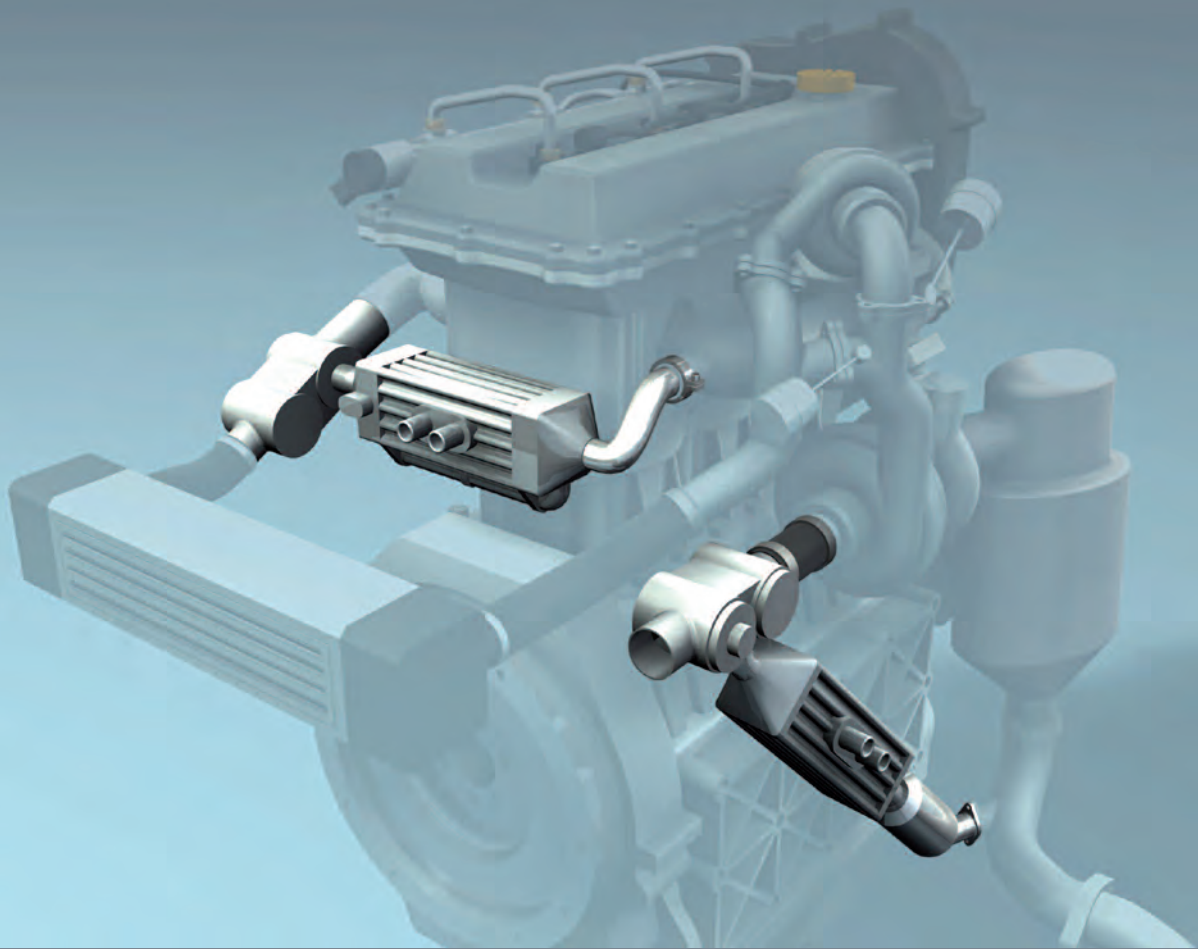


Dieselmotor-Entwicklung in der IAV

Brennverfahren





AGR-Systeme bei Dieselmotoren

Die Kraftstoffqualität ist entscheidend

Vor allem in den Emerging Markets wird noch schwefelhaltiger Diesel verkauft. Das kann bei den Sensoren und Aktuatoren des AGR-Systems zu Korrosion führen.

Dieselmotoren werden immer sauberer. So ist beispielsweise das Problem der Partikelemissionen gelöst, seit der Dieselpartikelfilter (DPF) eingeführt wurde. Jetzt rückt der Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses. Hier gibt es zwei grundlegende Ansätze: Abgasnachbehandlung (etwa mit einem NO_x -Speicherkatalysator) oder innermotorische Maßnahmen wie Abgasrückführung (AGR).

Bei der Wahl eines AGR-Systems haben die Entwickler zwei Optionen: Klassische Hochdruck-AGR-Systeme entnehmen das Abgas vor der Abgasnachbehandlungsanlage, während die Niederdrucksysteme es erst danach abgreifen und eine deutliche Ausweitung des AGR-Kennfeldbereiches ermöglichen. Allerdings sind die Niederdruck-AGR-Systeme noch nicht flächendeckend im Serieneinsatz.

Für die Auslegung der Sensoren und Aktuatoren hat die Entscheidung für eine der beiden Alternativen große Auswirkungen: Je nachdem, wo das Abgas entnommen wird, sind die Komponenten aggressiven Substanzen in unterschiedlicher Menge und Zusammensetzung ausgesetzt. Verschärft wird das Problem zusätzlich dadurch, dass weltweit teilweise noch immer stark verschwefelter Dieselmotorkraftstoff verwendet wird. Als Ergebnis sind die Sensoren und Aktuatoren einer Kombination von saurem Kondenswasser und korrosiven Gasen ausgesetzt und müssen entsprechend ausgelegt werden.

Um möglichen Schäden frühzeitig vorzubeugen, müssen in einer frühen Phase der Produktentwicklung die schädlichen chemischen Bestandteile identifiziert und ihre Konzentrationen je nach AGR-Konzept ermittelt werden. Dazu wurde bei der IAV ein aktueller Dieselmotor mit Direkteinspritzung so modifiziert, dass Proben der flüssigen und der gasförmigen Phase des Abgases entnommen und analysiert werden konnten.

Die flüssige Phase wurde für beide AGR-Varianten mit einem Zyklon hinter dem AGR-Kühler entnommen. Die darin enthaltenen sauren Bestandteile konnten dann mithilfe der Ionenchromatografie (IC) bestimmt werden. Mithilfe eines externen AGR-Kühlkreislaufes konnte für das Hochdruck-System nach dem Kühler die gleiche Abgastemperatur wie im Niederdruckfall eingestellt werden, um auch hier Kondensat zu erhalten.

Die gasförmige Phase wurde für beide AGR-Varianten direkt hinter dem Motor entnommen. Um sowohl saure als auch organische Bestandteile analysieren zu können, wurde ein Teilstrom des Abgases durch einen luftdichten Behälter geleitet, der mit destilliertem Wasser gefüllt war. So gingen die sauren Substanzen in Lösung und konnten mit der IC bestimmt werden. Die organischen Bestandteile wurden in einer weiteren Apparatur in Alkohol gelöst und mithilfe der Gas-

chromatografie (GC) und der Massenspektrometrie (MS) analysiert.

Eine beispielhafte Ergebnisausgabe für beide Analyseverfahren ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Bei der Analyseverfahren der GC/MS zeigt das Massenspektrum signifikante Spitzen beziehungsweise Reihenfolgen von Spitzen, welche von der charakteristischen Massenzahl abhängig sind. Bei der Ionenchromatografie werden dagegen die verschiedenen detektierten Anionen über die Frequenz dargestellt.

Untersucht wurden zwei unterschiedliche stationäre Betriebspunkte: Bei geringer Last ist die Ladung stark verdünnt und die Verbrennung zeichnet sich durch einen hohen Vormischanteil aus. Bei hoher Last herrscht dagegen eher die klassische Diffusionsverbrennung.

Die Analyse der Abgase zeigte, dass die aggressiven Oxygenate nur einen geringen Anteil an den organischen Bestandteilen ausmachen und somit vernachlässigt werden können. Bei hoher Last dominieren die Anionen der Salpetrigen Säure und der Salpetersäure (Nitrite und Nitrate). Diese Säuren können den pH-Wert auf unter 2,0 verringern – in diesem Bereich steigen die Kosten für den Korrosionsschutz der Sensoren und Aktuatoren überproportional stark.

Allerdings wirken die Anionen nur in Verbindung mit Wasser säurebildend. Die anfallende Menge an Kondensat wurde dazu mithilfe einer Hochrechnung auf Basis des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) berechnet. Kondensat fällt nur an, wenn die Gastemperatur im Luft-, AGR- und Abgassystem die Taupunkttemperatur unterschreitet.

Basierend auf der Hochrechnung ergaben sich diese Kernaussagen:

- ▶ Die anfallende Kondensatmenge ist für das Niederdrucksystem von Bedeutung. Insbesondere im Luftsystem fällt über den gesamten Zyklus eine Menge von mehr als 300 ml an.
- ▶ Beim Hochdrucksystem fällt so wenig Kondensat an, dass es vernachlässigt werden kann.

Die Messung der flüssigen Phase ergab folgende Ergebnisse:

- ▶ Beim Niederdrucksystem war die Konzentration der Anionen vernachlässigbar gering.
- ▶ Beim Hochdrucksystem zeigte sich ein hohes Niveau von Anionen.

Kritisch wäre also ein Niedertemperatur-Hochdruck-AGR-System, weil hier die säurebildenden Anionen im anfallenden Kondensationswasser in Lösung gehen und die Sensoren und Aktuatoren angreifen könnten. Solche AGR-Systeme eignen sich wegen der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der geringen Kosten grundsätzlich gut für Emerging Markets, wo die Kraftstoffqualität jedoch oft schlecht ist.

Darum wurde in einem zweiten Schritt der Einfluss der Kraftstoffqualität auf die chemische Zusammensetzung der Abgase untersucht. Folgende Kraftstoffe wurden analysiert:

- ▶ Europäischer Standarddieselmotorkraftstoff
- ▶ Europäischer Standarddieselmotorkraftstoff mit zehn Prozent Bioanteil
- ▶ US-Referenzkraftstoff (Jahr 2005)

Während der erhöhte Bioanteil nur vernachlässigbare Veränderungen der chemischen Zusammensetzung bewirkte, führte der hohe Schwefelanteil im US-Dieselmotorkraftstoff zu einem sauren Milieu mit pH-Werten deutlich unter 2,0.

Als Resultat der Untersuchungen ergibt sich die in Tabelle 1 aufgeführte Risikobewertung für drei verschiedene Kraftstoffe und drei unterschiedliche AGR-Systeme.

Um Korrosion bei Sensoren und Aktuatoren zu vermeiden, spielen für künftige Dieselmotoren die AGR-Kühlung und die Qualität des Kraftstoffes eine entscheidende Rolle. Besonders kritisch ist demnach ein Niedertemperatur-Hochdruck-AGR-System bei schlechter Kraftstoffqualität, wie sie zum Beispiel auf den Emerging Markets zu finden ist.

Kraftstoff \ System	Hochdruck-AGR	Niedertemperatur-Hochdruck-AGR	Niederdruck-AGR
Europäischer Standard	unproblematisch	problematisch	unproblematisch
Europäischer Standard + 10 % Bioanteil	unproblematisch	problematisch	unproblematisch
US-Referenz (Jahr 2005)	unproblematisch	sehr problematisch	nicht möglich

Tabelle 1: Risikoabschätzung verschiedener Kombinationen aus Kraftstoff- und AGR-System

Folgende Maßnahmen könnten saures Kondensat vermeiden:

- ▶ Katalytische Komponenten im AGR-System könnten die aggressiven Substanzen in harmlose Verbindungen umwandeln.
- ▶ Ein verbessertes Thermomanagement für das AGR-System könnte verhindern, dass der Taupunkt unterschritten wird.

Die Untersuchung zeigt, dass die Anforderungen an Systemkomponenten wie Sensoren und Aktuatoren bereits in der Designphase berücksichtigt werden müssen, um unnötige Nachbesserungen und Kosten zu vermeiden.

Der gesamte Text ist nachzulesen bei:

4. Emission Control, 29./30. Mai 2008, Dresden

Acid and Corrosion - Robustness of Components in the EGR and Exhaust Loop Depending on EGR Concept and Fuel Quality

T. Kadohiro, Hitachi Automotive Systems Europe GmbH

Dr. M. Amano, Hitachi Europe GmbH

M. Gustke, M. Pannwitz, IAV GmbH

Dr. M. Bartoszek, Dr. A. Martin, Catalysis Leibniz-Institut für Katalyse e. V.

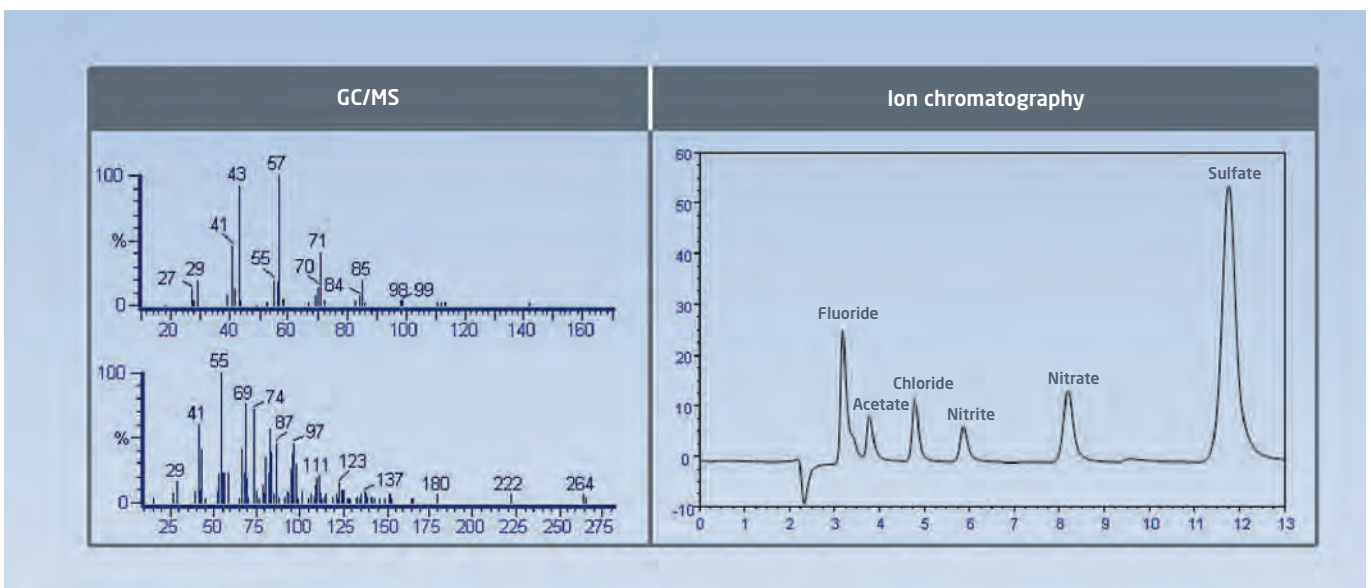


Abbildung 1: Schematische Ergebnisausgabe der GC/MS und IC



Turbolader mit Kugellagern

Mehr Effizienz für aufgeladene Motoren

Heute sind Abgasturbolader hauptsächlich mit Gleitlagern ausgestattet. Das ist nicht optimal: Kugellager verringern die Reibung um bis zu 50 Prozent und tragen so dazu bei, dass Brennstoffverbrauch und Schadstoffemission deutlich reduziert werden können.

Abgasturbolader (ATL) gehören zur Familie der Strömungsmaschinen und basieren auf einer ähnlichen Technologie, wie sie in Flugzeugtriebwerken oder APUs (Auxiliary Power Unit) zu finden ist. Bei der Aufladung von Otto- und Dieselmotoren haben Strömungsmaschinen gegenüber Verdrängermaschinen zwei wesentliche Vorteile: die erheblich höhere Leistungsdichte und die Nutzung der Abgasenergie zum Antrieb des Verdichters. Kompakte Abgasturbolader steigern so die Motorleistung bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad.

Abgasturbolader erreichen ihren hohen Wirkungsgrad aber nur in einem relativ kleinen Kennfeldbereich - im für den Pkw typischen Teil- und Schwachlastbetrieb nimmt er wegen der strömungsphysikalisch ungünstigen Betriebsbedingungen für Turbine und Verdichter stark ab. Verbesserungen des isentropen ATL-Wirkungsgrades in den betreffenden Kennfeldbereichen sind im Allgemeinen nur mit kaum vertretbar hohem Aufwand zu erreichen.

Allerdings lässt sich der mechanische Wirkungsgrad des Abgasturboladers - im Wesentlichen bestimmt durch die Reibung der Rotorlagerung - durch Verwendung einer Kugellagerung statt der üblichen Gleitlagerung noch deutlich verbessern.

In dieser Studie wird analysiert und bewertet, inwieweit sich der Motorbetrieb durch Verwendung eines kugelgelagerten Abgasturboladers beim Motorstart und -warmlauf sowie bei Schwach-, Teil- und Volllast günstig beeinflussen lässt. Dabei werden auch der transiente Motorbetrieb, das Abgasemissionsverhalten und der Brennstoffverbrauch detailliert untersucht. Als Versuchsträger dient ein Dieselmotor auf EU5-Niveau, betrieben mit jeweils einem konventionellen und einem kugelgelagerten Abgasturbolader gleicher Verdichter- und Turbinenauslegung.

Halbierte Reibung, verringerter Verbrauch und weniger Stickoxid

Die wesentlichen Ergebnisse der Studie lauten:

- ▶ Reduzierung der Lagerreibung um bis zu 50 Prozent (betriebswarm)
- ▶ Deutliche Verbesserung des ATL-Wirkungsgrads bei niedriger ATL-Drehzahl
- ▶ Geringere Abhängigkeit der Lagerreibung von Schmieröltemperatur und -druck
- ▶ Reduktion des Brennstoffverbrauchs bei Referenz-Volllastmoment um bis zu vier Prozent, insbesondere im unteren Motordrehzahlbereich; alternativ Steigerung des Volllastmoments um circa 10 % (bei gleicher Abgastrübung)
- ▶ Verringerung des Brennstoffverbrauchs um bis zu 2,5 Prozent im NEDC-relevanten Motorkennfeldbereich bei konstanter Stickoxid-

emission; alternativ Reduktion der Abgasemission im NEDC um acht Prozent für Stickoxid und neun Prozent für Kohlenwasserstoffe bei konstantem Brennstoffverbrauch

- ▶ Signifikante Verbesserung des Ladedruckaufbaus unmittelbar nach dem Motorkaltstart und sehr gute Eignung für Start/Stop-Motorkonzepte
- ▶ Wegen des gegenüber dem Referenz-ATL unterschiedlichen Spülgefälles ist eine Anpassung des Hochdruck-AGR-Systems erforderlich.

Kugellager werden sich mittelfristig durchsetzen

Diese Studie zeigt, dass kugelgelagerte Abgasturbolader gegenüber der gleitgelagerten Ausführung deutliches Potenzial zur Verbesserung des transienten und stationären Motorbetriebs - insbesondere während des Motorwarmlaufs - haben. Die verhältnismäßig geringe konstruktive Modifikation des Abgasturboladers wirkt sich somit positiv auf das Betriebsverhalten der Verbrennungskraftmaschine aus.

Damit ergeben sich neue Möglichkeiten zur Verbesserung von Fahrverhalten, Brennstoffverbrauch und Abgasemission. Wir gehen davon aus, dass sich diese Lagerungsart - sofern Kosteneffizienz und Standfestigkeit garantiert sind - wegen der Vielzahl der Vorteile mittelfristig im Großserieneinsatz durchsetzen wird.

Der gesamte Text ist nachzulesen bei:

13. Aufladetechnische Konferenz 2008, Dresden

A New Turbocharger Bearing System as a Further Step to Improve the Overall TC Efficiency

D. Marsal [a][1]	P. Davies [a]
D. Jeckel [a]	T. Tietze [b][2]
G. Lautrich [b]	A. Sommer [b]

a Honeywell Turbo Technologies,
Z. I. Inova 3000, 88150 Thaon-les-Vosges, France
b IAV GmbH, Carnotstraße 1, 10587 Berlin, Deutschland
[1] E-Mail: damien.marsal@honeywell.com, www.honeywell.com
[2] E-Mail: torsten.tietze@iav.de, www.iav.com



Dieselmotor mit zweistufiger Aufladung

Ruckfreies Umschalten des Hochdruck-Turboladers

Beim Umschalten zwischen dem Niederdruck- und dem Hochdruck-ATL möchte man einen Einbruch des Ladedrucks vermeiden. Das gelingt mithilfe der intelligenten Reglerstruktur IAV-MBCAP2St. So lässt sich der Low- NO_x -Bereich des Motors erweitern, ohne den Fahrkomfort zu beeinträchtigen.

Um die immer schärferen Emissionsgrenzwerte einzuhalten, ist die Erweiterung des Low- NO_x -Kennfeldbereiches des Motors eine interessante Option - dies kann durch eine zweistufige Abgasturboaufladung erreicht werden. Das Regelungskonzept IAV-MBCAP2St („Model Based Controlled Air Path for 2-Stage Turbocharging“) erlaubt es, den Hochdruck-Abgasturbolader (HD-ATL) ruckfrei und kontinuierlich ein- und auszublenden. Dabei werden der Luftmassenstrom und der Ladedruck gleichzeitig geregelt.

Abbildung 1 zeigt die Prinzipskizze des Luftpfades eines Pkw-Dieselmotors mit zweistufiger Abgasturboaufladung und Hochdruck-Abgasrückführung. Um bei hohen Motordrehzahlen und -lasten und somit hohen Luftmassenströmen den motornahen Hochdruckverdichter nicht an der Stopfgrenze betreiben zu müssen, wird in diesen Betriebsbereichen der Verdichterbypass (BYP) geöffnet, der den Luftmassenstrom am Hochdruckverdichter vorbeiführt. Zum Schutz des HD-ATL vor mechanischer Zerstörung wegen überhöhter Drehzahl muss bei geöffnetem Verdichterbypass zusätzlich auch das Wastegate (WG) geöffnet werden.

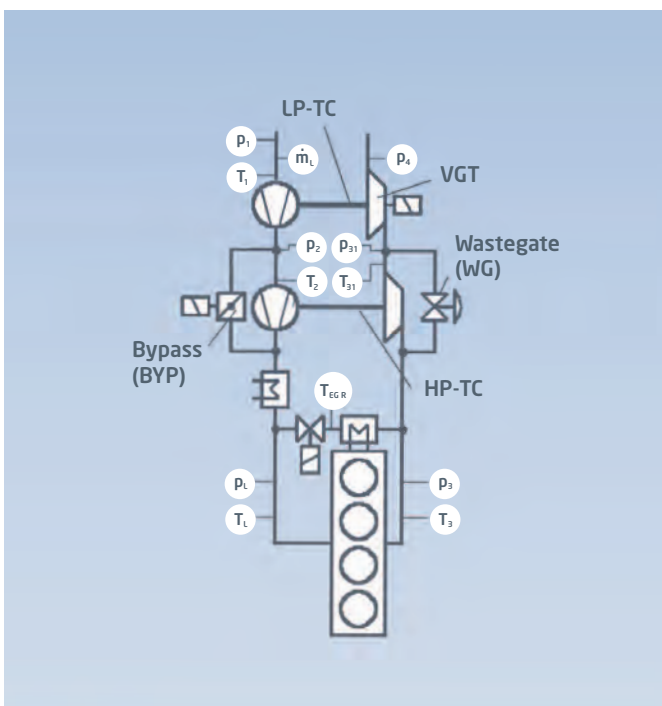


Abbildung 1: Luftpfad eines Pkw-Dieselmotors mit zweistufiger Aufladung

Ein direktes Umschalten vom HD-ATL zum ND-ATL bei steigenden Motordrehzahlen und -lasten führt zu Einbrüchen des Ladedrucks. Erstrebenswert ist ein stetiger Übergang, also das kontinuierliche Ein- und Ausblenden beziehungsweise Aktivieren und Deaktivieren des HD-ATL. Dieser Vorgang lässt sich durch die Regelung des Verdichters-zwischendrucks p_2 realisieren.

Mit dem Anheben beziehungsweise Absenken des Verdichters-zwischendrucks bei geschlossenem Verdichterbypass lässt sich der HD-ATL kontinuierlich ein- und ausblenden. Der HD-ATL ist vollständig ausgeblendet, wenn der Druckquotient über dem Hochdruckverdichter (π_{HP}) eins ist - Verdichterbypass und Wastegate können nun geöffnet werden. Die Sollwerte für den Ladedruck p_L und den Luftmassenstrom MAF gehen aus Kennfeldern hervor, die am Motorprüfstand ermittelt werden. Für die Sollwerte des Verdichters-zwischendrucks während des Übergangs vom HD- zum ND-ATL muss hingegen ein weiteres Kriterium gefunden werden.

Abbildung 2a) zeigt das Wirkungsgradkennfeld des Hochdruckverdichters in Konturdarstellung. Der maximale Wirkungsgrad im Kennfeld wird als Kennlinie dargestellt, die den Verlauf des zugehörigen Druckquotienten in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom beschreibt. Der Betrieb des Verdichters auf dieser Kennlinie kann somit als Kriterium zur Berechnung des Zwischendruck-Sollwerts für einen optimalen Wirkungsgrad herangezogen werden. Um bei steigenden Luftmassenströmen das Ausblenden des HD-ATL zu gewährleisten, muss die Kennlinie in Richtung sinkender Druckquotienten verlassen werden. Die Übergangsfunktion (Abbildungen 2a), b)) beschreibt diesen Verlauf.

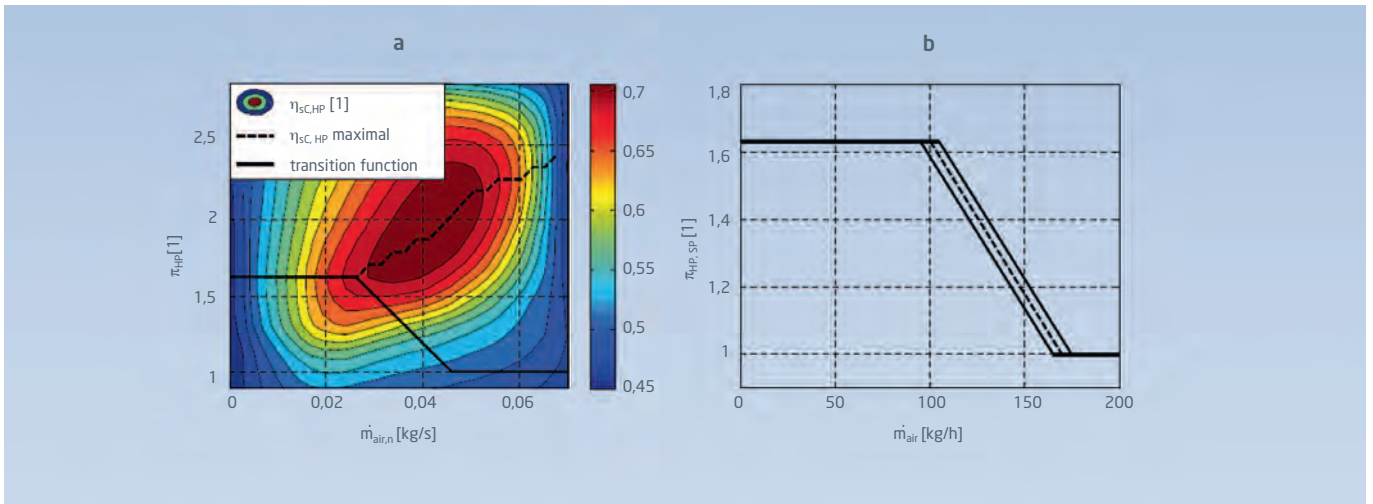


Abbildung 2: a) Wirkungsgradkennfeld, b) Übergangsfunktion mit Hysterese

Die Regelung basiert auf einem linearisierten Modell

Abbildung 3 zeigt die Reglerstruktur für das Konzept IAV-MBCAP2St. Eine Besonderheit ist die Verdichterzischendruckregelung: Sie ist als zweischleifige Kaskadenregelung ausgeführt, deren innere Schleife die Turbinenzischendruckregelung beinhaltet. Die Kaskadenregelung entkoppelt die Ladedruckregelung von der Luftmassenstromregelung innerhalb der physikalischen Grenzen.

Das Wastegate (WG) ist als elektropneumatischer Aktuator ausgeführt. Aktuatoren dieser Bauart weisen gegenüber elektrischen Aktuatoren geringere Stellgeschwindigkeiten beziehungsweise

höhere Zeitkonstanten auf. Deshalb erfolgt die Regelung des Ladedrucks p_L über einen einschleifigen Regelkreis, da die Regelung des Abgasgedrucks p_3 als innere Schleife einer zweischleifigen Kaskadenregelung einen hochdynamischen Aktuator voraussetzt.

Durch die Linearisierung nicht linearer physikalischer Modelle am aktuellen Arbeitspunkt (mit der Taylor-Reihe und der Nachführung des Arbeitspunkts an den aktuellen Betriebszustand) wird ein linearisiertes Modell der Regelstrecke mit zur Laufzeit variablen Parametern berechnet. Dieses Modell wird als LPV-Modell bezeichnet. In Abbildung 4 wird beispielhaft am Teilmodell des Turbinenzischendrucks dargestellt, wie das LPV-Modell erstellt wird.

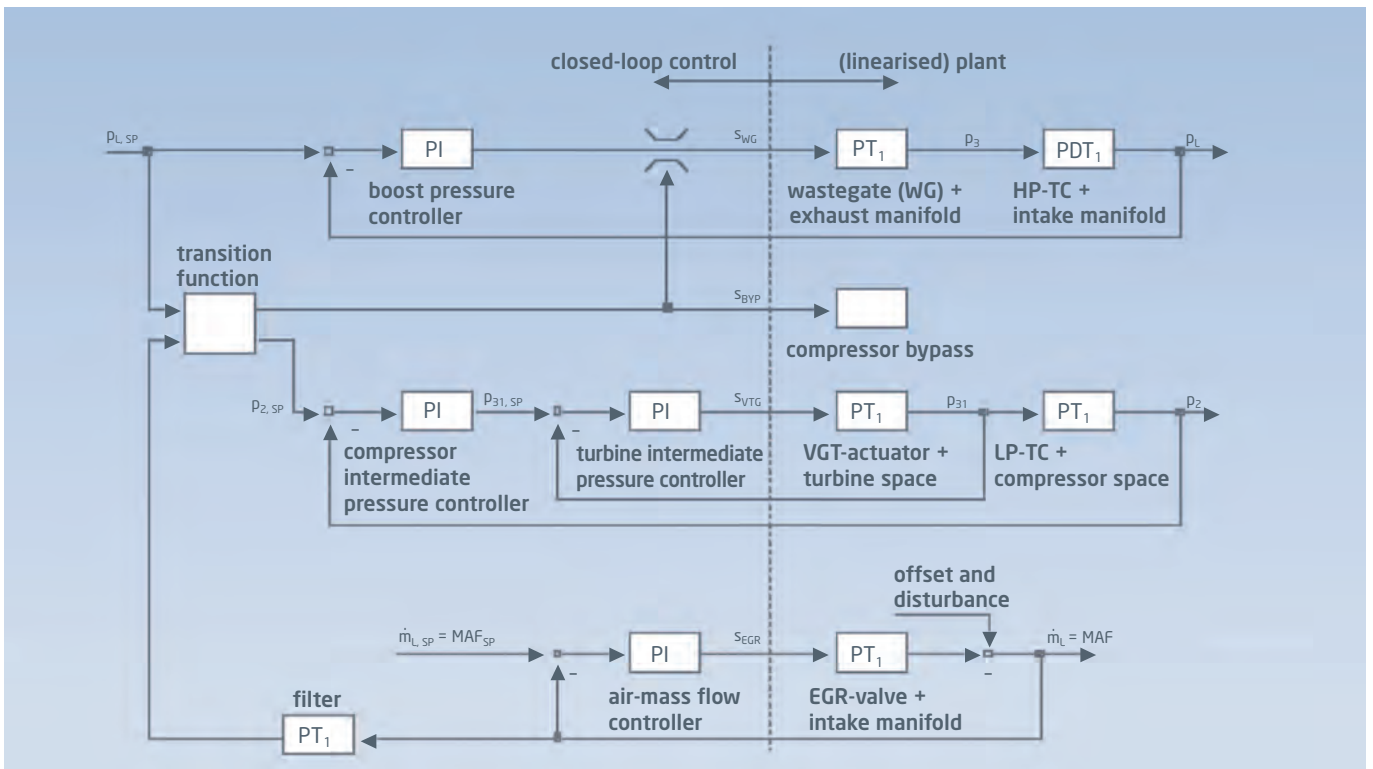


Abbildung 3: Reglerstruktur IAV-MBCAP2St

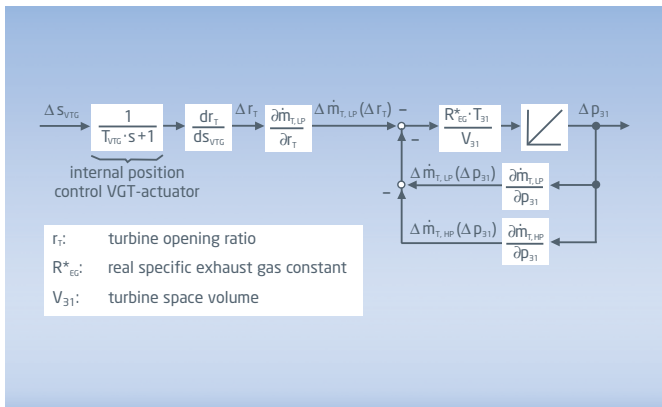


Abbildung 4: LPV-Modell des Turbinenzwischenraums als Blockschaltbild

Die Parameter des LPV-Modells werden nun dazu verwendet, die Regelkreise mit VTG-Aktuator und AGR-Ventil als Stellglieder durch Polvorgabe (Kreisfrequenz, Dämpfung) mit Metatuning (automatisierte

Berechnung der Kreisfrequenz) auszulegen. Die Auslegung der äußeren Schleife der Kaskadenregelung erfolgt mit der Ersatzübertragungsfunktion des inneren Regelkreises. Der Regelkreis mit dem Wastegate als Stellglied wird konventionell mit zwei Kennfeldern für den P- und I-Anteil bedatet.

Die Verifikation des Regelungskonzepts erfolgt im Versuchsfahrzeug. Abbildung 5 zeigt die Messung einer moderaten Beschleunigung von circa 2400 auf 3200 Umdrehungen pro Minute im zweiten Gang. Dargestellt ist der geregelte Übergang vom HD-ATL zum ND-ATL, also das Ausblenden des HD-ATL. Im Intervall von $t = 0$ bis $t = 7$ Sekunden ist der Verdichterbypass (BYP) geschlossen und der Ladedruck p_L wird vom Wastegate (WG) geregelt. Der steigende Luftmassenstrom MAF bewirkt eine Absenkung des Soll-Druckquotienten $\pi_{HP,sp}$ und somit eine Anhebung des Verdichterzwichendruck-Sollwerts $p_{2,sp}$.

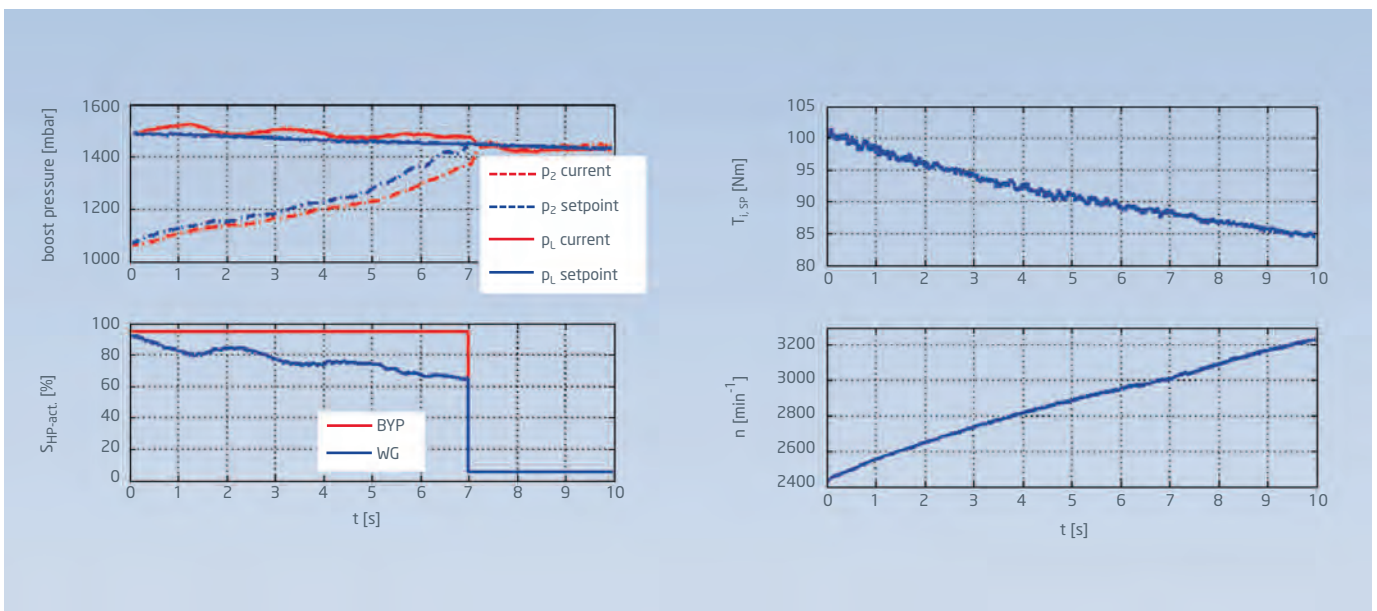


Abbildung 5: Beschleunigung von 2400 auf 3200 Umdrehungen pro Minute, Übergang vom HD- zum ND-ATL

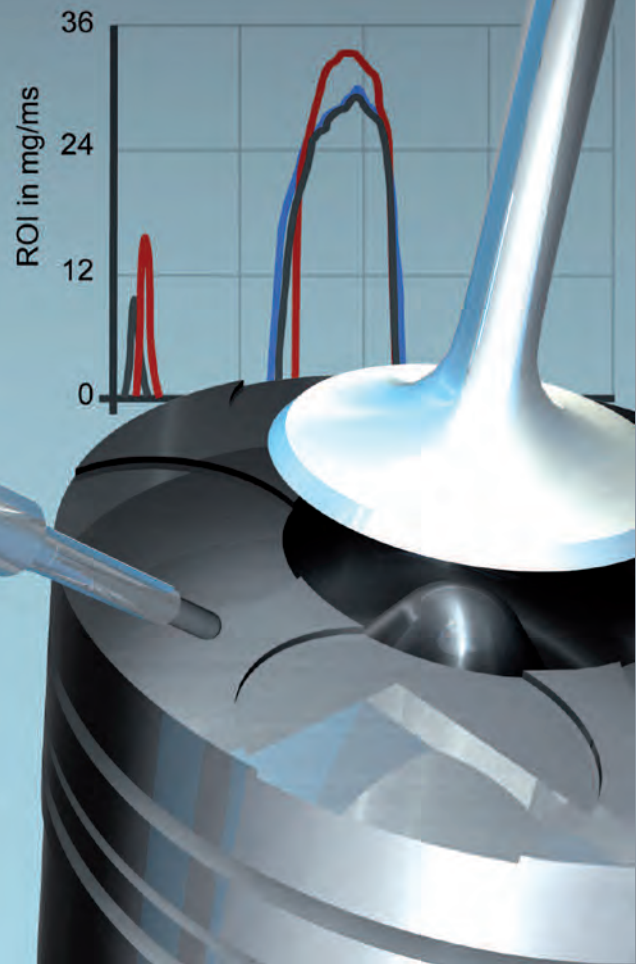
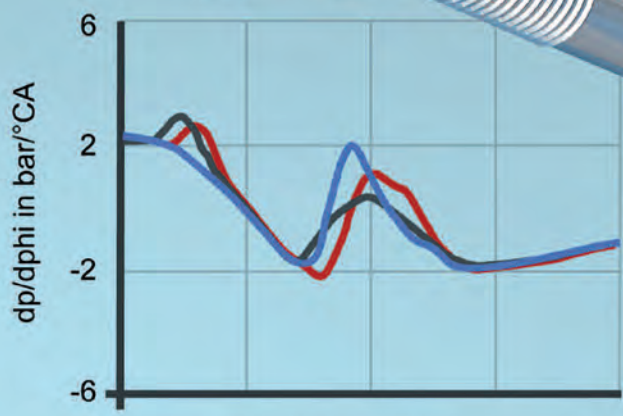
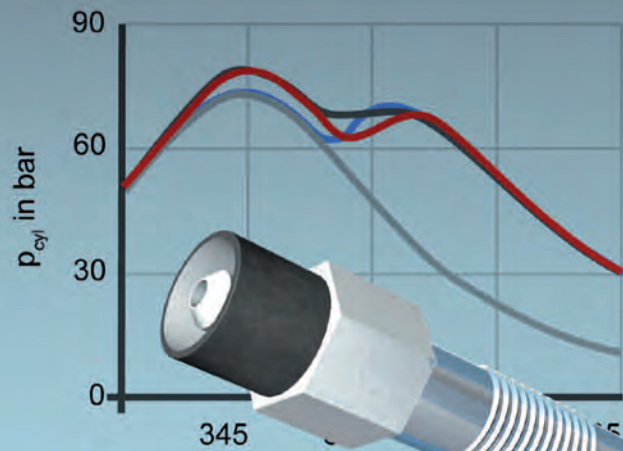
Der kurzfristige Einbruch des Ladedrucks ist nicht zu bemerken

Der Verdichterzwichendruckregler sorgt aufgrund der kaskadierten Regelungsstruktur für eine Anhebung des Turbinenzwischendruck-Sollwerts $p_{31,sp}$, der mit dem VTG-Aktuator eingeregelt wird. Bei $t = 7$ Sekunden gilt $\pi_{HP,sp} = 1$, $p_{2,sp} = p_{L,sp}$. Jetzt wird das Ausblenden des HD-ATL beendet und der Verdichterbypass geöffnet. Die Zwangsbedingung für den Bauteilschutz bewirkt gleichzeitig das Öffnen des Wastegates. Es ist ein maximaler Ladedruckeinbruch von ungefähr 20 Millibar zu beobachten, was in der Praxis meist vernachlässigt werden kann.

Der gesamte Text ist nachzulesen bei:
 Autoreg 2008, Baden-Baden

Regelung des Luftpfades eines Dieselmotors mit zweistufiger Abgasturboaufladung

C. Bessai, Dr. E. Stölting, R. Gratzke, O. Predelli,
 IAV GmbH



Zweidimensionale thermodynamische Analyse von Dieselmotoren Geschärfter Blick in den Zylinder

Die von der IAV entwickelte Software OPEN-TDA²² kann die Verhältnisse im Brennraum zweidimensional modellieren und ermöglicht es, präzise Anforderungen für die Entwicklung schadstoffarmer Brennverfahren zu formulieren.

Für die Motoren- und Brennverfahrensentwicklung werden verschiedene Werkzeuge und Analysemethoden für die Auswertung von Messergebnissen eingesetzt. Insbesondere die Analyse der mittels Indizierung (Messung des Zylinderinnendruckes) aufgenommenen Messsignale und der daraus abgeleiteten Brennverlaufsmerkmale ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beurteilung und Entwicklung von Brennverfahren.

Um die Druckverlaufsanalyse optimal an die jeweiligen Bedingungen anpassen zu können, wurde von der IAV ein Programm entwickelt, das auf MATLAB-M-Files und Simulink-Modellen aufbaut. Diese Open-Source-Software zur thermodynamischen Analyse heißt OPEN-TDA und basiert auf einem Einzonenmodell mit der Annahme einer über den gesamten Brennraum gleich verteilten Verbrennungszone.

Die Schwierigkeit bei der genauen Identifikation der für die Schadstoffbildung relevanten Verbrennungsbedingungen ist, dass weder das lokale Luftverhältnis noch die örtliche Temperatur bekannt sind oder mit den zur Verfügung stehenden Mitteln gemessen werden können. Die Ergebnisse der OPEN-TDA können daher nicht mit den reaktionskinetischen Grundlagen (etwa Φ, T -Plot in Abbildung 1) in Einklang gebracht werden.

Um die errechneten Brennraumbedingungen (Temperatur und Verbrennungsluftverhältnis) an die während der Verbrennung tatsächlich lokal vorliegenden Verhältnisse anzupassen, wurde die OPEN-TDA im Rahmen des Projekts „Diesel2020“ um einen Zweizonenansatz erweitert - wobei auch hier von einer homogenen Verteilung der Zustandsgrößen in der jeweiligen Zone ausgegangen wird (siehe Abbildung 2).

Die OPEN-TDA ermöglicht jetzt die Abbildung der Verbrennungsbedingungen in einer auf einen Teilbereich des Brennraums beschränkten Verbrennungszone. Eine Einschränkung besteht in der aktuellen Variante noch darin, dass die Verbrennungszone stets überstöchiometrisch ($\lambda \geq 1$) sein muss. In Abbildung 3 sind zur Veranschaulichung die aus der Einzonen-TDA (rot) und der derzeitigen Zweizonen-TDA (blau) berechneten λ, T -Verläufe vergleichend dargestellt. Die grüne Kurve beschreibt das angestrebte Ziel, neben der überstöchiometrischen Modellierung der Verbrennungszone auch die unterstöchiometrische ($\lambda < 1$) Modellierung unter Zuhilfenahme des Wassergasgleichgewichts (Annahme des chemischen Gleichgewichts) durchführen zu können.

Die daraus ermittelbaren Verbrennungsluftverhältnisse und Temperaturen der Verbrennungszone lassen eine genauere Analyse der Motorversuchsergebnisse in Bezug auf die reaktionskinetischen Grundlagen zu - wobei die Güte der Ergebnisse im Wesentlichen von der Genauigkeit der Parametrierung der Verbrennungszonengröße und deren Wachstumsrate abhängt.

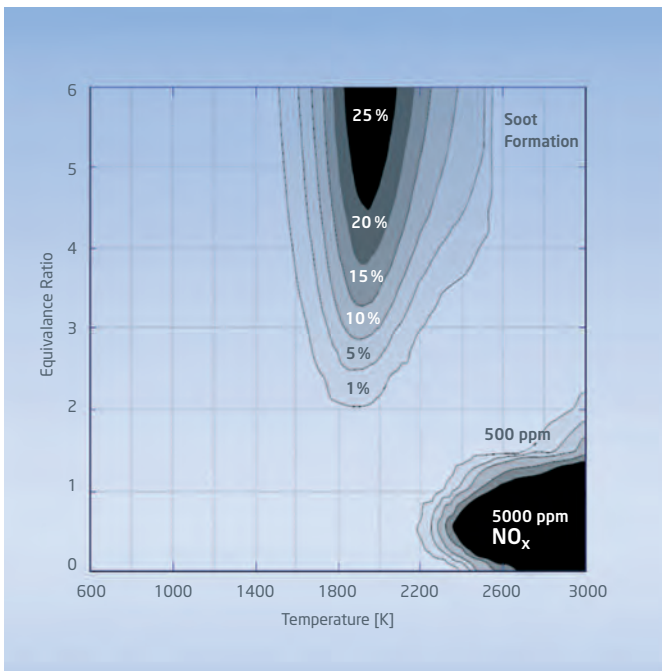


Abbildung 1: Ruß- und NO_x-Bildung in Abhängigkeit von Φ und T nach Akiyama

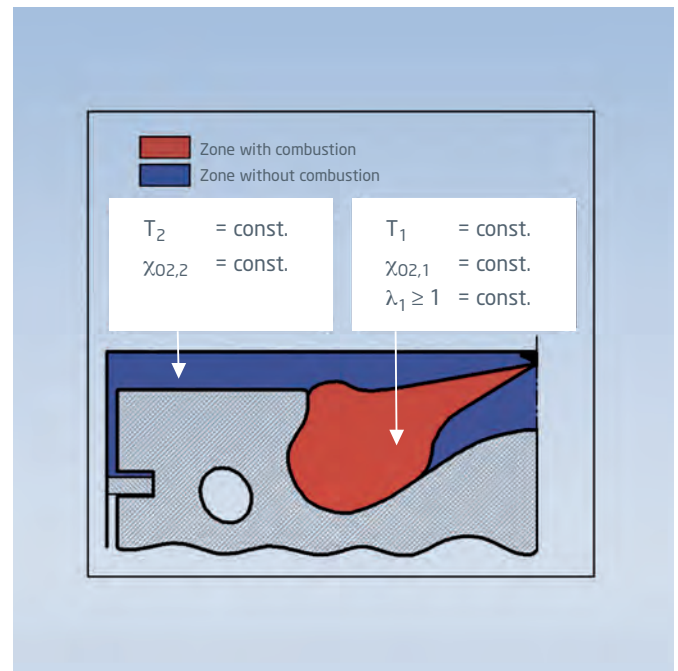


Abbildung 2: schematische Darstellung der zwei Zonen im Brennraum

Als Grundlage für die Modellierung der Größe und des Wachstums der Verbrennungszone für die OPEN-TDA²² dient ein im Versuch ermitteltes Einspritzstrahlvolumen (Schattenbildtechnik, Mie-Steuerung, LIF), das unter möglichst realen Brennraumbedingungen (Kraftstoffverdampfung, Dichte, Temperatur, Zylinderdruck, Raildruck, Injektoreigenschaften) untersucht werden muss.

Randbedingungen bei der Modellierung des Zonenwachstums

Ein Problem bei der Modellierung des Zonenwachstums ist, dass das Zonenvolumen nach dem Ende der Einspritzung nur schwer zu messen ist. Die oben genannten Messtechniken sind aktuell nur in der Lage, die Strahlcharakteristika in einem Zeitfenster bis zu etwa einer Millisekunde zu erfassen. Für die Modellierung des Zonenwachstums über das bekannte Zeitfenster hinaus werden daher folgende Annahmen getroffen:

Ab Einspritzbeginn fängt die Verbrennungszone an zu wachsen, sodass nach Ablauf des Zündverzugs bereits ein endliches Verbrennungszonenvolumen vorliegt und eine überstöchiometrische Verbrennung stattfindet. Aufgrund der hohen Umsatzraten zu Beginn der Verbrennung (hoher Sauerstoffüberschuss, kleine chemische Zeitkonstanten) und des relativ langsamen Wachstums der Verbrennungszone (Konvektion und Diffusion sind langsamer als chemische Reaktionen) sinkt zunächst das Verbrennungsluftverhältnis in der Verbrennungszone bis in den unterstöchiometrischen Bereich ab.

Mit zunehmend fetter Verbrennung verlangsamt sich der Verbrennungsumsatz wegen des geringen Sauerstoffangebots, sodass die Mechanismen der Konvektion und Diffusion die Geschwin-

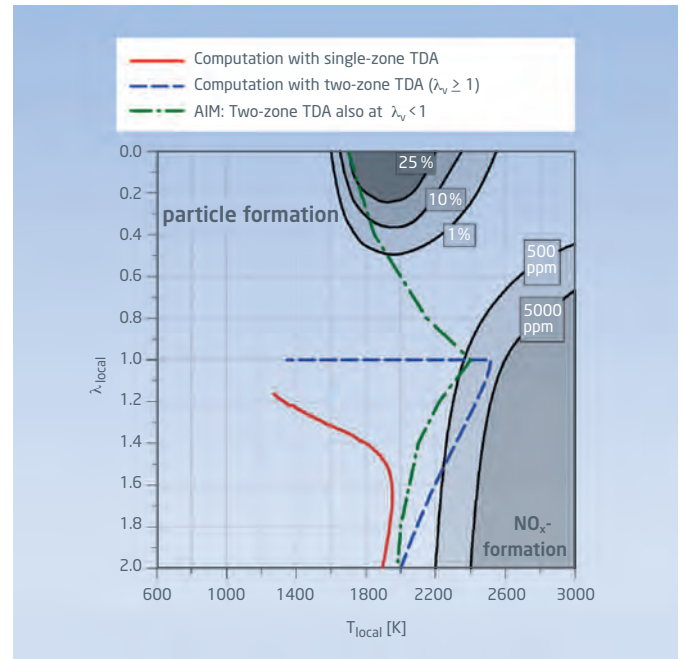


Abbildung 3: Vergleich der verschiedenen Berechnungsansätze der OPEN-TDA

digkeit bestimmen. Gegen Ende der Verbrennung wird die Größe der Verbrennungszone so eingestellt, dass sich genau ein Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 1,0$ einstellt. Ausschlaggebend hierfür sind die Annahmen, dass während der durch Konvektion und Diffusion gesteuerten Verbrennungsphase keine überstöchiometrische Verbrennung stattfindet und dass nach Verbrennungsende keine Produkte der unvollständigen Verbrennung vorliegen.

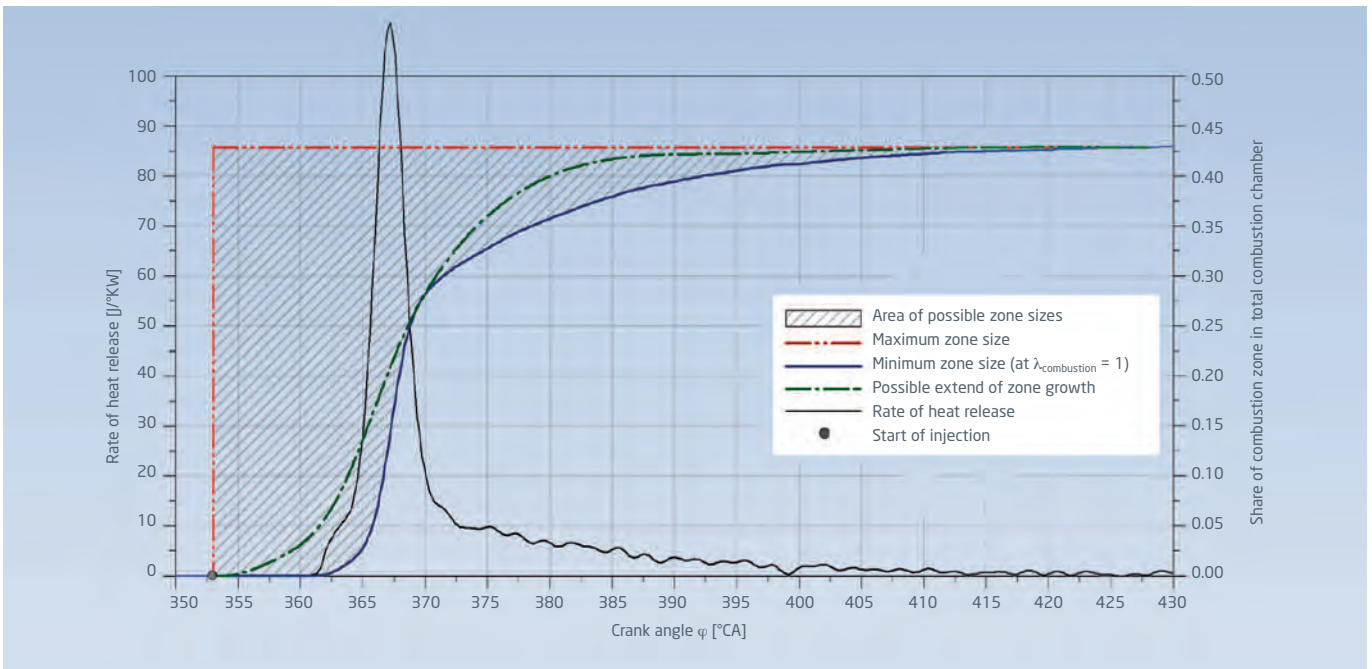


Abbildung 4: Randbedingungen bei der Modellierung des Wachstums der Reaktionszone

In Abbildung 4 ist der Bereich für alle möglichen Zonenausbreitungen schraffiert dargestellt. Die blaue Linie zeigt die minimale Zonengröße zu einem vorgegebenen Brennverlauf unter stöchiometrischen Bedingungen und bildet damit die untere Grenze für das Zonenwachstum. Unterhalb der minimalen Zonengröße kann die durch den Brennverlauf vorgegebene Wärmefreisetzung nicht mehr erreicht werden, sodass die Verbrennungszone immer oberhalb oder auf der Kurve verläuft. Die rote Linie begrenzt die maximal mögliche Größe der Verbrennungszone, da davon ausgegangen wird, dass diese Zone nur wachsen und nicht abnehmen kann. Sie erreicht somit am Ende der Verbrennung ihre maximale Ausdehnung.

Mithilfe der aus der Einspritzstrahlvisualisierung gewonnenen Erkenntnisse zur Ausbreitung des Strahlvolumens und aus den oben genannten analytisch ermittelten Randbedingungen wird das Wachstum der Verbrennungszone angenommen. Ein möglicher Verlauf ist im Diagramm grün gekennzeichnet.

Die Ergebnisse der OPEN-TDA²² auf der Basis dieser Modellierung ergeben im Vergleich zur Einzonen-TDA - obwohl stark vereinfachend - eine signifikant bessere Annäherung an die realen Brennraumbedingungen und ermöglichen es, die Zusammensetzung und die thermodynamischen Zustände im Brennraum auf den Φ, T -Plot zu übertragen.

Die Analyse diverser Versuchsreihen sowie die anschließende Untersuchung von Korrelationen mit den gemessenen Schadstoffemissionen sowie den Temperatur- und Rußmassenverläufen aus dazugehörigen ILM-Messungen (ILM - Integrale Lichtleitmesstechnik) werden ein tieferes Verständnis der dieselmotorischen Verbrennung fördern und es erlauben, präzise Anforderungen für die Entwicklung zukünftiger schadstoffarmer Brennverfahren bei der IAV zu formulieren.



Zylinderdruck-geführtes Motormanagement

Direktes Feedback aus dem Zylinder

Die Messung des Zylinderinnendrucks liefert in Echtzeit detaillierte Informationen über den Verbrennungsprozess - damit lassen sich zum Beispiel Alterungseffekte an Komponenten ausgleichen und somit das Emissionsverhalten verbessern. Die IAV hat eine Entwicklungsumgebung geschaffen, um die Potenziale des Zylinderdruck-geführten Motormanagements (ZMM) zu untersuchen.

Für die Verringerung von Motoremissionen stehen den Entwicklern neben Abgasnachbehandlungssystemen auch innermotorische Maßnahmen zur Verfügung. Diese lassen sich bei bestimmten Kombinationen aus Fahrzeuganwendung und Motorperformance kostengünstiger umsetzen.

Allerdings verlangen solche innermotorischen Maßnahmen eine höhere Präzision bei der Steuerung der Verbrennung. Die aktuellsten und detailliertesten Informationen über die Vorgänge im Motor - und damit über die Entstehung der Emissionen - liefert der Verlauf des Zylinderinnendrucks, aus dem sich zahlreiche thermodynamische Größen bestimmen lassen, zum Beispiel der indizierte Mitteldruck, die umgesetzte Energie, die Umsatzrate sowie Zeit- und Lageinformationen.

Diese Informationen, wie etwa die Zündverzugszeit und die Schwerepunktage der Verbrennung, werden seit Langem in der Forschung und der Entwicklung neuer Motoren sowie deren Brennverfahren eingesetzt. Die so gewonnenen Erkenntnisse verbessern das Verständnis der Emissionentstehung; werden sie in Echtzeit gemessen und ausgewertet, spricht man von ZMM (Zylinderdruck-geführtes Motormanagement).

Für den Einsatz in der Serie sind die Sensoren für den Zylinderinnendruck allerdings zu teuer. Daher werden Parallelkonzepte verfolgt, die das Ziel haben, die gleichen Informationen zu bestimmen - beispielsweise aus der Beschleunigung der Kurbelwelle oder den Gaszuständen vor und nach dem Zylinder. Diese Ansätze unterliegen aber Störeinflüssen, wie etwa der Dämpfung der Kurbelwelle durch den Antriebsstrang. Dadurch verlieren sie wertvolle Informationen über die Intensität und die zeitlichen Vorgänge im Zylinder.

Die konventionellen Sensoren wie Ladedruck-, Luftmassen- und Raildrucksensor liefern wiederum nur einseitige Informationen zum Luft- oder Kraftstoffpfad und sind wegen ihrer geometrischen Position sowie der unterschiedlichen Streckenlaufzeiten nur schwer bis gar nicht zu synchronisieren.

Der Zylinderinnendrucksensor liefert hingegen ein direktes Feedback des Verbrennungsprozesses und erfasst unmittelbar die Auswirkungen des Luft- und Kraftstoffpfades. Mit diesen Informationen kann das ZMM beide Pfade bedarfsgerecht beeinflussen. Somit ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten für spezielle Funktionen und Algorithmen, um die zunehmende Genauigkeit und die Mehrinformationen gezielt zu nutzen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Darstellung der Entwicklungsumgebung, dem Vergleich zwischen der Online- und Offline-Auswertung der Zylinderinnendrücke, dem Einfluss der Signalqualität von Seriensensoren und den Kriterien bei der Entwicklung von Online-Algorithmen für das ZMM. Für die spätere Betrachtung werden Beispielfälle gezeigt, die die Verknüpfung zwischen dem Auswertesystem und dem Sensor beschreiben.

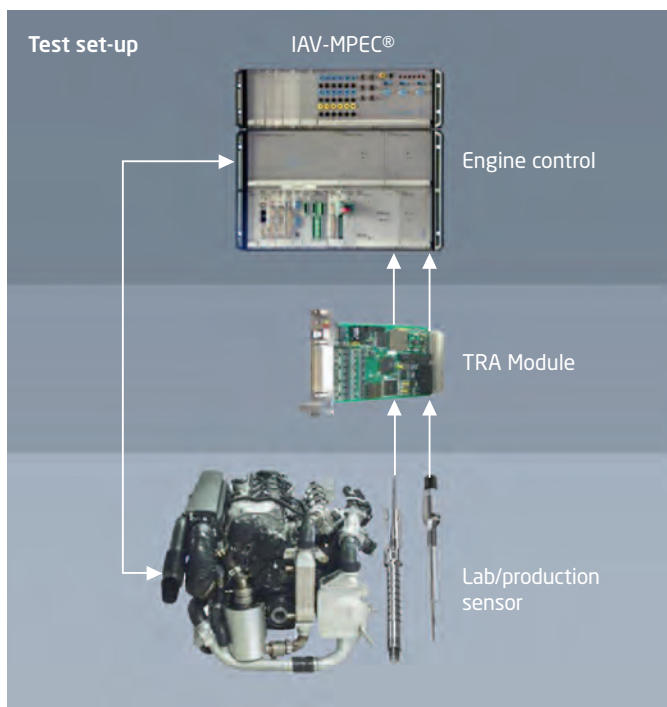


Abbildung 1: die Entwicklungsumgebung IAV-MPEC

	Laborsensor	Seriensensor
Offline-Analyse OPEN-TDA	Fall I	Fall II
Online-Analyse TRA	Fall III	Fall IV

Tabelle 1: Analysevarianten

Die Entwicklungsumgebung IAV-MPEC übernimmt die Kontrolle

Um die Potenziale des ZMM erforschen zu können, wurde bei der IAV eine Entwicklungsumgebung geschaffen, die ausreichend Performance bietet, um eine Analyse und Bewertung sowohl neuer Ansätze aus der Vorentwicklung als auch der Mindestanforderungen für die Serienanwendung durchzuführen.

Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau und die Entwicklungsumgebung mit dem IAV-MPEC (Modular Prototyping Engine Controller), der sämtliche Funktionen des Motorsteuergerätes übernimmt (siehe Beitrag „Volle Flexibilität beim Motormanagement“). Die IAV-MPEC-

Software wurde vollständig in MATLAB/Simulink entwickelt. Sie wird mit dem Real-Time Workshop von The MathWorks kompiliert und automatisch via Ethernetanbindung auf den Industrie-PC übertragen, wo sie mit der höchsten Priorität in Echtzeit läuft.

Die Applikation erfolgt ebenfalls via Ethernet über ein XCP-Protokoll, was den Einsatz konventioneller Werkzeuge wie INCA ermöglicht. Die Kraftstoffpfade werden über FI^{2RE} (Flexible Injection and Ignition for Rapid Engineering) bedient, das im IAV-MPEC integriert ist. FI^{2RE} ist in der Lage, Kurbelwinkelsensoren auszuwerten und alle auf dem Markt befindlichen Injektoren anzusteuern.

Die Auswertung des Zylinderinnendrucks übernimmt die TRA-Karte (Thermodynamical Realtime Analysis), die über acht hochfrequente Analogeingänge und eine CAN-Schnittstelle verfügt. Die Winkeltriggerung erfolgt über das FI^{2RE}. Die TRA-Software läuft auf einem DSP (Digital Signal Processor) und dieser kommuniziert mit dem Host-PC über eine USB-Schnittstelle. Darüber wird auch die in MATLAB/Simulink entwickelte und mittels Autocodgenerierung erzeugte Software automatisch auf die Karte übertragen.

Die Regelgrößen werden über die CAN-Schnittstelle zum IAV-MPEC übertragen. Durch diese Konfiguration ist IAV-MPEC in der Lage,

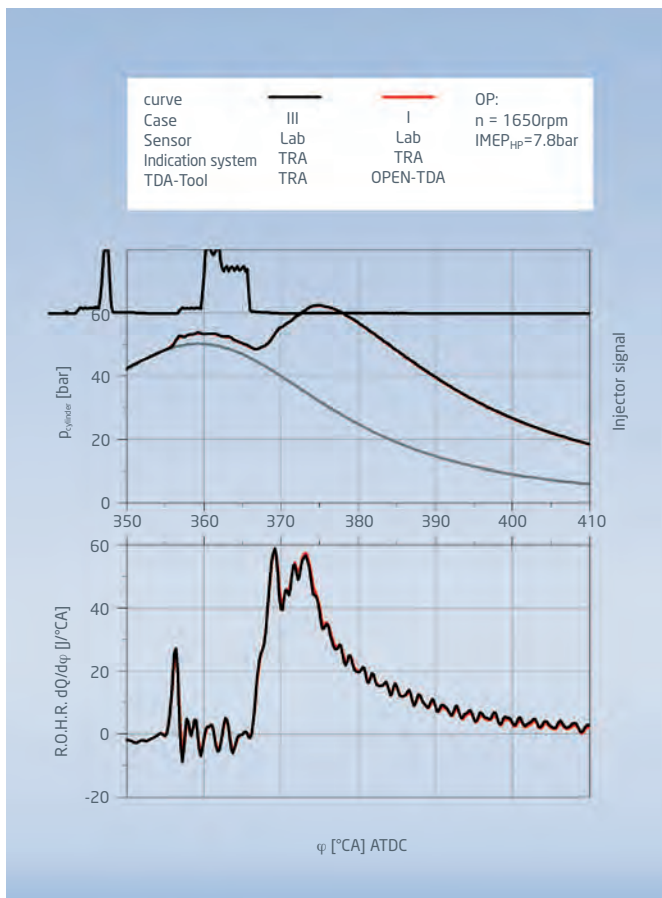


Abbildung 2: Vergleich der Online- und Offline-Algorithmen

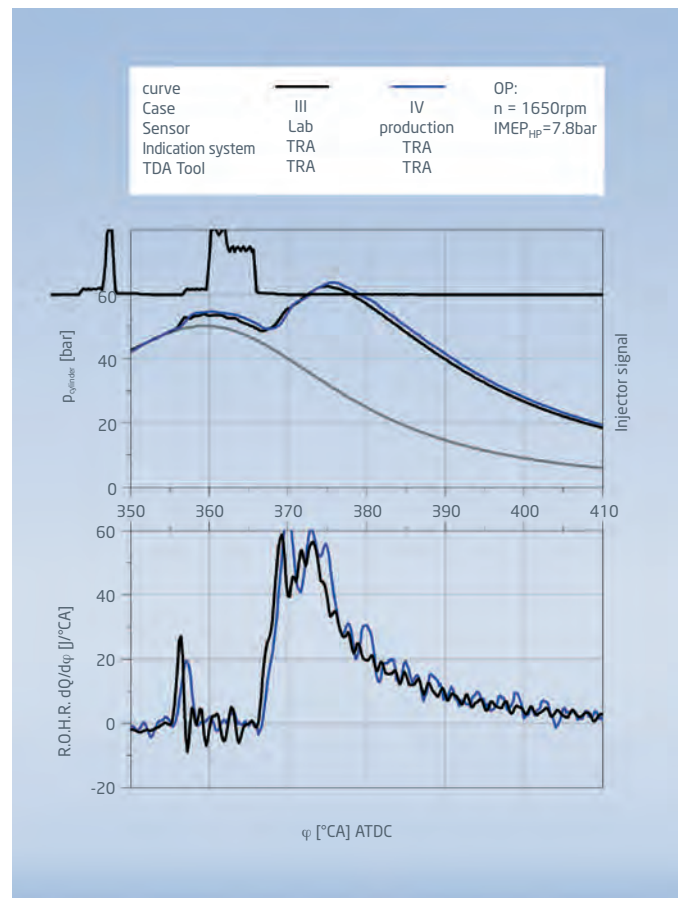


Abbildung 3: Vergleich des Labor- und des Seriensensors

Verbrennungsmerkmale von Zyklus zu Zyklus zu bestimmen und zu beeinflussen. Die Bedienung der TRA und des FI^{2RE} erfolgt über die FI^{2RE}-Commander-Software. Sie bietet nicht nur die Möglichkeit, Mess- und Rechenwerte online zu visualisieren, sondern erlaubt es auch, diese Werte für ein Post-Processing kontinuierlich auf die Festplatte des Host-PC zu schreiben.

Die Echtzeitmesswerte haben eine ausreichende Qualität

Der Vergleich in Tabelle 1 zeigt deutlich das Potenzial der Entwicklungsumgebung. Fall I bezeichnet die Kombination aus einem Laborsensor, der den Zylinderdruckverlauf als Rohsignal bereitstellt, und dem felderproben Offline-Analysetool OPEN-TDA. Fall III ist die Kombination aus Laborsensor und dem für die Online-Analyse notwendigen TRA-Modul. Bei den weiteren Erklärungen dieses Beitrags liegt der Fokus auf den Fällen I, III und IV.

In Abbildung 2 ist der Vergleich der Analysevarianten für einen typischen Punkt aus dem NEFZ grafisch dargestellt. Das obere Diagramm zeigt den über 100 Zyklen gemittelten und iterativ eingepassten Zylinderdruckverlauf (rot), den von der Offline-Analyse errechneten dazugehörigen Schleppdruckverlauf (grau) und den von der TRA online eingepassten Zylinderdruckverlauf (schwarz). Im unteren Diagramm ist die aus der Bilanzgleichung errechnete Energieumsatzrate für beide Analysevarianten aufgezeigt.

Der Vergleich der online ermittelten Verläufe mit denen, die die präzise Offline-Analyse berechnet, macht deutlich, wie vergleichbar die Ergebnisse der beiden Tools sind – die mit der Online-Analyse berechneten Echtzeitergebnisse haben einen ebenso hohen Informationsgehalt wie die der Offline-Analyse. Sie können somit für die Bewertung der Verbrennung verwendet werden.

Die Entwicklungsumgebung kann auch den Serieneinsatz simulieren

Die im Prüffeld eingesetzten Laborsensoren liefern zwar ein hochwertiges Signal, sind aber aufgrund ihrer geringen Lebensdauer und wegen der hohen Kosten nicht für den Serieneinsatz geeignet. Der Serieneinsatz erfordert Algorithmen, die sich unter Laborbedingungen bewährt haben, aber mit weniger Performance und einer minderen Signalgüte auskommen.

Beides kann mit IAV-MPEC simuliert werden – der große Vorteil ist, dass beide Sensoren online parallel gerechnet und die Ergebnisse von einem einzigen Tool erfasst und aufgezeichnet werden. Um eine hohe Synchronisation bei der Online-Berechnung zu erreichen, wurden in das IAV-MPEC zwei TRA-Karten integriert. Dies hat den Vorteil, dass beide Module von derselben Systemuhr getriggert werden und somit derselbe Verbrennungszyklus des gleichen Zylinders sowohl für den Serien- als auch den Referenzsensor erfasst wird.

In Abbildung 3 ist der Verlauf des Zylinderinnendruckes für einen Labor- (schwarz) und einen Seriensensor (blau) dargestellt, zudem zeigt sie die dazugehörigen Energieumsatzraten, die mit dem Online-Analysetool TRA errechnet wurden. Das Signal des Seriensensors

weist gegenüber dem Referenzsensor eine mindere Signalqualität und eine geringe Verschiebung des Druckverlaufs in X-Richtung auf. Ursache dieser Verschiebung ist das Übertragungsverhalten der im Sensor integrierten Elektronik; das kann bei der Auswertung teilweise kompensiert werden.

Das Signalrauschen stellt dagegen bei der genauen Ermittlung der Wärmefreisetzungs Menge der Voreinspritzung eine größere Herausforderung dar. Das liegt daran, dass das Drucksignal einer geringen Voreinspritzmenge einen ähnlichen Signalpegel und eine ähnliche Signalfrequenz aufweist wie ein Störsignal. An dieser Stelle ist es darum besonders wichtig, dass die Messstrecke, die Filterung und die Algorithmen exakt aufeinander abgestimmt sind.

Bewertungskriterien aus dem Zylinderinnendruck

Für die Bewertung der einzelnen Funktionen und Algorithmen ist es wichtig, ihren Nutzen, die Kosten und die Einsparpotenziale zu kennen. Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt aus der Vielfalt der Brennverlaufsmerkmale, die von TRA in Echtzeit berechnet werden können. Diese Kenngrößen gestatten eine Bewertung des Brennverlaufes und damit eine Regelung des Verbrennungsprozesses. Das macht es möglich, die resultierenden Emissionen zu beeinflussen.

Beim Serieneinsatz von ZMM wird derzeit nur ein Bruchteil aller zur Bewertung des Brennverfahrens möglichen Kenngrößen verwendet. Diese Kenngrößen sind p_{mi} und $\alpha Q_{50\%}$. Im Rahmen unserer Aktivitäten für die ZMM-Entwicklung stehen momentan insbesondere die Energieumsatzrate ROHRmax (als Indikator für die Geräuschemission) sowie die Voreinspritzmenge QPI und die Voreinspritzlage $\alpha Q_{50\%}$ -PI im Mittelpunkt.

Die Aussagekraft dieser Kenngrößen für die Beurteilung des Brennverfahrens hängt stark von der Abtastrate und der Signalqualität ab. An dieser Stelle zeigt sich das Potenzial der Entwicklungsumgebung IAV-MPEC: Sie bietet die Möglichkeit, die Offline-Algorithmen nahezu direkt in die Echtzeitanwendung zu übertragen. Zudem lässt sich die Labor-Entwicklungsumgebung schrittweise bis hin zur Serieneinsatz-Umgebung abrüsten.

Für die Bewertung der Verbrennungsmerkmale im Hinblick auf ihre Regelbarkeit werden bei der IAV unterschiedliche Alternativen betrachtet. Neben den konventionellen PIDT1-Reglern werden neuronale Netze, adaptive Modelle und Kompensationsfunktionen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass für viele Größen zusätzlich auch die Historie des Motors mit betrachtet werden muss.

Fall IV ist die Kombination aus Seriensensor und TRA-Modul. Diese Kombination wurde in einem IAV-Prototypenfahrzeug eingesetzt, um die Funktionen der mit einem Häkchen gekennzeichneten Brennverlaufsmerkmale im realen Fahrbetrieb zu testen und die technische Realisierbarkeit zu bestätigen. Die Entwicklungsfelder, die mit „!“ gekennzeichnet sind, erfordern eine höhere Signalqualität des Zylinderdrucksensors. Zudem müssen für den Einsatz im Fahrzeug noch weitere Kriterien berücksichtigt werden, zum Beispiel Steuergerätehardware, Rechenressourcen und Speicherkapazität.

Verbrennungsmerkmale	Erklärung	Fall III TRA mit Laborsensoren	Fall IV TRA mit Seriensensoren
pmi	Indizierter Mitteldruck	√	√
pmax	Spitzendruck im Zylinder	√	√
$\alpha Q5\%$	Kurbelwinkel-bezogene Lage des Punktes, fünf Prozent der umgesetzten Energie	√	√
$\alpha Q50\%$	Kurbelwinkel-bezogene Lage des Punktes, 50 Prozent der umgesetzten Energie	√	√
$\alpha Q95\%$	Kurbelwinkel-bezogene Lage des Punktes, 95 Prozent der umgesetzten Energie	√	√
ROHRmax	(Rate of Heat Release) Spitzenumsatzrate	√	√
d2Q/da	Ableitung der Energieumsatzrate, dargestellt als zweite Ableitung des Energieumsatzverlaufs	√	!
QPI	Umgesetzte Energie der Vorspritzeinrichtung	!	!
$\alpha Q50\text{-PI}$	Kurbelwinkel-bezogene Lage des Punktes, 50 Prozent der umgesetzten Energie der Voreinspritzung	!	!

Tabelle 2: Bewertung der online errechneten Informationen

Das ZMM erschließt somit zusätzlich weitere Potenziale zur Einhaltung der vorgegebenen Emissionswerte über die gesamte Lebensdauer des Motors. Es bringt aber auch weitere Kosten mit sich. Die innermotorischen Maßnahmen - wie das ZMM - stehen in Kostenkonkurrenz zur Abgasnachbehandlung. Mit steigendem Gewicht des Fahrzeugs und entsprechender Motorisierung steigen die Kosten für die Abgasnachbehandlung überproportional an. Der Einsatz dieser Maßnahmen ist nur dann gerechtfertigt, wenn die zusätzlichen Kosten bei der Abgasnachbehandlung wieder eingespart werden können.

Die Kosten für ZMM müssen bei der Abgasnachbehandlung eingespart werden

Die aufgezeigten Entwicklungsfelder würden eine Erweiterung der bekannten Regelstrategien - wie pmi und $\alpha Q50\%$ -Regelung - ermöglichen, die einen akustik- und emissionsoptimierten Motorlauf gestatten. Dazu gehört insbesondere die Regelung der Wärmefreisetzungsmenge und die Lage der Vorkonditionierverbrennung sowie eine Closed-Loop-Regelung des Anstiegsgradienten der Hauptverbrennung.

Zusätzliche Komponenten, insbesondere im Kraftstoffpfad, erweitern die Möglichkeiten des ZMM - zum Beispiel in Kombination mit dem „Rateshaping des Einspritzverlaufes“. Über dieses kann der Verlauf der Kraftstoffeinspritzung in den Zylinder individuell gestaltet werden. Das bietet die Möglichkeit, den Verbrennungsprozess gezielt zu beeinflussen, um die Emissionsentstehung bereits innermotorisch bei angemessenem Verbrennungsgeräusch zu vermeiden.

Impressum

Herausgeber:

IAV GmbH
Fachbereich Dieseleentwicklung
www.iav.com

Verantwortlich:

Oliver Predelli

Redaktion:

Marko Gustke
Sandra Wirth

Gestaltung und Druck:

Zitrusblau, Berlin

Stand:

Frühjahr 2009