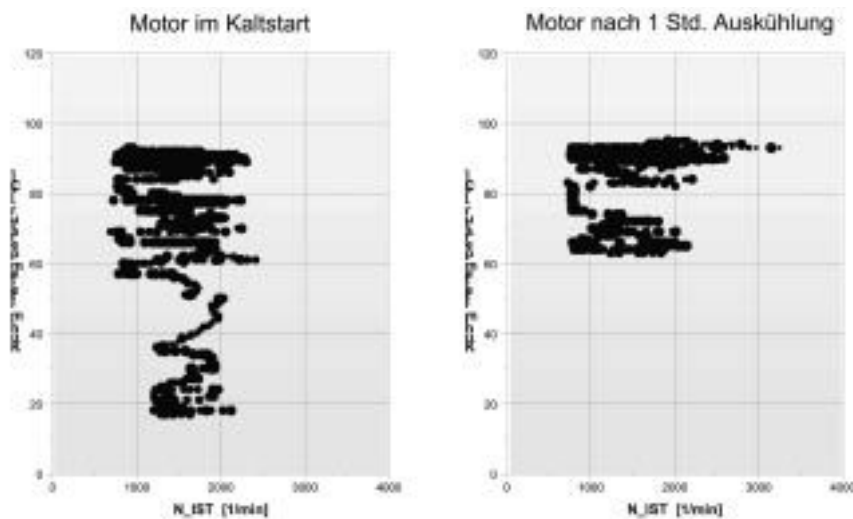


Bild 7: Verweildauerkenfeld in Abhängigkeit von der Motortemperatur für den Stadtfahrzyklus
Figure 7: Map of engine temperature/speed-points which were measured in the cycle second by second

8 Zusammenfassung

Mit dem Konzept der in die Zylinderkopf-dichtung integrierten Temperatursensoren besteht die Möglichkeit, den Motor mit bedarfsgeregeltem Kühlkreislauf so zu führen, dass auch ein völliger Stillstand der Zirkulation am laufenden Motor realisiert werden kann, ohne die Gefahr einer Motorüberhitzung in Kauf nehmen zu müssen.

Erst dadurch werden nennenswerte Kraftstoffverbrauchsvorteile realisierbar, die im NEUDC zu 2,9 % quantifiziert werden konnten. Im realen Fahrbetrieb stellte sich der Überlandzyklus mit einer Kraftstoffverbrauchs-Einsparungspotenzial von 3,1 % ähnlich dar. Durch die Tatsache, dass der Motor im Stadtfahrbetrieb in der tiefen Teillast betrieben wird und die Verbrennung einen nur geringen Wärmeeintrag in den Kühlkreis hat, kann mit dem vorgestellten Konzept eine Abschaltzeit der elektrischen Pumpe von über 90 % der Zykluszeit erreicht werden. Daraus resultieren Vorteile im Kraftstoffverbrauch von über 4 %.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass das Potenzial zur Kraftstoffverbrauchs-einsparung bei kaltem Motor im Winterstart bei um die 0 °C noch erheblich höher ist. Auch hier wird sicherlich noch zusätzlicher Nutzen auf der Emissionsseite durch ein schnelleres Ansprechen des Katalysators zu erreichen sein. Entsprechende Versuche stehen noch aus. Am Beispiel der Entwicklung der bedarfsabhängig geführten Motorkühlung konnte gezeigt werden, dass der dynamische Motorprüfstand nicht nur für die Emissionierung und die Motorkalibrierung herangezogen werden kann. Bei der Entwicklung von Regelgruppen, die in irgendeiner Weise eine Einwirkung auf den motorischen Prozess haben, kann er gleichermaßen mit großem Vorteil eingesetzt werden.

Insbesondere wenn der Übertrag vom stationären auf den realen Motorbetrieb beziehungsweise von einem „synthetischen“ Testzyklus auf einen realen Straßenfahrbetrieb herausgearbeitet werden soll, ist der dynamische Prüfstand unersetzlich. Im vorliegenden Projekt hat sich gezeigt, dass das System zur bedarfsgerechten Motorkühlung im gesetzlichen NEUDC-Zyklus zu schlecht beurteilt wird und in der Realität auf der Straße größere Potenziale zur Kraftstoffverbesserung nachgewiesen werden können. ■

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



MTZ Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65773 Wiesbaden
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423
email: vieweg.service@gvw-fachverlage.de

7 Kaltgestarteter Motor und Motorstart nach Zwischenabkühlung im Vergleich

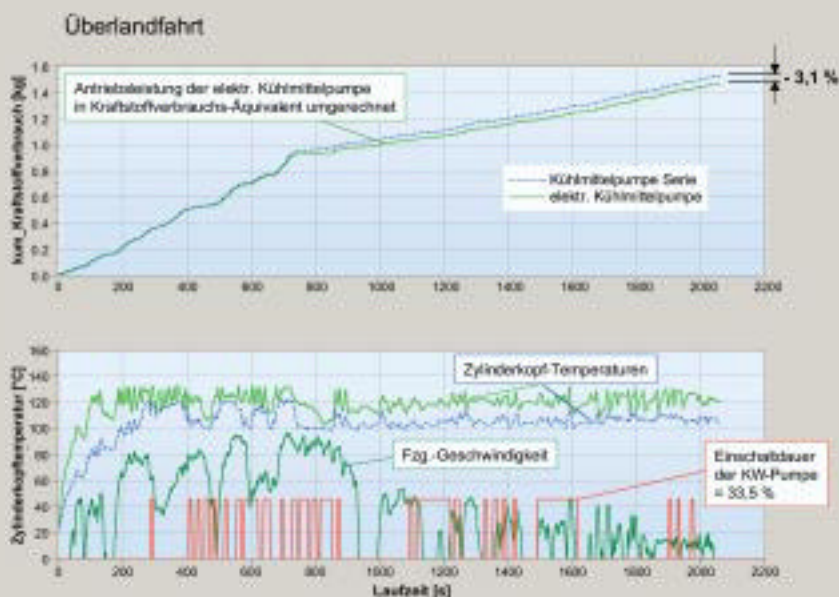
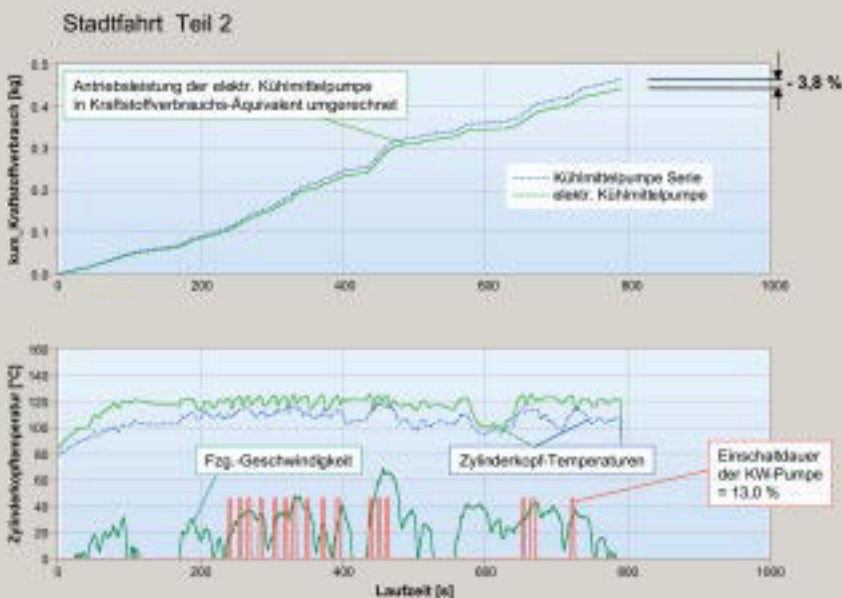
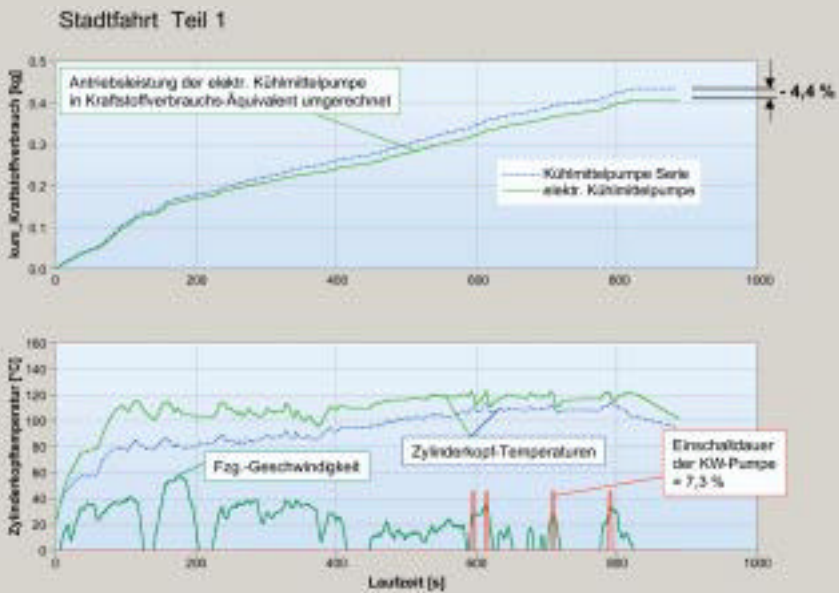


Bild 8: Aufheiz- und Verbrauchsverhalten des Motors im 1. Teil des Stadtfahrzyklus (mit Motorkaltstart 20 °C) – Serienmotor und Motor mit bedarfsabhängiger Kühlung im Vergleich
Figure 8: Warming up and fuel consumption behaviour of the engine in the first part of the city cycle including engine start at 20 °C – comparison of the conventional engine and the engine cooling on demand

Bild 9: Aufheiz- und Verbrauchsverhalten des Motors im 2. Teil des Stadtfahrzyklus (mit Motorkaltstart 60 - 65 °C) – Serienmotor und Motor mit bedarfsabhängiger Kühlung im Vergleich
Figure 9: Warming up and fuel consumption behaviour of the engine in the second part of the city cycle including an engine start at 60 °C – comparison of the conventional engine and the engine with cooling on demand

Bild 10: Aufheiz- und Verbrauchsverhalten des Motors im Überland-Fahrzyklus – Serienmotor und Motor mit bedarfsabhängiger Kühlung im Vergleich
Figure 10: Warming up and fuel consumption behaviour of the engine in the overland cycle – comparison of the conventional engine and the engine with cooling on demand