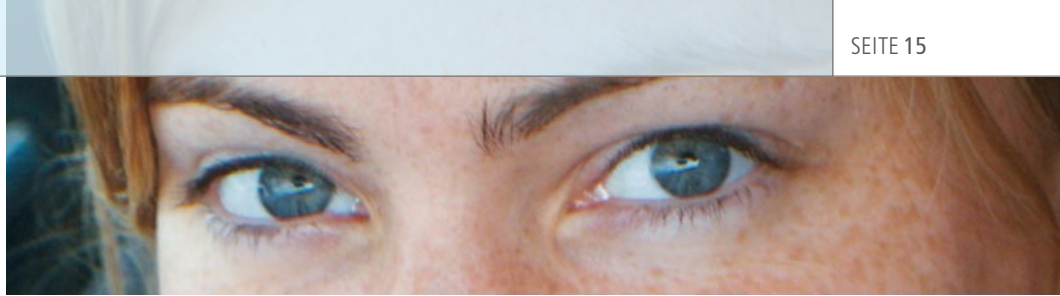




# Looking forward

Das vorausschauende Wärmemanagement zur Optimierung von Effizienz und Dynamik



### Mobilität im Umbruch

Die Mobilität, so wie wir sie heute kennen, ist im Umbruch. Gefährdet durch den weltweit wachsenden Energiebedarf, die Endlichkeit der fossilen Energiequellen, politische Krisen und die Unsicherheit bei den Energiepreisen erfährt sie mittelfristig einen Wandel. Die Gesetzgeber haben weltweit mit Regelungen zur Verbrauchslimitierung und zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen reagiert. Mehr als 90 % des weltweiten Absatzmarktes unterliegen bereits Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Reglementierungen. Die Gesetze sind zwar noch nicht in allen Details beschrieben und verabschiedet, aber die grobe Richtung ist klar. Von den Automobilherstellern sind in den nächsten 10 Jahren weitere Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Reduzierungen von 25 bis 30 % zu leisten. Wer dies nicht schafft, muss drastische Strafzahlungen leisten oder kann seine Produkte nicht mehr zulassen.

### Neue Ansätze für Verbrennungsmotoren

Allein durch klassische Entwicklungsarbeit an den Motoren sind diese anspruchsvollen Reduzierungsziele nicht mehr zu erreichen. Deshalb hat die BMW Group bereits Anfang 2000 begonnen, systematisch alle physikalischen Stellhebel zu analysieren und in ihrer Wirkung zu bewerten. Der Verbrennungsmotor als Hauptenergiewandler im Fahrzeug wird dabei weiterhin die dominante Rolle spielen und deshalb auch intensiv weiterentwickelt. Dabei ist es auch entscheidend, gerade im Kunden-

betrieb den Verbrauch der Fahrzeuge weiter zu senken, ohne auf die Dynamik im Premiumsegment verzichten zu müssen.

Ein vielversprechender Ansatz im Rahmen der BMW EfficientDynamics Strategie ist die Integration vorausschauender Informationen über den vorausliegenden Streckenverlauf mit Geschwindigkeits- und Kurvenverläufen sowie Steigungen bzw. Gefälle etc. in das Wärmemanagement eines konventionellen Verbrennungsmotors. Die Vorteile eines solchen vorausschauenden Wärmemanagements zeigt ein Prototyp der BMW Group.

### Modernes Fahrzeugwärmemanagement

Moderne Kühlsystemregelungen verfügen über ein bedarfsgerechtes Wärmemanagement zur Vereinigung von Effizienz, Dynamik und Komfort bei gleichzeitiger Gewährleistung der thermischen Betriebssicherheit. Die Elektrifizierung der Stellglieder im Kühlkreislauf (Abbildung 1) in Verbindung mit gesamtfahrzeugübergreifenden Regelstrategien – zur Umsetzung der gestiegenen Freiheitsgrade in der Ansteuerung – ermöglichen heute bereits Funktionalitäten weit über die ursprüngliche Kühlfunktion hinaus: Kernfunktion des BMW-Wärmemanagements ist die Wahl von Betriebsmodi innerhalb der Motorsteuerungsfunktionen. Nach einem Kaltstart etwa wird ein Warmlauf-Modus aktiviert, mit dem Ziel, den Motor schnell in einen effizienten Betriebsbereich zu bringen. Auf Grund der

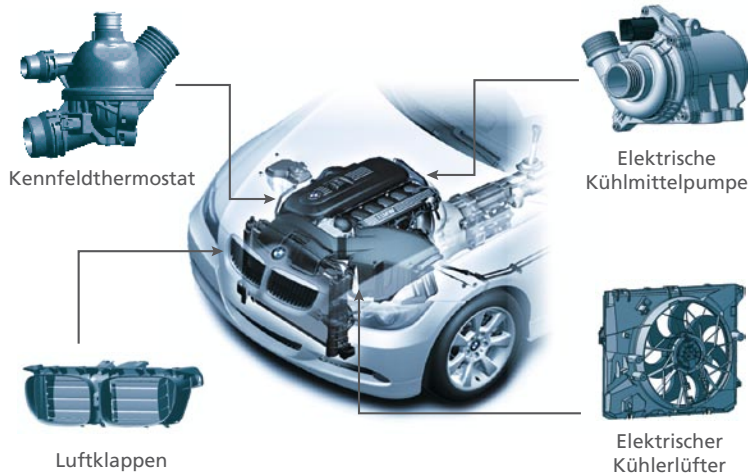


Abbildung 1: Elektrifizierte Stellglieder des Kühlsystems (Quelle: BMW, Internationales Technisches Training).

erforderlich und der damit verbundene Energieaufwand verschwendet. Grund dafür ist, dass primär die aktuelle Fahrsituation in die Regelung einfließt und die thermische Betriebssicherheit stets oberste Priorität in der Regelstrategie hat.

**Grenzen des situativen Ansatzes**

Die BMW Group wertete Versuchsfahrten mit Fokus auf das Kühl-systemverhalten aus und identifizierte typische Anwendungsfälle, wie Beschleunigungen aus dem Stand in Kreuzungs- oder bei Abbiegesituationen bzw. kurze Zwischenbeschleunigungen auf Landstraßen für eine vorausschauende Regelung. Diese können bereits bei leicht dynamischer Fahrweise ein Verlassen des ECO-Betriebs innerhalb des konventionellen Wärmemanagements

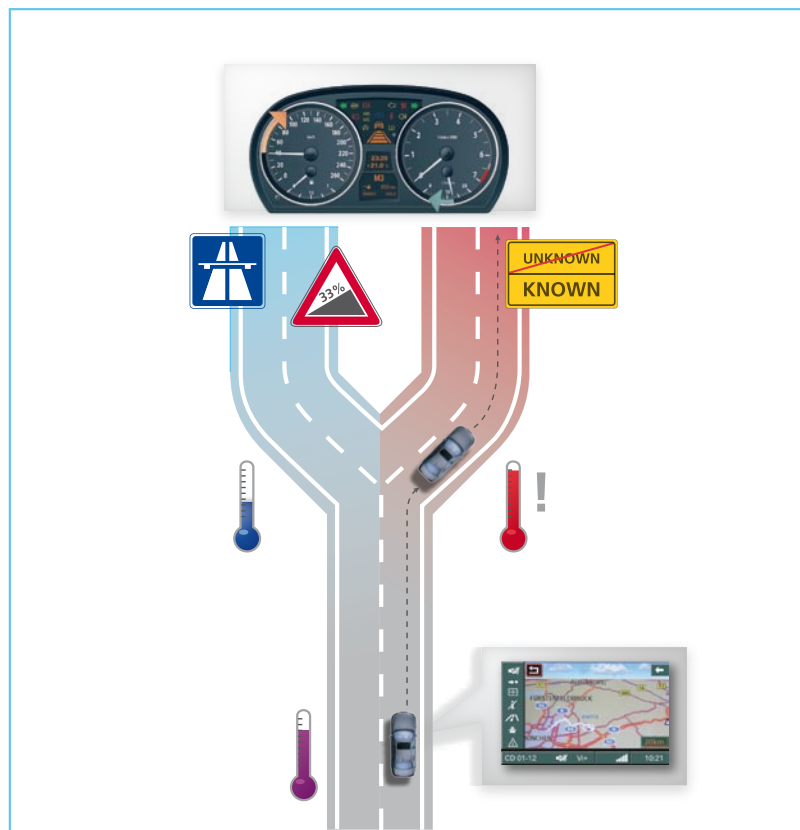
elektrischen, von der Motordrehzahl entkoppelten, Kühlmittelpumpe kann in diesem Modus ein stehendes Kühlmittel realisiert werden, was den Wärmeübergang von den Brennraumwänden an das Kühlmittel verringert und somit den Motor schneller aufwärmt.

**Fahrsituative Regelstrategien**

Nach abgeschlossener Warmlaufphase berechnet die Motorsteuerung eine auf die Fahrsituation bezogene Kühlleistungsanforderung. Dabei versucht die konventionelle Regelstrategie zwei gegenläufige Ziele zu vereinbaren. Zum einen soll durch eine möglichst hohe Motor- und Kühlmitteltemperatur die Reibleistung reduziert werden und zum anderen die Grenzen für die thermische Betriebssicherheit eingehalten werden. Fest applizierte Schwellwerte sowie Kennlinien und Kennfelder für Fluidtemperaturen und Motorlastpunkt beeinflussen die Wahl dieser Betriebsarten, die den gesamten Leistungsbereich des Motors abdecken. Die Einteilung dieser übergeordneten Kühlleistungsstufen erstreckt sich dabei vom verbrauchsorientierten Betrieb (ECO-Betrieb) mit deutlich reduzierter Kühlleistung und höheren Kühlmitteltemperaturen bis zum hochdynamischen Betrieb, der die maximale Kühlleistung bei stark abgesenkten Kühlmitteltemperaturen unter hohen Motorlasten bereitstellt. Die heutige in Serie befindliche Betriebsstrategie kann jedoch situativ zu unnötigen und unerwünschten Anpassungen der abgerufenen Kühlleistung führen. Dies wird insbe-

sondere bei kurzen Beschleunigungsphasen, z. B. im Kreuzungsbereich innerhalb geschlossener Ortschaften, deutlich, da die Regelstrategie in diesem Fall präventiv die Kühlmitteltemperatur absenkt, um die durch die Beschleunigung zusätzlich eingebrachte Wärmemenge abführen zu können. Im Fall kurzer Beschleunigungsphasen ist die Absenkung der Kühlmitteltemperatur jedoch nicht

Abbildung 2: Idee und Ansatz des vorausschauenden Wärmemanagements: Abhängig von der wahrscheinlichsten Route werden Motor und Kühlsystem gezielt vorkonditioniert; hier beispielsweise die Steigungsstrecke auf der Autobahn mit geringerer, die Stadtfahrt mit höherer Temperatur.



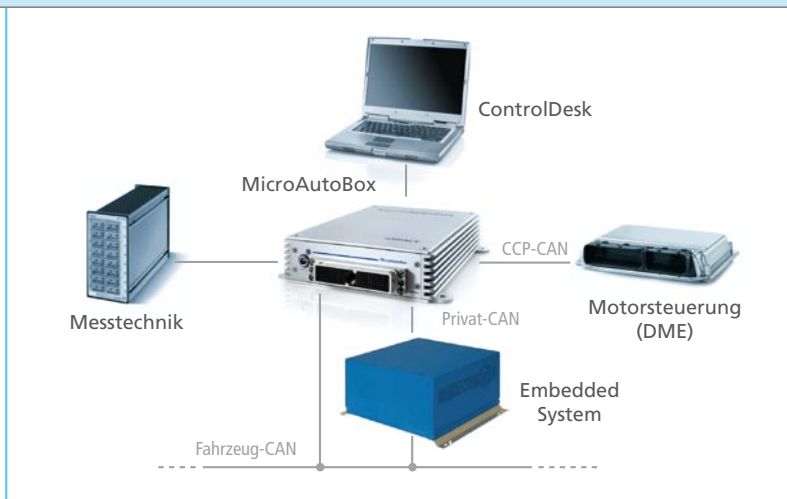


Abbildung 3: Hardware- und Kommunikationsstruktur im Versuchsträger.

bewirken. Hintergrund ist, wie eingangs dargestellt, die Regelung auf die aktuelle Fahrsituation. Daraus resultiert eine – wenn auch nur kurzzeitige – Steigerung der Kühlleistung in Verbindung mit einer abgesenkten Sollvorgabe für die Kühlmitteltemperatur, die zur optimalen Leistungsentfaltung des Motors beitragen soll.

### Vorausschauende Betriebsstrategien

Die Aufbereitung und Auswertung des vorausliegenden Streckenverlaufs, der sogenannte elektronische Horizont, wird herangezogen, um situationsabhängig die systemimmanenten Trägheiten des Kühlkreislaufs konsequenter auszunutzen bzw. um diese zu umgehen und Motor sowie Kühlsystem gezielt vorkonditionieren zu können. Eine Fahrertyp-Einordnung zwischen ruhig und sportlich ergänzt dabei die weitere Differenzierung der Fahrsituation (Abbildung 2). Durch eine Klassifizierung der bevorstehenden Beschleunigung hinsichtlich Dauer und wahrscheinlicher Endgeschwindigkeit auf Basis der Vorausschauinformationen kann die benötigte Kühlleistung besser abgeschätzt und eingeregelt werden. Die Beibehaltung des ECO-Betriebs führt in dem Fall zur gewünschten Verbrauchsreduzierung. Ohne, dass die Grenzen des Kühlsystems durch die kurze Dauer des Beschleunigungsvorgangs überschritten werden, können eine höhere Last der Stellglieder (wie z. B. der elektrischen Kühlmittelpumpe) vermieden und

das angehobene Temperaturniveau aufrecht erhalten werden.

### Mehr Dynamik durch prädiktive Anpassungen

Das vorausschauende Wärmemanagement ermöglicht zudem die prädiktive Anpassung der Kühlleistung sowie der Motortemperatur und damit eine Vorkonditionierung des Motors auf bevorstehende höhere Leistungsabfragen und damit steigende Kühlleistungsanforderungen. Die Ausprägung des prädiktiven Eingriffs kann abhängig von Fahrertyp und Art des Übergangs unterschiedlich stark gewählt werden. Eine vorausschauende Konditionierung durch das Wärmemanagement – mit daraus resultierender positiver Beeinflussung z. B. des Klopfverhaltens sowie der Zylinderfüllung des Motors – kann die Dynamik des Fahrzeugs, beispielsweise bei sportlicher Auf-fahrt auf eine Autobahn, deutlich verbessern.

### Aufbau eines Versuchsträgers

Für die zuvor beschriebenen Anwendungsfälle wurde im Bereich Vorentwicklung Wärmemanagement der BMW Group auf Basis eines serienmäßigen BMW 335i ein Prototyp realisiert, um die Machbarkeit des Konzeptes zu bestätigen. Den Vorausschauhorizont im Versuchsfahrzeug stellt eine Entwicklung der BMW Forschung und Technik GmbH zur Verfügung. Das Projekt „Intelligente Lernende Navigation“ (iLeNa) bietet dabei erweiterte Funk-

## Glossar

**ADASIS** – Advanced Driver Assistance Systems Interface Specification, ADASIS-Forum im Internet: [www.ertico.com/en/activities/safemobility/adasis\\_forum.htm](http://www.ertico.com/en/activities/safemobility/adasis_forum.htm)

**ADAS RP** – Advanced Driver Assistance Systems Research Platform. Entwicklungsplattform für kartenbasierte Fahrerassistenzsysteme der Firma NAVTEQ.

**BMW EfficientDynamics** – Mit diesem innovativen Maßnahmenpaket gelingt der BMW Group, was bislang als Zielkonflikt galt: die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung von Fahrdynamik und Motorleistung. Oder: Aus jedem Tropfen Kraftstoff das Maximum an Fahrspaß herausholen.

**GPS** – Das Global Positioning System ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung und Zeitmessung.

**Karteneinpassung** – Mapmatching; Abgleich einer Ortung mit den Ortsinformationen einer digitalen Karte.

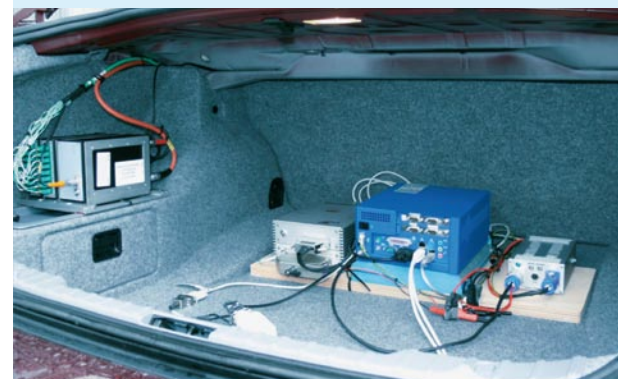


Abbildung 4: Hardwareaufbau im Versuchsträger: Messtechnik, MicroAutoBox, Embedded System, Spannungsversorgung (v.l.n.r.).

tionalitäten im Vergleich zu aktuellen, werksseitigen Navigationslösungen. Diese sind z. B. die lernende Wissensdatenbank, die neben den bekannten gesetzlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen aus der digitalen Karte, etwa individuelle Geschwindigkeitsprofile speichern kann. Ein Ziele- und Routenschätzer berechnet auf Grundlage von historischem Wissen den wahrscheinlichsten Routenverlauf (auch „Most Probable Path“ genannt) auch ohne durch den Fahrer aktivierte Zielführung. Zur Positionsbestimmung und Karteneinpassung greift iLeNa



über den Fahrzeugbus auf die fahrzeugeigene GPS-Antenne zurück. Ein automotive-taugliches Embedded System mit Microsoft Windows-Betriebssystem (Abbildung 3) bildet die Hardwareumgebung der Navigationsplattform, die auf der NAVTEQ-Entwicklungsumgebung für kartenbasierte Fahrerassistenzsysteme (ADAS RP) basiert.

**Reglerstruktur und Funktionslogik**

Zwischen dem BMW-Wärmemanagement, partitioniert auf der Motorsteuerung (DME), und der MicroAutoBox wurde eine CAN-Schnittstelle mit CCP (CAN Calibration Protocol) aufgesetzt. Reglerstruktur und Funktionslogik des vorausschauenden Wärmemanagements wurden mittels MATLAB®/Simulink®/Stateflow® von The MathWorks® umgesetzt und auf einer dSPACE MicroAutoBox im Fahrzeug implementiert (Abbildung 4). Existierende Messtechnik, zum Beispiel zur Temperatur- und Spannungserfassung, konnte problemlos durch Einlesen der zugehörigen DBC-Konfigurationsdatei mittels dSPACE RTI CAN Blockset im Simulink-Modell integriert und mit der MicroAutoBox gekoppelt werden.

**Funktionsblöcke des vorausschauenden Wärmemanagements**

Das vorausschauende Wärmemanagement umfasst dabei mehrere logische Funktionsblöcke (Abbildung 5). Der Rekonstruktor stellt die Schnittstelle zu iLeNa dar und bereitet die über CAN-Bus versandten Datenpakete auf. Das dafür verwendete Kommunikationsprotokoll ist ein an BMW-spezifische Anforderungen angepasstes ADASIS-Protokoll. Auf Grund des zyklischen Versands des

sichtlich der bereits beschriebenen Situationen gefiltert und mit Entfernungsinformationen an die eigentliche vorausschauende Funktionslogik übergeben. Diese wertet den Situationshorizont bezogen auf die momentane Position aus und berechnet Regeleingriffe seitens des Wärmemanagements bezüglich Ausprägung und Zeitpunkt. Unter Berücksichtigung der Validität der Vorausschau und zusätzlicher aktueller Fahrzeugparameter erfolgt abschließend eine Priorisierung der Funk-

„Mit vorausschauenden Betriebsstrategien können wir Motor sowie Kühlsystem gezielt vorkonditionieren, um Dynamik und Effizienz zu steigern.“

*Mathias Braun, BMW Group*

elektronischen Horizonts zur Entlastung des Fahrzeugbusses kommt ein Speicherblock zum Einsatz, der als Zwischenspeicher und Schnittstelle für die wärmemanagementspezifische Situationsauswertung fungiert. Die Profile für den Straßentyp (aus der digitalen Karte) und die erwartete Geschwindigkeit (aus der iLeNa-Wissensdatenbank) werden hin-

tionseingriffe oder ein Überblenden zum Serienstand. Die ausgewerteten Informationen über die aktuelle und die kommenden Umgebungssituationen werden zusammen mit der konventionellen und vorausschauenden Wärmemanagement-Betriebsstrategie sowie den Verbrauchseffekten im Fahrzeug mit dSPACE ControlDesk dargestellt.

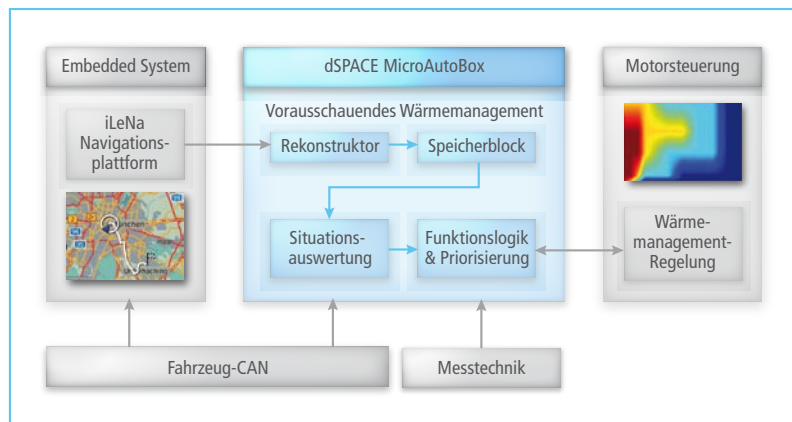


Abbildung 5: Software- und Regelungsstruktur des vorausschauenden Wärmemanagements.

**Ergebnisse der Verbrauchsreduzierung**

Die Vernetzung des Wärmemanagements mit der Fahrzeugnavigation ermöglicht die intelligente, gleichzeitige Weiterentwicklung von Effizienz und Dynamik eines Fahrzeugs. Bei typischen Kundenfahrten in der Stadt kann ein gleichmäßigerer Kühlmitteltemperaturverlauf sowie ein angenehmes Temperaturniveau realisiert werden. Zusammen mit der Entlastung des Bordnetzes, durch Ausblendung von vermeidbaren Sprüngen in der abgerufenen Kühlleistung, wird

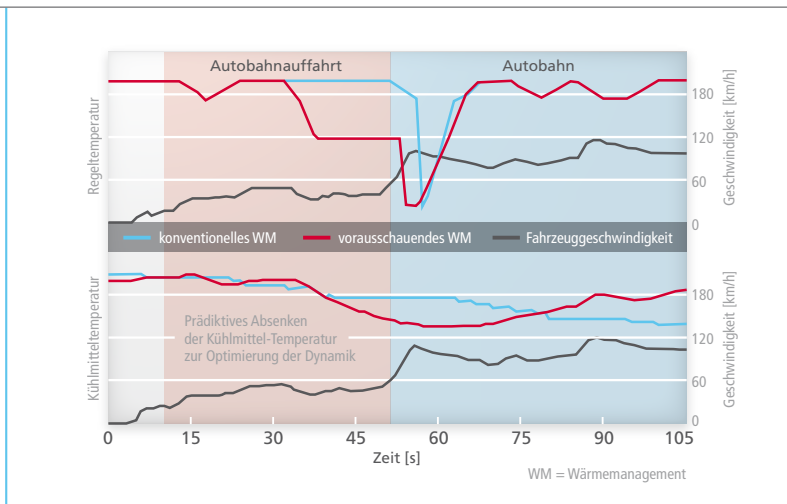


Abbildung 6: Vergleich der Regelung von konventionellem und vorausschauendem Wärmemanagement.

eine Verbrauchsreduzierung im Bereich von bis zu 1 % durch reine Anpassung der Betriebsstrategie erreicht, d. h. ohne den Einsatz zusätzlicher Bauteile. Dies ist ein zusätzlicher wichtiger Baustein neben einer Vielzahl weiterer Maßnahmen im Gesamtpaket von BMW EfficientDynamics.

### Erzielte Steigerung der Dynamik

Bei dem zweiten aufgezeigten Anwendungsfall ermöglicht das vorausschauende Wärmemanagement eine Anhebung des Motortemperaturniveaus bei niedriger Last, ohne das Risiko von Grenztemperaturüberschreitungen – etwa im Kühlmittel – bei dem Übergang zu höheren Lastpunkten zu erhöhen. Durch die Vorkonditionierung des Motors mittels einer prädiktiven Absenkung des Temperaturniveaus (Abbildung 6) kann zudem eine Steigerung der Dynamik dargestellt werden. Diese

Effekte sind v.a. bei Saugmotoren und typischen Zwischenbeschleunigungen (z. B. Elastizität bei 60 - 120 km/h) in der Beschleunigungszeit messbar und liegen im Bereich von bis zu 3 - 5 % beim nicht aufgeladenen BMW 6-Zylinder-Reihenmotor. Bei Turbomotoren zeigen sich die positiven Dynamikeffekte weniger deutlich, da hier die Zylinderfüllung durch die Aufladung dominiert wird. Speziell bei Volllast jedoch kann die vorausschauende Temperaturabsenkung eine weitere Steigerung der Effizienz von Turbomotoren bewirken, da unter diesen Bedingungen ein günstigerer Zündwinkel zur Optimierung des Brennverlaufs bei Ottomotoren gewählt werden kann. ■

*Mathias Braun,  
Dr. Matthias Linde,  
Dr. Andreas Eder,  
BMW Group  
Dr. (RUS) Evgeny Kozlov,  
ALTRAN Technologies*

*Dipl.-Phys.  
Mathias Braun,  
BMW Group  
Wärmemanagement,  
Doktorand „Vorausschauendes Wärmemanagement“.*

*Dr. rer.nat.  
Matthias Linde,  
BMW Group  
Wärmemanagement,  
Projektleiter „Vorausschauendes Wärmemanagement“.*

*Dr.-Ing.  
Andreas Eder,  
BMW Group  
Wärmemanagement,  
Leiter Vorentwicklung  
und Simulation.*

*Dr. (RUS)  
Evgeny Kozlov,  
ALTRAN Technologies  
Managing Consultant  
Rapid Control Prototyping.*



## Zusammenfassung und Ausblick:

Durch Erweiterung um eine vorausschauende Komponente wurde die intelligente Weiterentwicklung des Wärmemanagements beim konventionellen Antriebsstrang aufgezeigt. Auf Basis eines 3er BMW wurden erste Regelstrategien in einem Prototyp implementiert und der Funktions- und Potentialnachweis erbracht. Die Nutzung vorhandener Informationen im Fahrzeug durch die Vernetzung der unterschiedlichen Steuergeräte führt zur Steigerung von Effizienz und Dynamik, wie am Beispiel des vorausschauenden Wärmemanagements aufgezeigt wurde.

Fahrerassistenzsysteme, wie die Aktive Geschwindigkeitsregelung „Adaptive Cruise Control“ oder die Verkehrsschilderkennung „Speed-Limit-Anzeige“, profitieren bereits seit einiger Zeit von der Vernetzung mit der Navigationsdomäne. Fortschritte seitens der Navigationssysteme im Hinblick auf Informationsgehalt und Informationsgüte der digitalen Karte sowie im Bereich der Routenberechnung durch Verfügbarkeit auch ohne aktive Zielführung eröffnen erweiterte, vorausschauende Funktionen für eine optimale Steuerung der Energie- und Wärmeströme im Fahrzeug. Neben dem vorausschauenden Wärmemanagement eröffnen sich beispielsweise auch Möglichkeiten zu einer exakteren Reichweitenberechnung für reine Elektrofahrzeuge und sind damit eine ideale Ergänzung zur erfolgreich umgesetzten BMW EfficientDynamics Strategie der BMW Group.