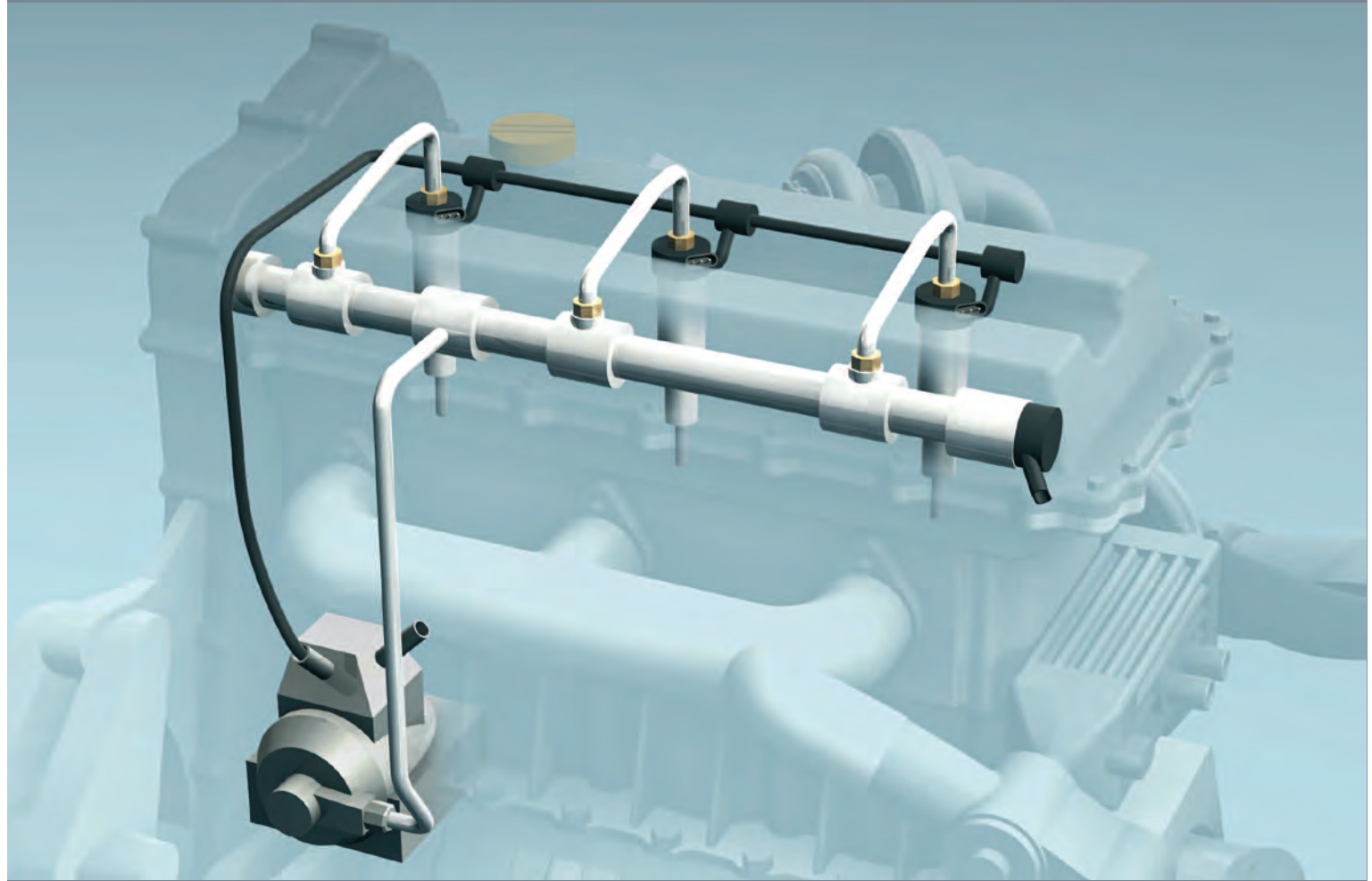


# Dieselmotor-Entwicklung in der IAV

Kraftstoffe und Einspritzung





Einspritzdruckbedarf für zukünftige dieselmotorische Brennverfahren

## Einspritzdruck und alternative Ansätze für eine optimierte Gemischbildung im Vergleich

**Stark politisch motiviert ist in den letzten Jahren die Abgasnachbehandlung in den Fokus der Motorenentwicklung gerückt. Innermotorische Maßnahmen wurden dabei nicht immer mit dem notwendigen Nachdruck weiterverfolgt. Gerade mit ihnen könnte aber eine günstige Ausgangslage für eine nachgeschaltete Behandlung der Restemissionen gewährleistet werden. Geringere Systemkosten sowie eine weitere Verbesserung des Emissionsverhaltens oder daraus abgeleitete Verbrauchsvorteile lassen sich nur durch ein innermotorisch optimiertes Brennverfahren erzielen.**

Dieser Beitrag beschreibt die Zusammenhänge steigender Einspritzdrücke, deren Vor- und Nachteile sowie alternative Maßnahmen. Gerade diese alternativen Maßnahmen haben das Potenzial, einerseits die Kosten für das Einspritzsystem zu begrenzen und andererseits weitere Vorteile im Brennverfahren auszuschöpfen.

### Bekanntes Technologietrends

Zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Rohemission von Pkw- und Nkw-Dieselmotoren hat sich in den vergangenen Jahren ein Trend zur Erhöhung der AGR-Raten (Abgasrückführrate) durch verbesserte Abgasturboaufladung gezeigt. Moderne Auflade- und AGR-Systeme ermöglichen dadurch die Anhebung der AGR-Rate bei konstantem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda_{\text{Cyl}}$ . Die daraus resultierende Absenkung der Sauerstoffkonzentration im angesaugten Arbeitsgas führt zu einer Senkung der lokal erreichbaren Flammentemperaturen und damit zu einer geringeren  $\text{NO}_x$ -Bildung. Wird der Einspritzdruck konstant gehalten, ist eine verringerte Strahlpenetration aufgrund der höheren Gasdichte durch die Aufladung die Folge. Damit auch das lokale  $\lambda$  im und um den Strahl wieder steigt, wird in der Regel der Einspritzdruck erhöht.

Das Potenzial der Einspritzdrucksteigerung ist allerdings stark von der AGR-Rate abhängig, genauer gesagt, vom Anteil des Abgases im Frischgemisch. Bei niedrigen bis moderaten AGR-Raten führt eine Erhöhung des Einspritzdrucks zu einem unerwünschten Anstieg der thermischen Stickoxidbildung. Grund dafür ist der dominante Einfluss des Einspritzverlaufs auf die Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgänge. Bei steigendem Einspritzdruck wird im gleichen Zeitfenster mehr brennfähiges Kraftstoffgemisch aufbereitet und umgesetzt.

Demgegenüber ist bei höheren AGR-Raten die thermische Stickoxidbildung gehemmt, sodass die Anhebung des Einspritzdrucks nahezu  $\text{NO}_x$ -neutral erfolgen kann. Die Rußverringerung durch den höheren Einspritzdruck kann in diesem Fall direkt oder indirekt für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs oder eine weitere  $\text{NO}_x$ -Absenkung genutzt werden. Jedoch bleibt ein signifikanter Geräuschnachteil bei Verwendung höherer Einspritzdrücke bestehen (Abbildung 1).

### Brennverfahrensoptimierung über Einspritzverlaufsformung

Um dem geschilderten Nachteil der Geräuschemission bei hohen Einspritzdrücken beziehungsweise hohen Einspritzraten entgegenzuwirken, besteht der Wunsch nach einer gezielten Einflussnahme auf den Einspritzratenverlauf. Dafür existieren die Möglichkeiten der diskontinuierlichen und der kontinuierlichen Einspritzverlaufsformung.

Die üblicherweise in der Serie eingesetzte diskontinuierliche Verlaufsformung über Voreinspritzstrategien bringt deutliche Vorteile in der Geräuschemission gegenüber konventionellen Einspritzstrategien. Die Aufteilung der Gesamteinspritzmenge auf mehrere Teilmengen und eines damit zum Ende des Einspritzzyklus eventuell nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehenden Strahlimpulses durch zu kleine Mengen, können Nachteile in der Rußemission hervorrufen. Ebenso nachteilig kann sich das größere Einspritzzeitfenster auswirken, wodurch die Schwerpunktfrage der Umsetzung nach spät gehen kann und dann zu Rußnachteilen führt.

Zum Thema kontinuierliche Ratenverlaufsformung hat die IAV grundlegende Untersuchungen mit einem flexiblen CR-Forschungseinspritzsystem (Twin CR) durchgeführt. Durch die kontinuierliche Einspritzverlaufsformung, wie sie zum Beispiel ein bootförmiger Einspritzverlauf darstellt, können sowohl Geräusch- als auch Rußvorteile realisiert werden (Abbildung 2).

Im Vergleich zu konventionellen CR-Systemen (grau hinterlegt) wird bei der „Booteinspritzung“ (weiß hinterlegt) der Einspritzvorgang zunächst mit geringem Druck eingeleitet, der nach einer Verzugszeit (Bootzeit) stark ansteigt. Die Booteinspritzung reduziert den Vormischanteil des eingespritzten Kraftstoffes, der sich beim Start der Verbrennung im Zylinder befindet. Das führt anfangs zu einer reduzierten Wärmefreisetzung und damit nur zu geringem Druckanstieg und damit zum Geräuschvorteil. Durch die Überhöhung der Einspritzrate zu Einspritzende wird der Rußabbrand gefördert, was im Gesamtergebnis zu geringeren Rußemissionen führt.

## Alternativen zur Einspritzdruckerhöhung

Eine Brennverfahrensoptimierung kann nicht nur durch einen hohen Einspritzdruck erreicht werden, sondern auch durch Maßnahmen wie Verlängerung der Gemischbildungszeit, Einsatz synthetischer Kraftstoffe oder auch durch weitere Maßnahmen im Bereich der Düsenlochgeometrie.

Durch eine Reihe von Maßnahmen lässt sich der Zündverzug nach der Haupteinspritzung verlängern. Hierzu zählen die Absenkung der Verdichtungsendtemperatur (mittels Verdichtungsverhältnis oder Ansaugtemperatur), die Absenkung des Verdichtungsendrucks durch die Reduzierung des Aufladegrades beziehungsweise durch Ansaugluftdrosselung, die Absenkung der Zündwilligkeit des Kraftstoffes sowie der Verzicht auf die Brennraumvorkonditionierung durch Voreinspritzungen.

Bei diesem als PCCI bekannten Brennverfahren (Premixed Charge Compression Ignition) wird durch den Verzicht auf eine Piloteinspritzung bewusst auf die Temperaturanhebung im Zylinder vor der Haupteinspritzung verzichtet und so eine Verlängerung der Zündverzugszeit erreicht. Dieses Verfahren erreicht eine partielle Homogenisierung der Zylinderladung und ermöglicht es, aus dem klassischen Ruß-NO<sub>x</sub>-Trade-off auszubrechen und die Rohemission für Stickoxide und Partikel gleichzeitig drastisch zu senken. Nachteil ist

jedoch das erhöhte Emissionsniveau für HC und CO.

Auch neue Kraftstoffe kommen als Alternative zur Steigerung des Einspritzdrucks in Betracht. Synthetische Kraftstoffe erreichen ein vergleichbares Brennverhalten bei deutlich geringeren Partikelemissionen - trotz einer wesentlich höheren Cetanzahl (gesteigerte Zündwilligkeit) und unter Berücksichtigung der Dichte- und Heizwertunterschiede. Speziell in der Teillast, bei hohen AGR-Raten und späterer Verbrennungsschwerpunktlage ist noch eine nahezu rußfreie Verbrennung möglich. Auch bei Volllast sind im Vergleich zu Dieselmotoren noch eindeutige Vorteile in Bezug auf die Rußpartikelemissionen festzustellen.

Eine weitere Möglichkeit zur Senkung des Einspritzdrucks beziehungsweise zur Realisierung von Vorteilen im Ruß-NO<sub>x</sub>-Trade-off ist die Optimierung der Form der Einspritzdüsenlöcher. Zu diesem Thema hat die IAV detaillierte Untersuchungen durchgeführt - einen Einblick gibt der Artikel „Düsenlochformung für eine effizientere Gemischbildung“ in dieser Broschüre.

Entscheidend wird am Ende nicht zwangsläufig die Anhebung des maximal möglichen Einspritzdrucks sein, sondern vielmehr die Ausnutzung und Ausweitung des bereits vorhandenen Druckpotenzials auf größere Kennfeldbereiche - auch unter Zuhilfenahme anderer hier diskutierter Einflussmöglichkeiten.

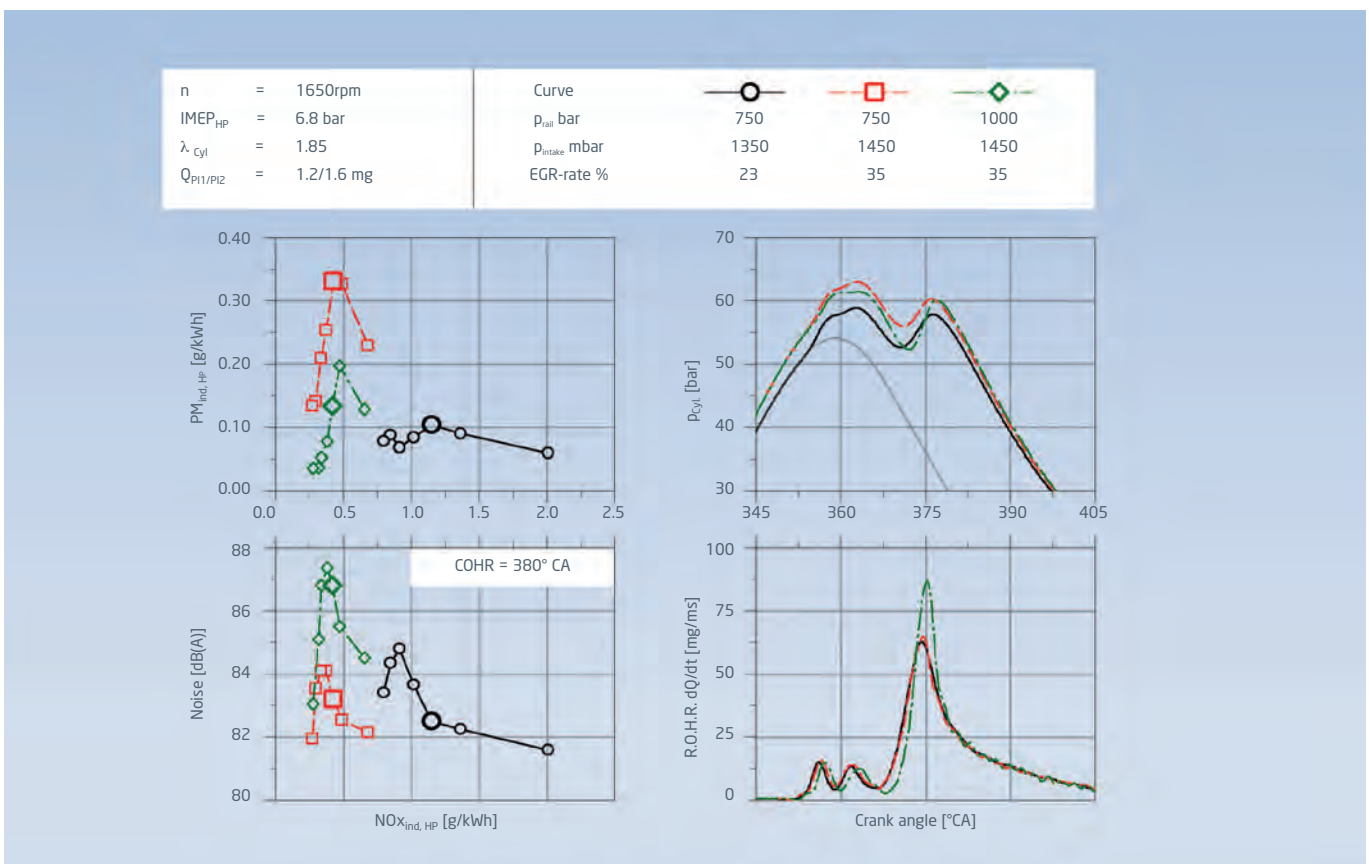


Abbildung 1: erhöhtes Verbrennungsgeräusch bei Aufladung mit AGR in Kombination mit einer Erhöhung des Einspritzdrucks

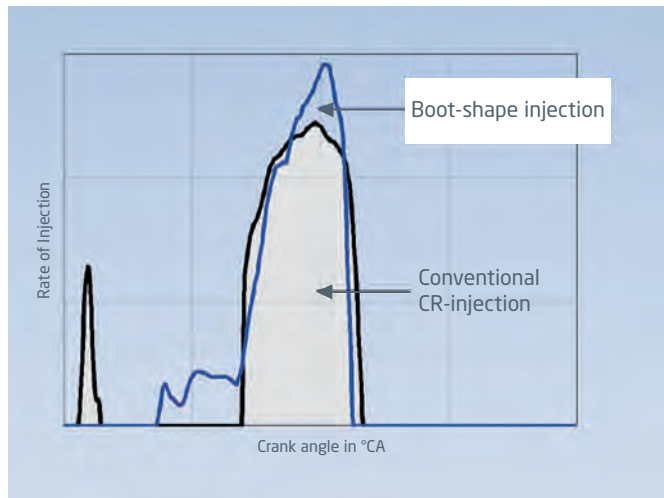


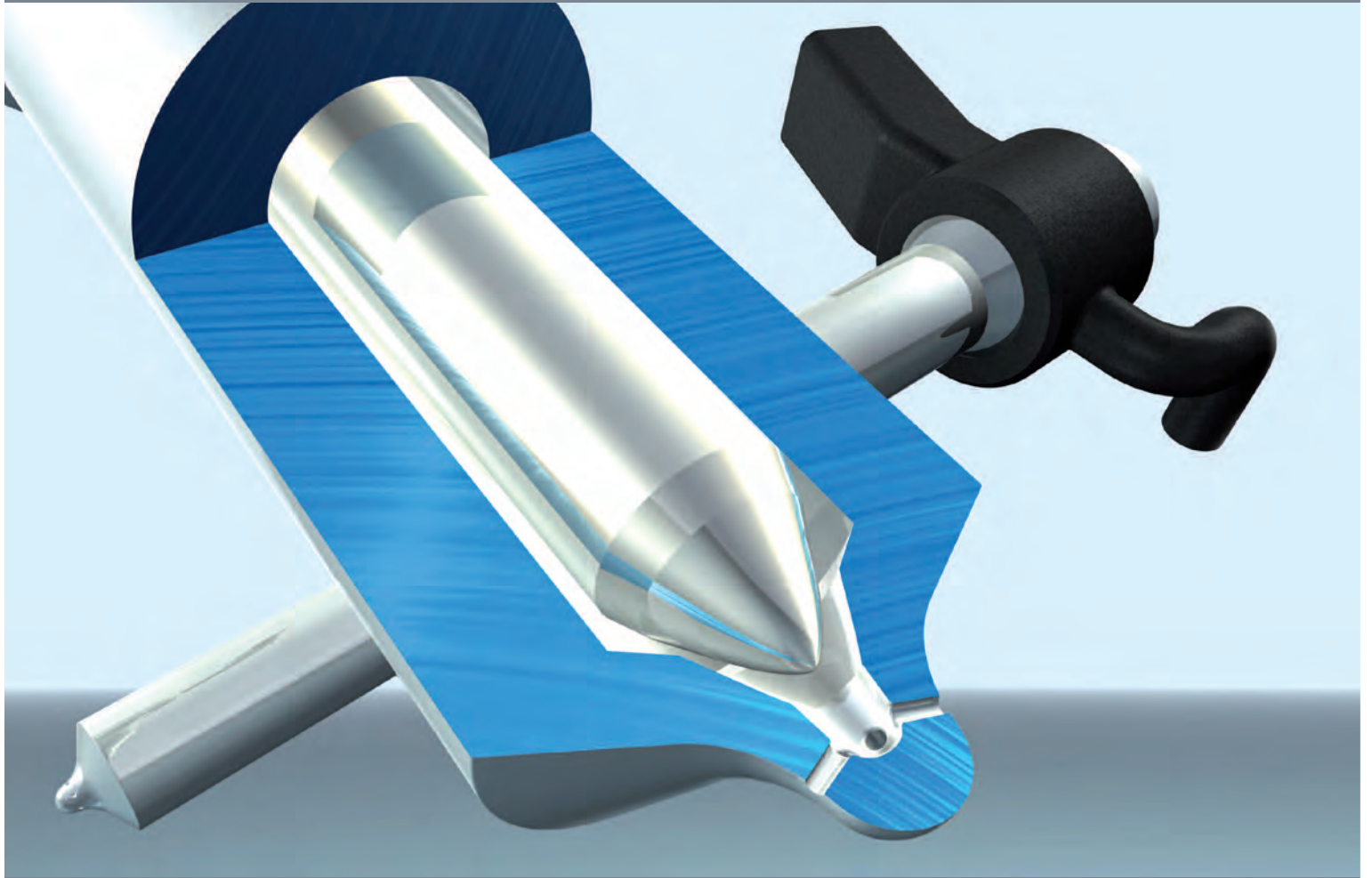
Abbildung 2: „bootförmiger“ Einspritzverlauf

---

Der gesamte Text ist nachzulesen bei:  
6. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung 2008, Berlin

Einspritzdruckbedarf für zukünftige dieselmotorische  
Pkw- und Nkw-Brennverfahren

Ralf Marohn, Dr. Sebastian Rakowski, Maximilian Brauer, Dr. Jörn Seebode,  
IAV GmbH



## Einspritzsystem und Gemischbildung

## Düsenlochformung für eine effizientere Gemischbildung

**Für drallarme Dieselmotoren ist das Einspritzsystem der Hauptgemischbildner, der weiterhin ein hohes Potenzial zur Emissions- und Verbrauchsabsenkung bietet. Bei detaillierter Betrachtung zeigt sich, dass insbesondere die Einspritzdüse entscheidend für die Gemischbildung ist. In der vorgestellten Arbeit wird, beginnend bei der Einspritzrate über die Gemischbildung und Verbrennung bis hin zur Schadstoffbildung, das Potenzial von Einspritzdüsen und insbesondere der Düsenlochform auf die Gemischbildung betrachtet.**

Über die Sauerstoffkonzentration im Brennraum kann die  $\text{NO}_x$ -Emission maßgeblich beeinflusst werden. An der erreichten Brennengrenze hat sich unter Einhaltung des minimalen  $\text{NO}_x$ -Niveaus eine deutliche Einspritzdruckerhöhung als zielführend herausgestellt. In den vorgestellten Untersuchungen werden diese klassischen Effekte gegenüber alternativen Mitteln wie einer innovativen Formung des Düsenloches und damit einer gezielten Beeinflussung der Gemischbildung abgewogen. In jüngster Zeit sind in der Fertigungstechnik Fortschritte erzielt worden, sodass neben klassischen zylindrischen und konischen Spritzlöchern auch erste Prototypen mit alternativer Lochformung hergestellt werden können.

Als Basis der Untersuchungen werden optimierte Komponenten von Serieneinspritzsystemen verwendet. Der auf einem Serienbauteil basierende CR-Injektor wird hinsichtlich seiner Druckfestigkeit verbessert. Auf Basis von Simulationsrechnungen werden die kritischen Stellen des Bauteils bereits im Vorfeld lokalisiert und entsprechend verstärkt beziehungsweise konstruktiv angepasst. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden drei Düsenformen ausgewählt, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

Die signifikanten geometrischen Düsenparameter wie zum Beispiel Spraywinkel und Strahlwurzellage wurden an das Brennverfahren des Einzylindermotors adaptiert und für die untersuchten Düsen weitestgehend konstant gehalten. Für eine separate Darstellung des

Einflusses der Düsenlochform wurde keine HE-Verrundung der Düsen vorgenommen. Der engste Strömungsquerschnitt wurde derart gewählt, dass der stationäre Durchfluss bei Nenndruck für alle Düsen gleich ist.

Die im Folgenden V1 genannte Düse weist die Form einer Venturi-Düse auf; die Querschnittsverengung befindet sich auf halber Länge des Spritzloches. Die Form der Spritzlöcher der Düsen V2 und V3 weist eine Ähnlichkeit mit einer Flaschenform auf. Dabei befindet sich der größere Querschnitt bei Düse V2 auf der Seite des Sackloches, im Gegensatz zu Düse V3, bei welcher der Austrittsquerschnitt vergrößert ist. In beiden Fällen ist der engste Querschnitt („Flaschenhals“) zylindrisch ausgeführt und weist eine Länge von circa einem Drittel des Spritzloches auf.

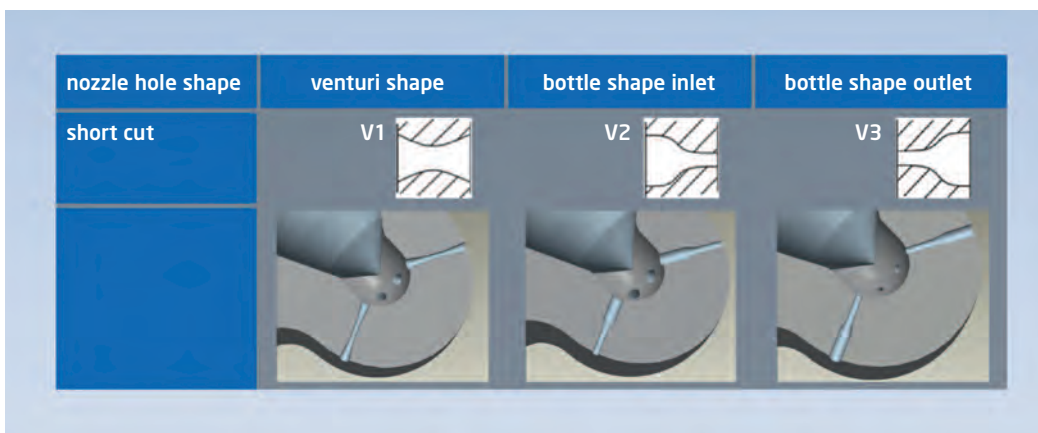


Abbildung 1: Matrix der untersuchten Düsenlochformen

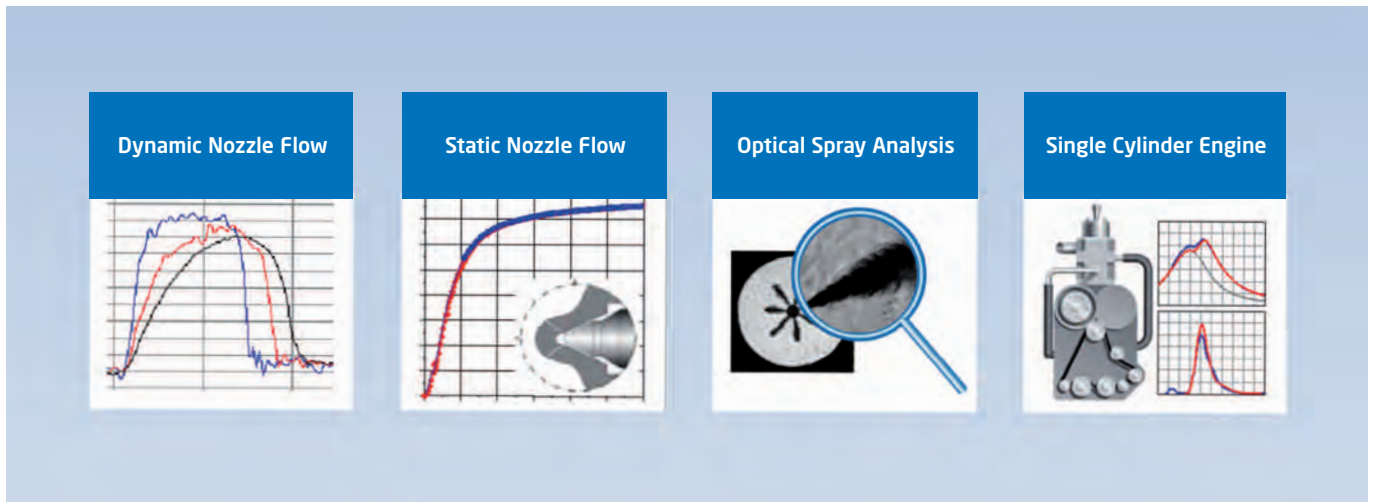


Abbildung 2: Toolkette zur Bewertung der Düsenlochmerkmale

### Toolkette zur Bewertung der Düsenlochformen

Die Bewertung der Düsenlochgeometrien wird mit einer aufeinander abgestimmten Toolkette durchgeführt. Sie besteht aus hydraulischer Systemcharakterisierung, optischer Einspritzstrahl-Diagnostik und Grundlagenuntersuchungen am Einzylindermotor (Abbildung 2).

Zur Charakterisierung der ausgewählten Düsen wurden zunächst Untersuchungen mit dem IAV Injection Analyzer vorgenommen, um die dynamischen Durchflüsse durch den Injektor für den gewünschten Betriebsbereich zu bestimmen. Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss der Düsenlochformung auf den Motorprozess möglichst separiert und unter gleichen thermodynamischen Randbedingungen zu betrachten. Hierzu wurde die Größe der Düsenlöcher derart ausgelegt, dass sich bei gleichen Druckbedingungen eine äquivalente

Einspritzdauer und -menge ergibt. Abbildung 3 (links) zeigt die Einspritzraten der drei Düsen, jeweils für die Raildrücke von 1000, 1600 und 2400 bar.

Der Düsendurchfluss wurde auf einem speziell entwickelten Prüfstand bestimmt. Hier wird der nadelhubabhängige Durchfluss mit bis zu 2000 bar gemessen. Somit konnten die Eigenschaften der Düsen und deren Kavitationsverhalten im Betriebsbereich aktueller Einspritzsysteme analysiert werden (Abbildung 4, rechts).

Die optische Einspritzstrahl-Diagnostik zur Bewertung der geometrischen Sprayparameter (etwa Strahlkegelwinkel und Strahlfrontgeschwindigkeit) erfolgte an einem Druckkammerprüfstand (Abbildung 5). Hier wird der Einspritzstrahl in einer Stickstoffumgebung bis zu einem Kammerdruck von 150 bar und einer

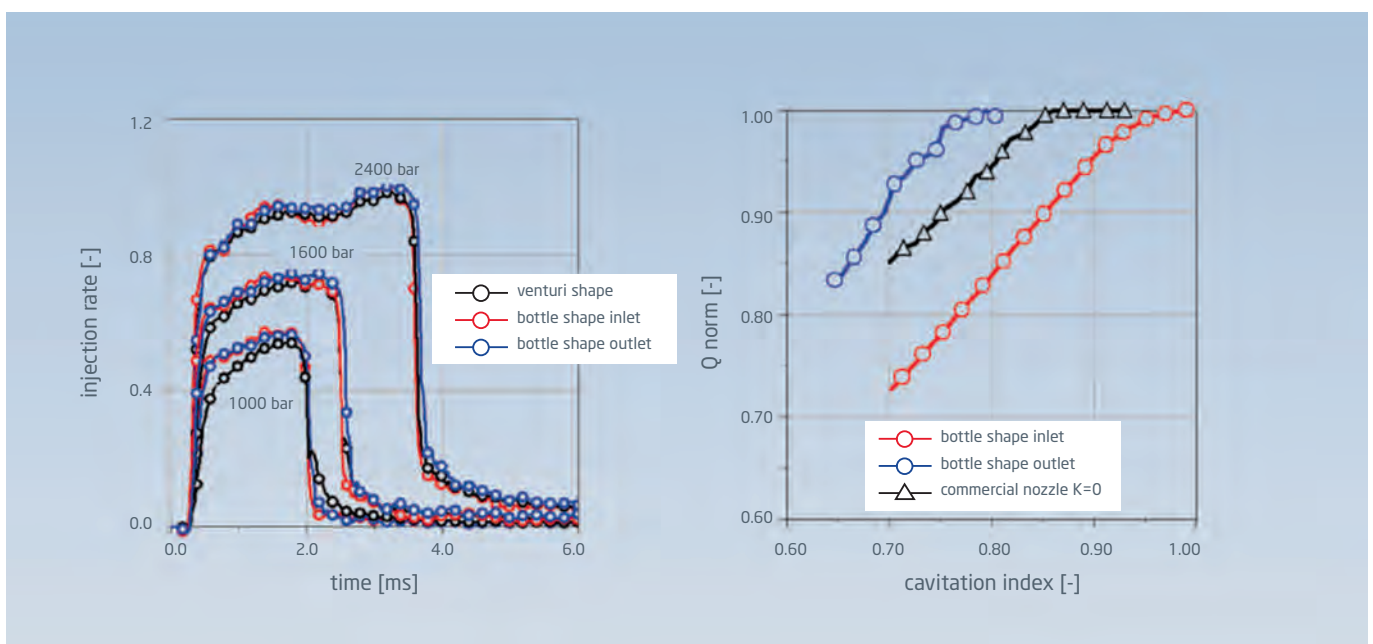


Abbildung 3 und 4: Einspritzratenverläufe sowie normierter Durchfluss der Versuchsdüsen

Temperatur von 350 °C mit der Schlierenmethode abgebildet. Die Aufnahme des Injektors ist auf 90 °C konditioniert, um den Einfluss der Bauteiltemperatur an die Einsatzbedingungen im Motor anzupassen.

Die Ergebnisse der hydraulischen Charakterisierung und der optischen Strahldiagnostik zeigen hinsichtlich der Einspritzrate ein vergleichbares, hinsichtlich der Kavitationsneigung jedoch ein unterschiedliches Verhalten. Im Vergleich der Versuchsdüsen hat V2 („bottle shape inlet“) den höchsten Kavitationsindex – sie neigt somit erst spät zu einem Düsenstutzen und weist einen tendenziell höheren Wirkungsgrad auf. Die Strahleindringtiefen und der mittlere Spraywinkel sind für V2 im Vergleich ebenfalls kleiner. Die Düsen V1 und V3 zeigen dagegen nur geringe Unterschiede.

Die Weiterentwicklung motorischer Brennverfahren erfordert ein möglichst tief greifendes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge während des Verbrennungsprozesses. Zu diesem Zweck ist eine leistungsfähige Versuchsumgebung erforderlich, mit der einzelne Motorprozessparameter in weiten Bereichen variiert und gemessen werden können. Als Basis der motorischen Untersuchungen wird ein moderner Forschungseinzelzylindermotor mit zwei Litern Zylinderhubvolumen herangezogen. Eine leistungsstarke Auslegung der gasführenden Motorperipherie (Fremdaufladung) mit simultaner, hochpräziser Regelung der Prozessgrößen Ladedruck, Abgasgegendruck, Abgasrückführrate und Ladungstemperatur sorgt ferner für exakte Rahmenbedingungen.

Die Entkopplung der Kraftstoffdruckerzeugung vom Riemenbeziehungsweise Rädertrieb ermöglicht eine einfache und zugängliche Konstruktion für Messtechnik und Wartungszwecke. Der Einfluss eines gesteigerten Energiebedarfes durch den erhöhten Einspritzdruck wird in den Untersuchungen vorerst nicht betrachtet. Im beschriebenen Versuchsbetrieb kommt eine offene W-Mulde und ein Verdichtungsverhältnis von 16:1 zur Anwendung. Bei diesem Verdichtungsverhältnis entstehen auch unter hoher Motorlast noch nennenswerte Zündverzüge. Dies lässt die Bewertung der Gemischbildungseffekte sowohl auf Vormisch- als auch auf Diffusionsverbrennung zu.

Eine unerlässliche Voraussetzung für eine kurzfristige Darstellung und Validierung von neuen Einspritz- und Verbrennungskonzepten, sei es im Fahrzeug oder wie hier im vorliegenden Fall am Einzylinder-Motorprüfstand, ist die Verfügbarkeit eines flexiblen Motor-managementsystems. Die IAV nutzt hierfür eine Reihe Werkzeuge, die maßgeblich im Rahmen des Eigenentwicklungsprojekts ADCS (Advanced Diesel Combustion System) entstanden sind. Diese flexible Entwicklungsumgebung zeichnet sich zum einen durch einen hohen Anpassungsfreiheitsgrad aus und ermöglicht zum anderen eine extrem rasche Adaption an neue technische Herausforderungen. Diese Versuchsumgebung wird im Beitrag „Entwicklungsplattform IAV-MPEC“ detailliert beschrieben und ist in Abbildung 6 dargestellt.

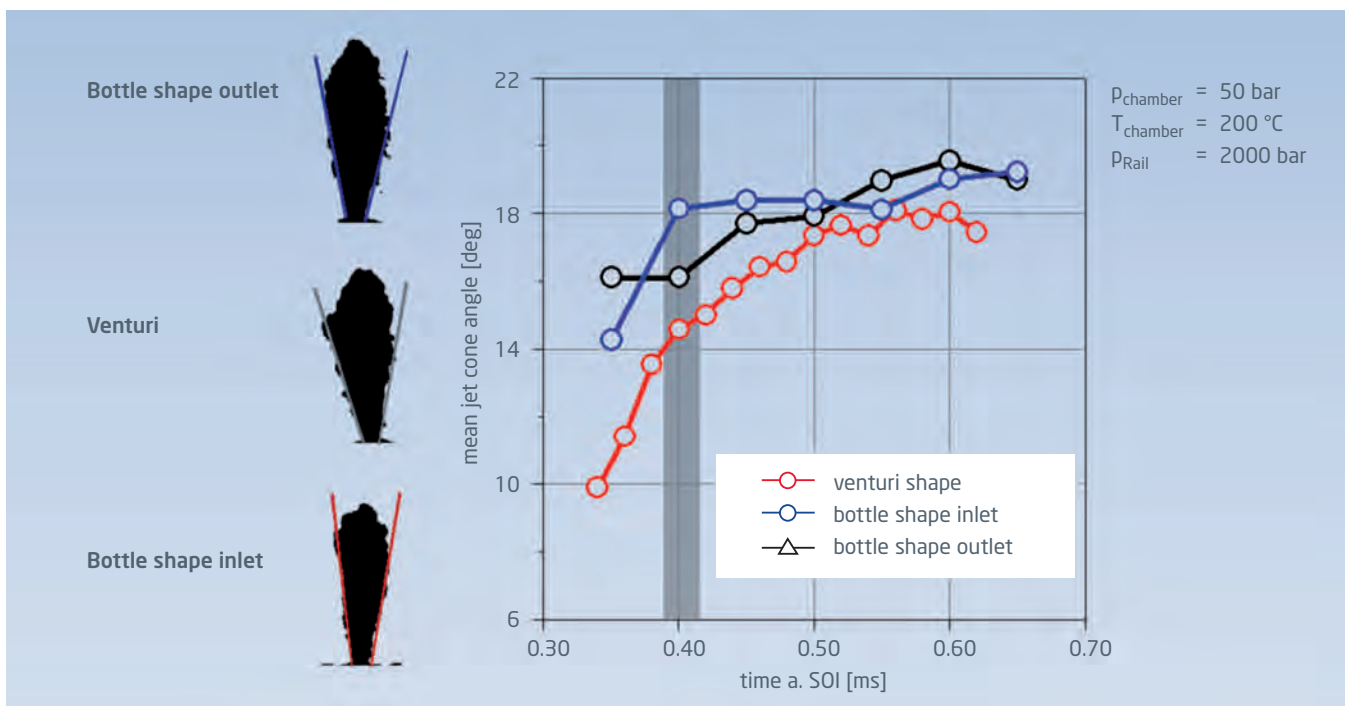


Abbildung 5: zeitlicher Verlauf des mittleren Strahlkegelwinkels der Düsen V1, V2 und V3

Die dargestellten spezifischen Emissionen und der Kraftstoffverbrauch werden auf die indizierte Leistung des Hochdruckprozesses bezogen, um den Einfluss des Aufladesystems und der Reibungsverluste zu eliminieren. Für die Bewertung thermodynamisch gleichwertiger Betriebszustände wird bei der schrittweisen Erhöhung des Einspritzdruckes von 1600 bar auf 2400 bar in äquidistanten Schritten die Verbrennungsschwerpunktlage konstant gehalten. Anhand dieser Variation werden die unterschiedlichen Düsenlochgeometrien gegenübergestellt. Exemplarisch wird zur Potenzialdarstellung ein für Off-Highway-Anwendungen emissionsrelevanter Volllastbetriebspunkt bei Nenn Drehzahl herangezogen.

## Ergebnisse

Bei Einsatz moderater Abgasrückführaten sind die Parameter Einspritzdruck und Düsenlochform von untergeordneter Bedeutung. Die Dominanz des Parameters Sauerstoffkonzentration ist hier klar ersichtlich. Unter dem Einfluss der minimalen Sauerstoffkonzentration des beschriebenen Betriebspunktes wird der Einfluss der unterschiedlichen Düsenlochgeometrien und der Einspritzdruckanhebung jedoch sehr deutlich.

Generell ist bei allen untersuchten Düsen bei nahezu neutraler  $\text{NO}_x$ -Emission eine deutliche Absenkung der Rußwerte um bis zu 75 Prozent zu beobachten. Es fällt auf, dass die Düsenlochform kaum Einfluss auf die Stickoxidbildung hat. Hingegen lassen sich deutliche Unterschiede in der Rußbildung ausmachen. Insbesondere mit dem Einsatz der Düse V3 (sich nach außen öffnende Flaschenform) lässt sich durch eine optimierte Gemischaufbereitung die Rußoxidation verbessern. In der Korrelation mit den optischen Untersuchungen zeigt die geringere Eindringtiefe und der stärkere Strahlaufbruch dieser Düsenlochform eine deutlich intensiviertere Ausnutzung der Verbrennungsluft und lässt eine verminderte Strahl-Wand-Interaktion vermuten. Generell kann gesagt werden, dass der Effekt der Einspritzdrucksteigerung dominant gegenüber der Düsenvariation ist. Gerade das Beispiel der Düse V3 zeigt jedoch, dass auch im Bereich der Spritzlochgeometrie deutliches Optimierungspotenzial vorhanden ist.

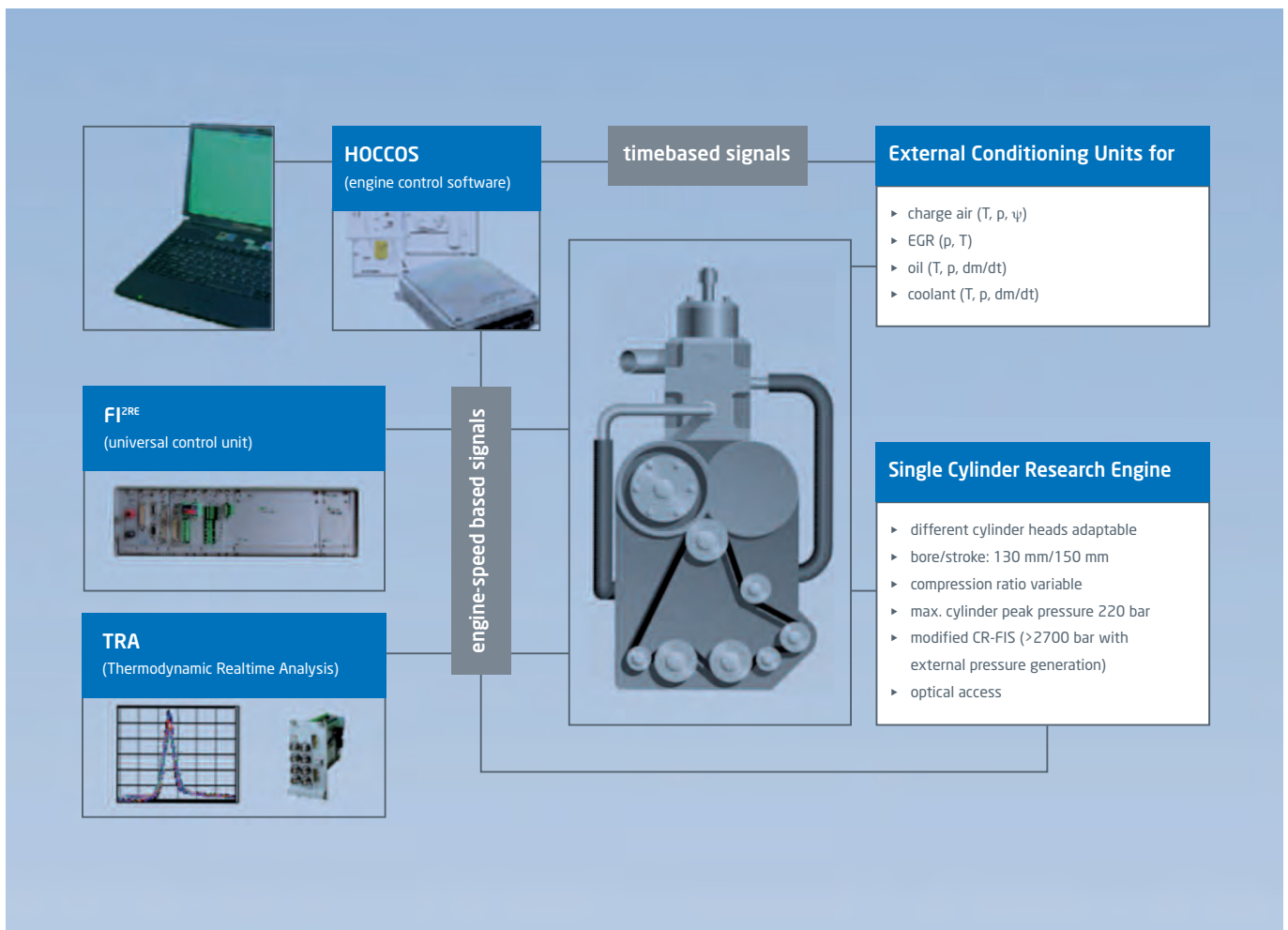


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit dem Forschungs-Einzylindermotor

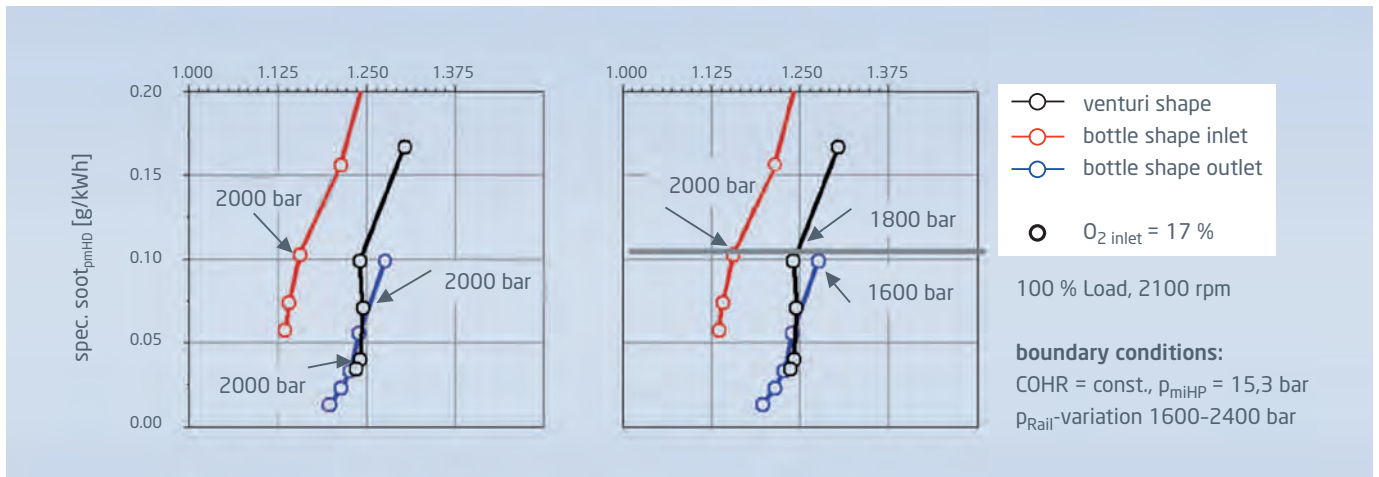


Abbildung 7: Messwerte eines emissionsrelevanten Volllast-Betriebspunktes

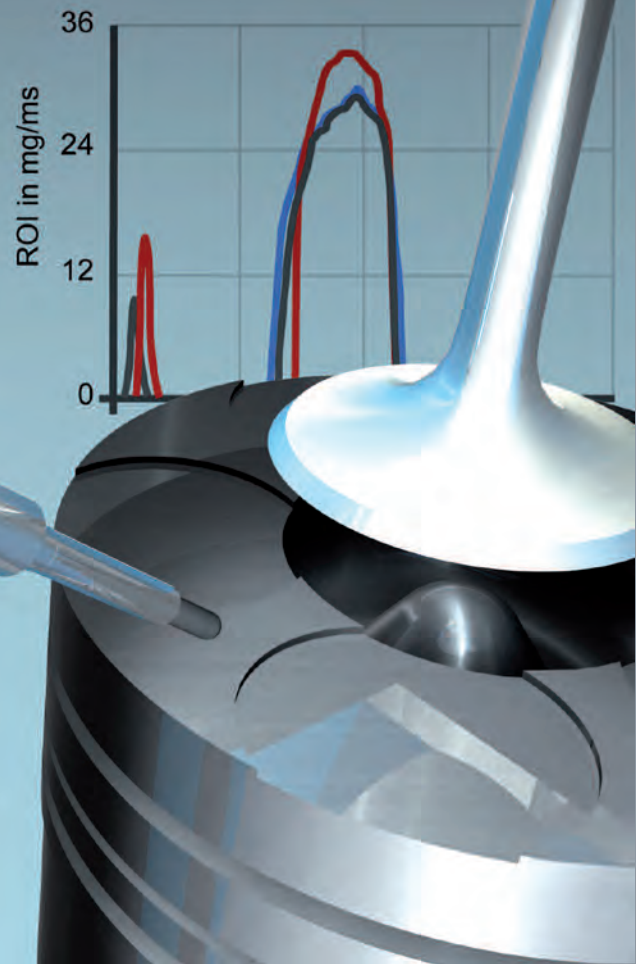
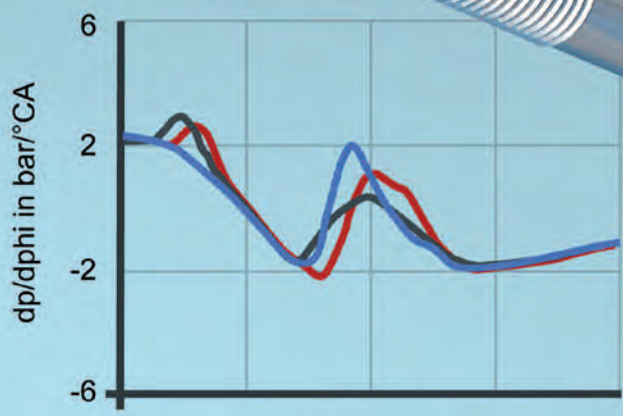
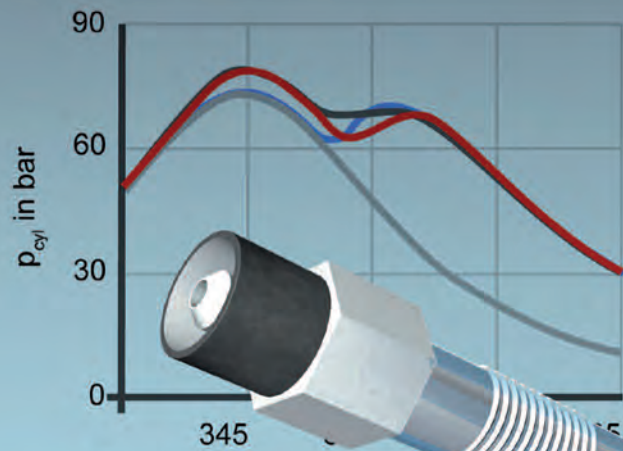
Abbildung 7 zeigt den Vergleich des  $\text{NO}_x$ -/Ruß-Verhaltens bei einer Sauerstoffkonzentration von 17 Prozent. Die prinzipiellen Vorteile einer gezielten Lochformung können auf unterschiedliche Weise genutzt werden. Wird beispielsweise, wie in der rechten Abbildung exemplarisch illustriert, ein konstantes Rußniveau von 0,1 g/kWh festgelegt, kann dies mit den unterschiedlichen Lochformen mit unterschiedlich hohem Einspritzdruck erreicht werden. Während für die nach innen öffnende Flaschenform (V2) 2000 bar Einspritzdruck benötigt werden, genügen für die Düse V3 schon 1600 bar.

Es ist an dieser Stelle zu berücksichtigen, dass bei den Verbrauchswerten rein auf den Hochdruckprozess bezogene Werte herangezogen werden. Wenn die entsprechende Einspritzpumpe vom Verbrennungsmotor mit angetrieben werden muss, ist ein deutlicher Wirkungsgradvorteil zu erwarten. Zudem sinkt die Bauteilbelastung der druckführenden Komponenten. Bei der Auslegung ist die Entscheidung zu treffen, ob der Gemischbildungsvorteil in geringere mechanische Belastung oder einen Emissionsvorteil umgesetzt werden soll. Es wird in der vorliegenden Arbeit ein deutliches Potenzial nachgewiesen, das in weiteren Optimierungsschritten noch intensiver untersucht werden wird.

Der gesamte Text ist nachzulesen bei:  
 8<sup>th</sup> International Symposium on Internal Combustion Diagnostics,  
 Baden-Baden, 10/11 Juni 2008

Einfluss der Düsenlochgeometrie auf die Gemischbildung

Ralf Marohn, Dr. Sebastian Rakowski, Dr. Jochen Maaß, Dr. Jörn Seebode,  
 IAV GmbH



## Zweidimensionale thermodynamische Analyse von Dieselmotoren Geschärfter Blick in den Zylinder

Die von der IAV entwickelte Software OPEN-TDA<sup>22</sup> 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  $\Phi, T$ -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  $\lambda, T$ -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.

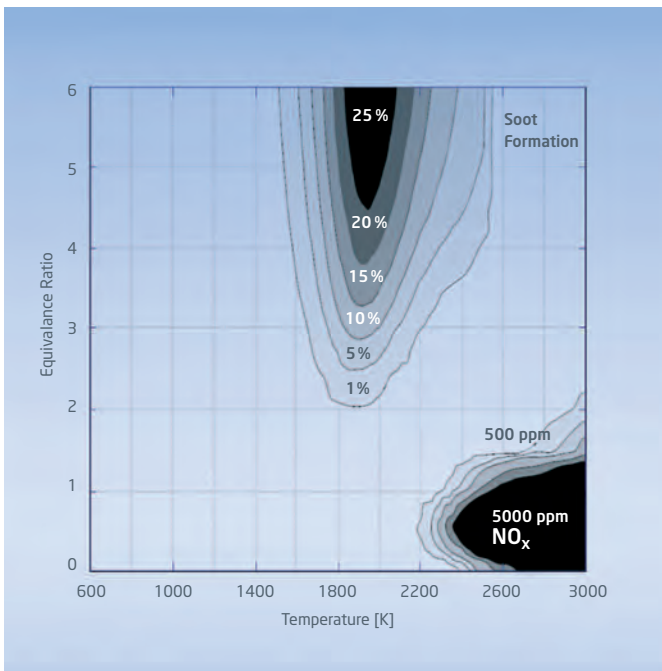


Abbildung 1: Ruß- und NO<sub>x</sub>-Bildung in Abhängigkeit von  $\Phi$  und T nach Akiyama

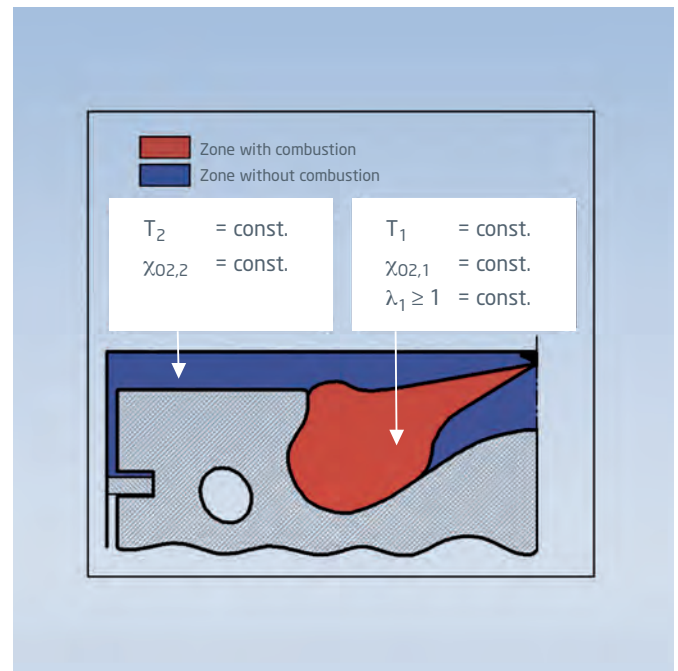


Abbildung 2: schematische Darstellung der zwei Zonen im Brennraum

Als Grundlage für die Modellierung der Größe und des Wachstums der Verbrennungszone für die OPEN-TDA<sup>22</sup> 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-

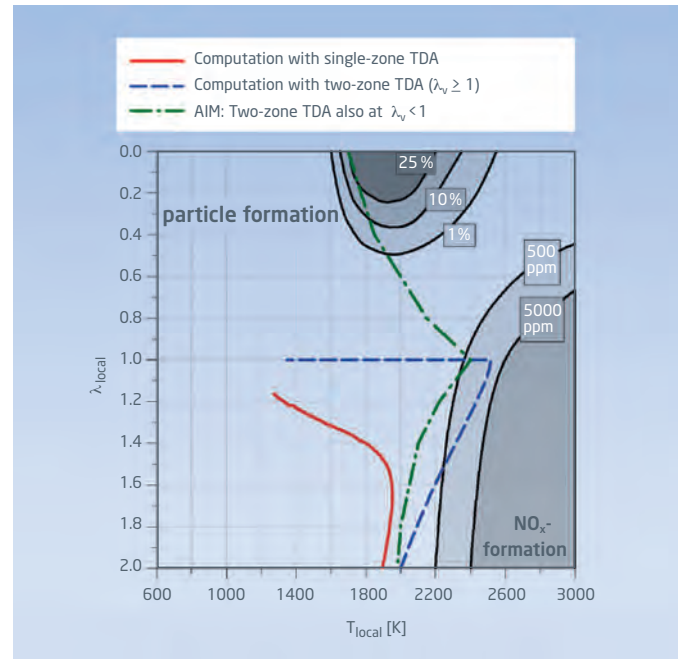


Abbildung 3: Vergleich der verschiedenen Berechnungsansätze der OPEN-TDA

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.

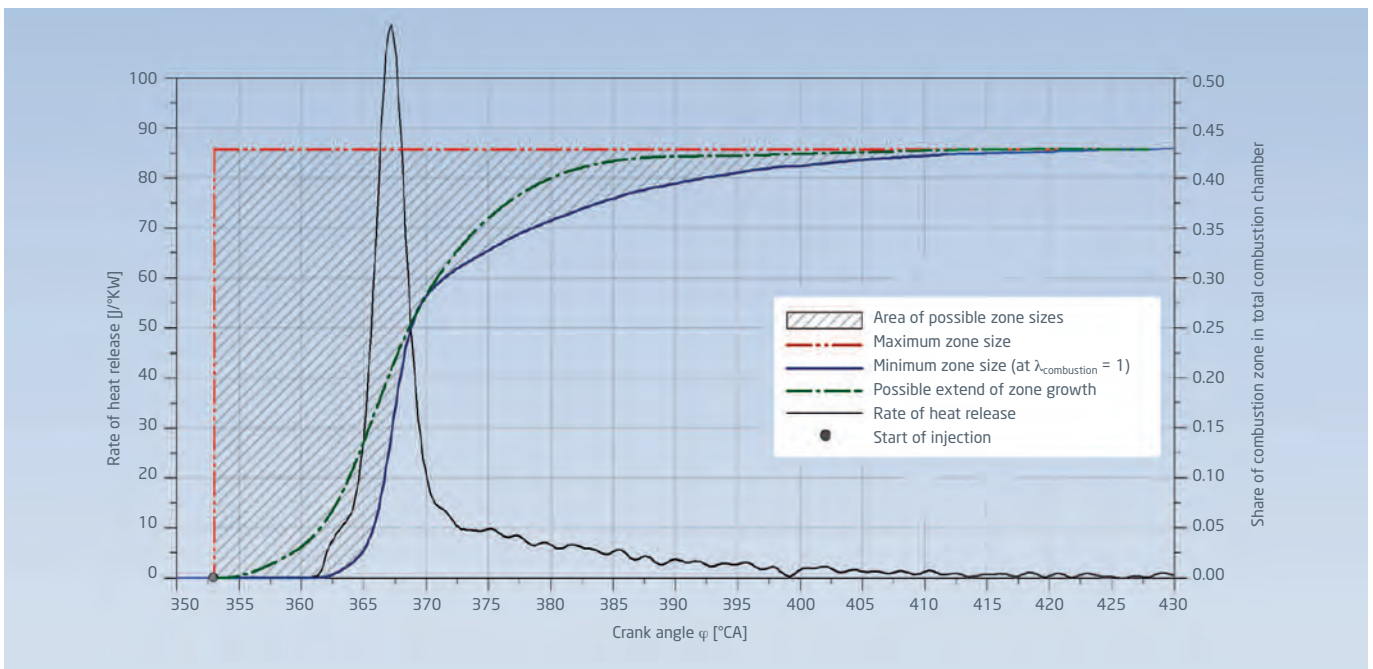


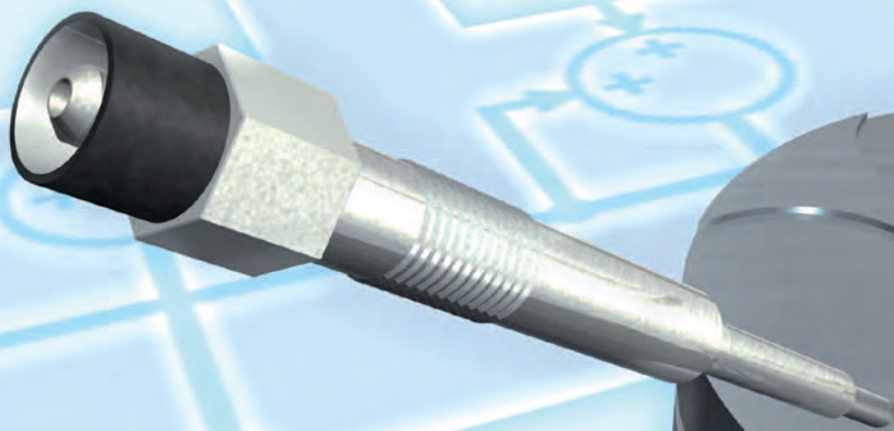
Abbildung 4: Randbedingungen bei der Modellierung des Wachstums der Reaktionszone

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-TDA<sup>22</sup> 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  $\Phi, T$ -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.

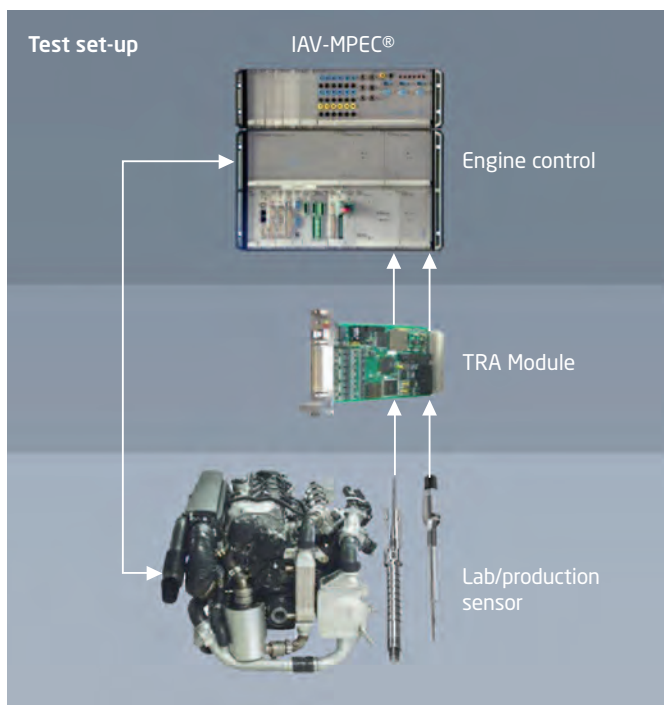


Abbildung 1: die Entwicklungsumgebung IAV-MPEC

	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<sup>2RE</sup> (Flexible Injection and Ignition for Rapid Engineering) bedient, das im IAV-MPEC integriert ist. FI<sup>2RE</sup> 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<sup>2RE</sup>. 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 Autocodegenerierung 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,

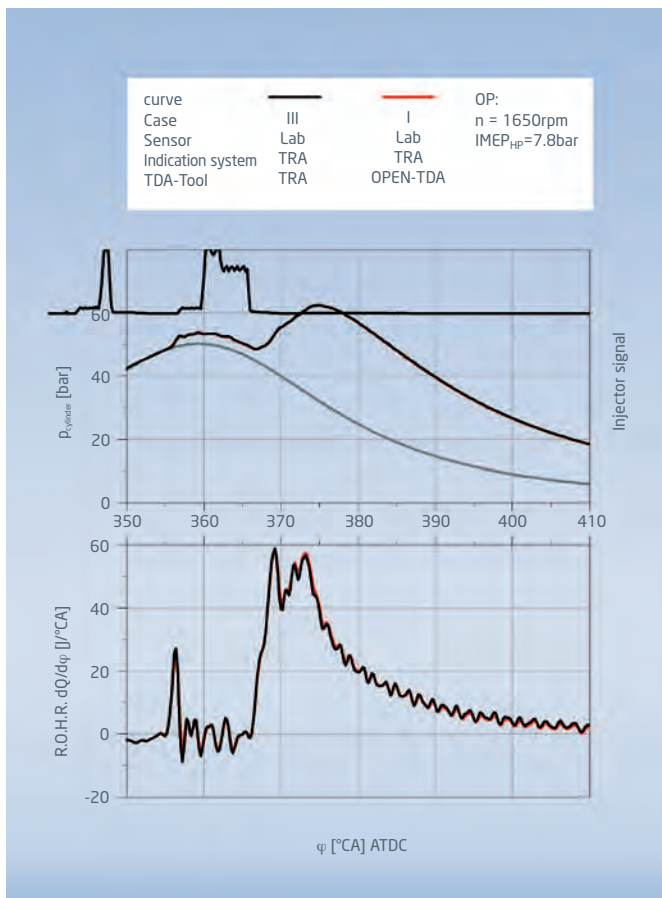


Abbildung 2: Vergleich der Online- und Offline-Algorithmen

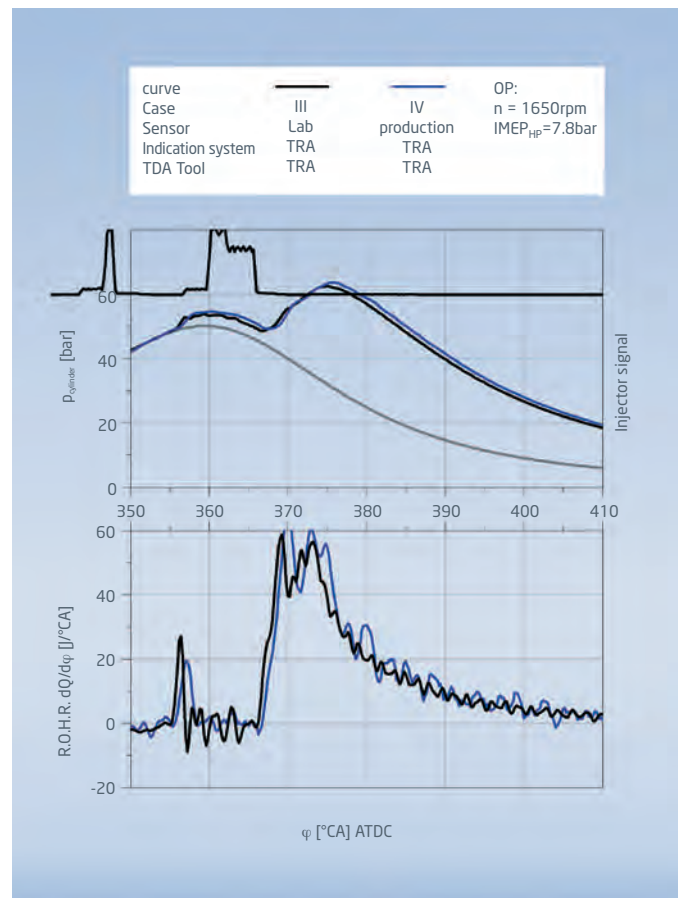


Abbildung 3: Vergleich des Labor- und des Seriensensors

Verbrennungsmerkmale von Zyklus zu Zyklus zu bestimmen und zu beeinflussen. Die Bedienung der TRA und des FI<sup>2RE</sup> erfolgt über die FI<sup>2RE</sup>-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 Steuergeräthardware, 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 Wärmefreisetzungs- menge 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 Dieselenwicklung  
[www.iav.com](http://www.iav.com)

**Verantwortlich:**

Oliver Predelli

**Redaktion:**

Marko Gustke  
Sandra Wirth

**Gestaltung und Druck:**

Zitrusblau, Berlin

**Stand:**

Frühjahr 2009