

## **5. Int. Stuttgarter Motorensymposium 18.-20. Februar 2003**

### **Brennverfahrensseitige Ansatzpunkte für Pkw-Dieselmotoren zur Erfüllung künftiger EU- und US-Abgasstandards**

#### *Combustion Process Improvements for Passenger Car Diesel Engines to Fulfill Future European and US Emission Legislations*

Jörn Kahrstedt / Jürgen Manns / Ansgar Sommer / Thorsten Wormbs,  
IAV GmbH

### **Zusammenfassung**

Ausgehend von einer Analyse der gesetzlichen Rahmenbedingungen (EU- und US-Abgasgesetzgebung) und einer Bewertung der Möglichkeiten aktiver Abgasnachbehandlung wird das Entwicklungsszenario für Pkw-Dieselmotoren unter dem Aspekt einer innermotorischen Verringerung der kritischen Schadstoffkomponenten  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  und Partikel betrachtet. Die Einführung von Partikelfiltern wirkt negativ auf die  $\text{CO}_2$ -Emission und führt so zu einem verschärften  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Zielkonflikt, welcher innermotorisch nur durch eine Gemischbildung mit einem höheren Homogenisierungsanteil in Verbindung mit einer thermodynamisch optimal gesteuerten Wärme-freisetzung zu lösen ist. In diesem Zusammenhang werden Ergebnisse der idealen homogenen Verbrennung (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) bei Teillast vorgestellt und im Hinblick auf ihr Potenzial im europäischen Fahrzyklus bewertet. Selbst bei Nutzung eines eingeschränkten Kennfeldbereiches der Teillast sind bei leichten Vorteilen im Kraftstoffverbrauch halbierte  $\text{NO}_x$ - und Partikel-emissionen zu erwarten - allerdings bei erhöhten Anforderungen an den Oxidationskatalysator. Abschließend werden Ansätze zur Realisierung dahingehend optimierter Brennverfahren vorgestellt und die Kraftstoffeigenschaften als eine wesentliche Einflussgröße dieser Entwicklung betrachtet.

### **Summary**

Based on an analysis of the legal framework (EU and U.S. emission legislation) and an evaluation of the possibilities offered by active exhaust gas aftertreatment systems, the present paper examines the development scenario for passenger car diesel engines from the aspect of a reduction of the critical pollutant components  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  and particulate matter by means of combustion process improvements. The introduction of particulate filters has a negative impact on  $\text{CO}_2$  emissions, i.e. the conflicting  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$  reduction targets are even more difficult to balance. This problem can only be solved by optimizing the mixture formation process to achieve a higher degree of homogenization in conjunction with thermodynamically optimal heat release. In this context, the paper presents ideal homogeneous combustion results (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) at part load and evaluates the results regarding their potential in terms of the European Driving Cycle. Even if only a limited range of the part load map is used, it is safe to expect that  $\text{NO}_x$  and particulate emissions will halve while fuel consumption will be slightly lower. It must be taken into consideration, however, that the demands placed on the oxidation catalyst will be higher. The last part of the paper presents approaches for realizing optimized combustion processes and evaluates fuel characteristics as an important parameter of this development.

## 1. Einleitung

Der moderne aufgeladene, direkt einspritzende Dieselmotor als Pkw-Antrieb ist im Wesentlichen deshalb so erfolgreich, weil der höhere effektive Wirkungsgrad im Vergleich zu Ottomotoren in nahezu jedem Betriebszustand vorhanden ist. Gerade bei Ausnutzung des Faktors Fahrspaß, also bei Fahrten mit hohem Dynamikanteil und/oder hoher Geschwindigkeit, werden die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch eklatant. Hierfür sind die unterschiedlichen Kraftstoffe und Brennverfahren verantwortlich. Der Betrieb des Dieselmotors mit Qualitätsregelung und permanentem Luftüberschuss sowie höherem Verdichtungsverhältnis bietet eine exzellente Ausgangsbasis für CO<sub>2</sub>-arme Antriebe der Zukunft. Allerdings sind Niedrigstmissionskonzepte mit einem Dieselmotor - im Vergleich zu bereits vorgestellten ottomotorischen SULEV-Fahrzeugen [1,2] - nur durch erhebliche Technologiesprünge realisierbar. Dieser Beitrag soll eine Übersicht geben, welche brennverfahrensseitigen Ansätze zur Erfüllung künftiger Abgasstandards erfolgversprechend sind. Die Aspekte der Abgasnachbehandlung finden insofern Berücksichtigung, da nur mit ihnen und im Zusammenspiel mit neuen Regelungsstrategien eine Optimierung des Gesamtsystems „Motor im Fahrzeug“ erfolgen kann.

## 2. Analyse der Rahmenbedingungen und Ableitung der künftigen Entwicklungsaufgaben

### 2.1 Marktsituation und ACEA-Selbstverpflichtung

Die Vereinbarung der Association des Constructeurs Européen d'Automobiles (ACEA) mit dem EU-Parlament, den Flottenverbrauch im Rahmen einer freiwilligen Selbstverpflichtung von 1995 bis 2008 um 25 % auf 140 g CO<sub>2</sub>/km zu senken, stellt vor allem im Kontext steigender Sicherheits- und Komfortansprüche eine Herausforderung dar. **Bild 1** zeigt, dass die Mindestanforderungen im Flottenverbrauch bisher erfüllt, also unterschritten werden konnten. Das ist nicht zuletzt einem steigenden Marktanteil von Dieselmotoren zu verdanken. Noch vor Mitte dieses Jahrzehnts ist die Prüfung einer ergänzenden Vereinbarung mit einem Zielwert von 120 g CO<sub>2</sub>/km bis spätestens zum Jahr 2012 zugesagt.

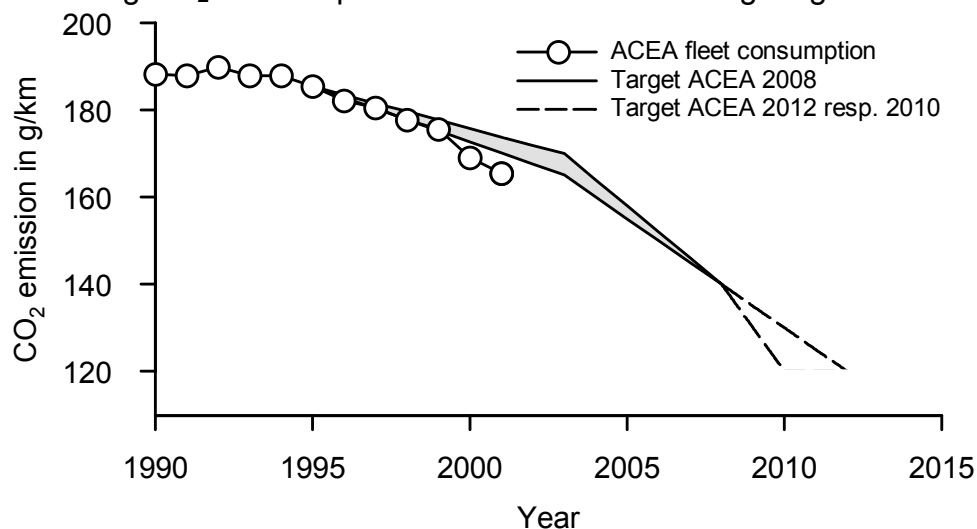


Bild 1: ACEA-Selbstverpflichtung zur CO<sub>2</sub>-Senkung – Istzustand und Zukunft

Fig. 1: ACEA-voluntary commitment to CO<sub>2</sub>-Reduction – actual state vs. future situation

Kurz- bis mittelfristig sind stärkere Beiträge zur Kraftstoffverbrauchsminderung aus neuen ottomotorischen Entwicklungen zu erwarten. Hierbei sind vor allem Direkteinspritzung, vollvariable Ventiltriebe und Downsizing-Konzepte zu nennen, auch wenn erste Serienfahrzeuge in Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch noch Optimierungsbedarf erkennen lassen.

Für den US-Markt gewinnt das Thema CO<sub>2</sub>-Senkung langsamer an Bedeutung. Hier steht klar die Einhaltung der Abgasgesetzgebung im Vordergrund, was insbesondere in den nächsten Jahren die Arbeitsfelder der Dieselmotorenentwickler prägen wird.

## 2.2 Abgasgesetzgebung für Pkw-Dieselmotoren

Die europäische Gesetzgebung verlangt für Pkw-Dieselmotoren mit der Erfüllung der EU4-Grenzwerte ab 2005 eine Halbierung der streckenbezogenen Stickoxid (NO<sub>x</sub>)- und Partikelmassenemission auf 0,25 bzw. 0,025 g/km im Vergleich zur aktuellen EU3-Norm. Der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ 2000) bleibt unverändert. Eine weitere Stufe, evtl. EU5 ab 2008, ist noch nicht beschlossen.

Auf Basis heutiger Serienmotoren in Mittelklassefahrzeugen - ohne Einsatz einer aktiven Abgasnachbehandlung - weisen die beiden genannten kritischen Schadstoffkomponenten im niedriglastigen innerstädtischen Testzyklus knapp die Hälfte vom Gesamtermissionsergebnis auf. Die Konstantfahrtgeschwindigkeit ist hier auf maximal 50 km/h begrenzt. Der außerstädtische Teil beinhaltet Konstantfahrtpunkte mit höheren Geschwindigkeiten von 70, 100 und 120 km/h. **Bild 2** zeigt das Fahrprofil des NEFZ und die kumulierten Schadstoffemissionen für NO<sub>x</sub> und Partikel eines Serienmotors in einem Fahrzeug der Mittelklasse, der die EU4-Grenzwerte bereits unterschreitet.

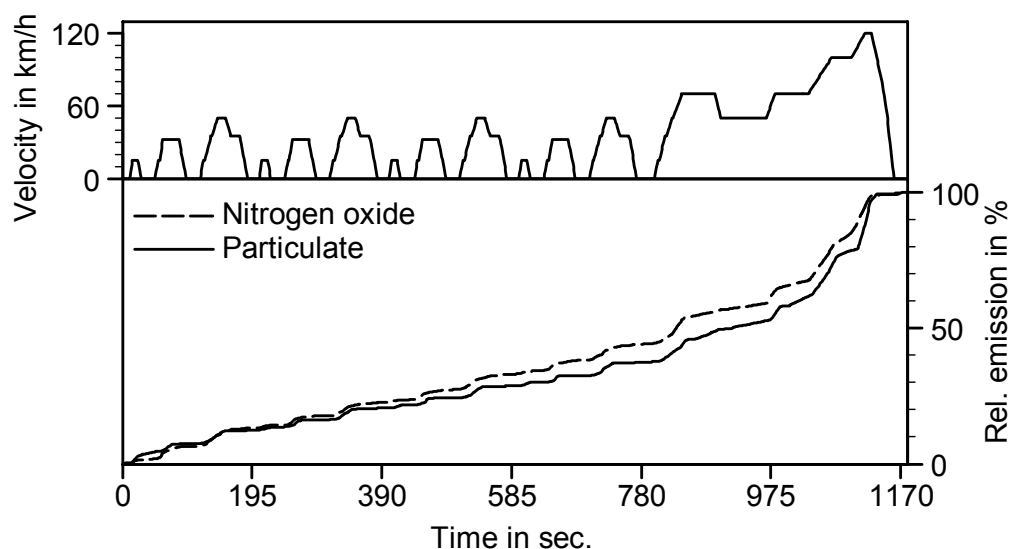


Bild 2: Kumulierte NO<sub>x</sub>- und Partikelemission eines „Best of Class“-Diesel-Mittelklasse-Fahrzeuges ohne aktive Abgasnachbehandlung im NEFZ

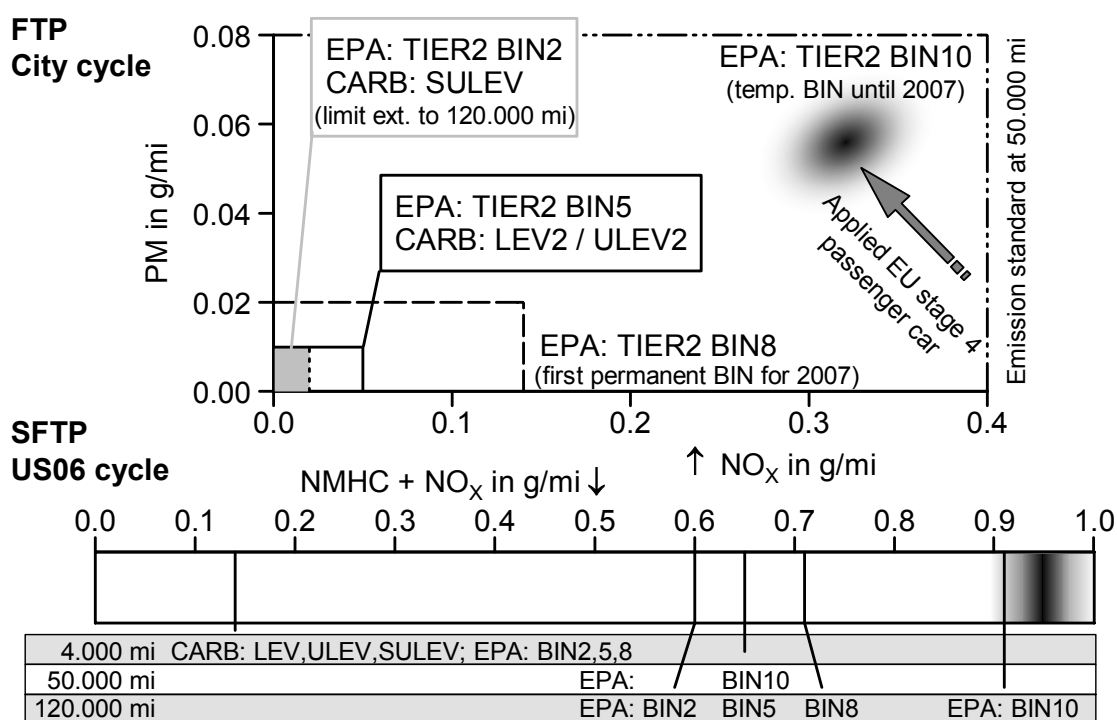
Fig. 2: Integral NO<sub>x</sub> and particulate emissions of a „best of class“ diesel-powered medium-sized car without active exhaust gas aftertreatment system in the NEDC

Auf die Darstellung der schon in der Rohemission sehr niedrigen HC- und CO-Anteile wurde hier bewusst verzichtet, da die Einhaltung der Grenzwerte für diese beiden Schadstoffe lediglich von dem Aufwand abhängt, der in die Anordnung und Auslegung der Oxidationskatalysatoren gelegt wurde.

Ganz anders ist die Situation bei Betrachtung der US-Abgasgesetzgebung für Pkw-Dieselmotoren. Hierbei ist zu unterscheiden, ob es sich um US-Bundesstaaten handelt, für welche die Regelungen der EPA (Environmental Protection Agency) oder die Vorschriften der CARB (California Air Resources Board) bestimmend sind. Beide Regelungen basieren auf den gleichen Fahrzyklen, wobei zum bekannten FTP City-Zyklus auch ein SFTP (Supplemental Federal Test Procedure), der sogenannte US06-Zyklus, abgeprüft wird. Letzterer ist wesentlich dynamischer und erreicht in den Beschleunigungsphasen - je nach Motor-Fzg.-Kombination - vollastnahe Betriebspunkte. Das Geschwindigkeitsprofil reicht bis zu 80,3 mph, also bis fast 130 km/h.

**Bild 3** zeigt die Abgasgrenzwerte des Tier2-Programms gemäß EPA in den verschiedenen Stufen (BIN) für beide Fahrzyklen. Mindestanforderung für Dieselfahrzeuge ist die Erfüllung von BIN8 ab 2007. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Einstufung ein Ausgleich durch Fahrzeuge mit besserer, d.h. niedrigerer Einstufung in der Flotte vorhanden sein muss. Um auch die Maximalforderung darzustellen, wurde die Darstellung um die ab 2007 zu 100 % gültigen Grenzwerte des LEV2-Programmes der CARB ergänzt, welche die höchste Hürde bedeuten.

Zum Vergleich mit der europäischen Gesetzgebung ist im Bild 3 ein Bereich angegeben, den die gleiche Motor-Fzg.-Kombination (vgl. Bild 2), allerdings mit angepasster Applikation, erreichen würde.



**Bild 3:** US-Abgasgesetzgebung gemäß EPA und CARB mit Einordnung eines „Best of Class“-Diesel-Mittelklasse-Fahrzeuges ohne aktive Abgasnachbehandlung

*Fig. 3: U.S. EPA and CARB emission standards with classification of a „best of class“ diesel-powered medium-sized car without active exhaust gas aftertreatment system*

Anhand der Darstellung in Bild 3 wird klar, dass sich die künftigen Entwicklungsschritte an der US-Abgasgesetzgebung ausrichten müssen, zumal der Dieselmotor im US-Markt die größten Chancen in schweren Fahrzeugen besitzt.

## 2.3 Perspektiven durch Abgasnachbehandlung

Auch wenn einige Dieselmotoren relativ kleinen Hubvolumens in Fahrzeugen bis zur Mittelklasse schon heute die europäischen EU4-Grenzwerte mit und ohne Partikelfilter unterschreiten, kommt der Abgasnachbehandlung aufgrund der vorangegangenen Betrachtung eine immer stärkere Bedeutung zu. Zum Einen werden Partikelfilter von verschiedenen Interessengruppen für alle Fahrzeuge mit Dieselmotoren gefordert, zum Anderen ist die Erreichung der Grenzwerte für  $\text{NO}_x$  allein innermotorisch problematisch. Konventionelle innermotorische Ansätze zur  $\text{NO}_x$ -Minderung stehen - gerade in Verbindung mit dem Einsatz von Partikelfiltern - im Gegensatz zur Forderung nach geringerem  $\text{CO}_2$ -Ausstoß [3]. Daher sind kombinierte Abgasnachbehandlungssysteme, z.B. „Diesel Particulate and  $\text{NO}_x$  Reduction“ Systems (DPNR), durchaus sinnvoll, wenn sie, mit Blick auf Kraftstoffverbrauch, Kosten und Dauerhaltbarkeit, realisierbar sind [4,5].

**Bild 4** zeigt die Potenziale bei Verwendung eines Partikelfilters (DPF) und eines DPNR-Systems, für welches verschiedene Entwicklungsstufen angenommen wurden (Gen. 1, 2 und 3 mit einer maximalen  $\text{NO}_x$ -Speicherfähigkeit von 55% über 80% auf 95%, Angaben bezogen auf einen optimalen Temperaturbereich).

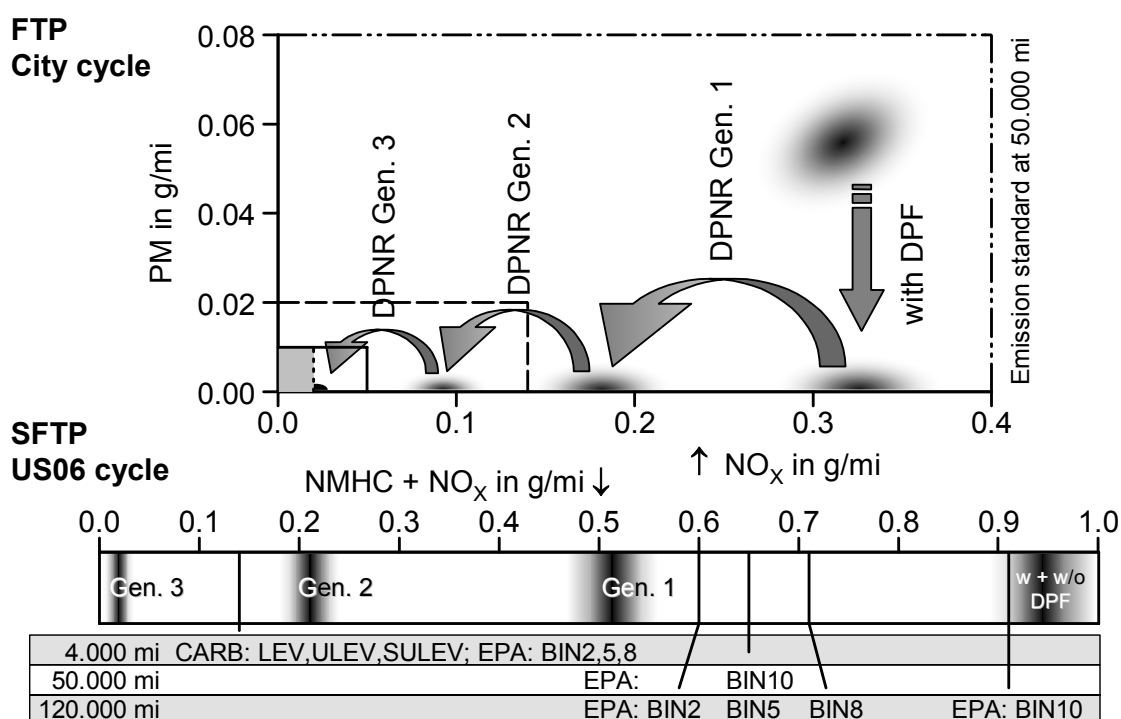


Bild 4: Potenziale von aktiven Abgasnachbehandlungssystemen am Beispiel der US-Abgasgesetzgebung

Fig. 4: Potentials of active exhaust gas aftertreatment systems in relation to U.S. emission standards

Es ist unstrittig, dass aktive Abgasnachbehandlungssysteme einerseits durch die Anforderungen für die Einleitung und Durchführung der Regeneration und andererseits durch die systembedingte Zunahme des Abgasgegendrucks den Kraftstoff-

verbrauch im ersten Ansatz erhöhen. Ein Partikelfilter allein bringt aber keine Möglichkeit, den Nachteil im Kraftstoffverbrauch zu kompensieren, da der Weg über eine wirkungsgradgünstigere Motorabstimmung insgesamt nochmals zu Lasten der  $\text{NO}_x$ -Emission gehen würde. Insofern ist ein DPNR-System zu bevorzugen, auch wenn hier die Konvertierungsraten insgesamt bisher nicht zufriedenstellend sind. Selbstverständlich kann die  $\text{NO}_x$ -Problematik besser durch einen Katalysator mit höchster  $\text{NO}_x$ -Konvertierung, z.B. durch den Einsatz von Additiven, gelöst werden, was im Nutzfahrzeugbereich sogar die bevorzugte Lösung sein wird [6]. Im Pkw-Segment sollten jedoch vorrangig alle innermotorischen Maßnahmen ausgenutzt werden.

### 3. Weiterentwicklung des dieselmotorischen Brennverfahrens

Die Konsequenzen der in Kapitel 2 angestellten Überlegungen sind:

- Mit Partikelfiltern allein sind künftige Abgasstandards über das Jahr 2005 hinaus aus heutiger Sicht nicht einzuhalten.
- Die Erfüllung der Forderung nach einer Absenkung des Kraftstoffverbrauches wird durch den Einsatz von Partikelfiltern erschwert.
- Auch bei Einsatz von  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysatoren kann der Dieselmotor auf Basis heutiger Brennverfahren motorseitig nicht  $\text{CO}_2$ -minimal betrieben werden, da die starke Erhöhung der  $\text{NO}_x$ -Rohemission häufigere Regenerationsphasen nach sich ziehen würde, die zusätzlichen Kraftstoffverbrauch verursachen.
- Jeder Beitrag zur innermotorischen Lösung des  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Zielkonfliktes entlastet die Abgasnachbehandlung, solange kein signifikanter Anstieg der Partikelemission zu verzeichnen ist.

Im folgenden Teil wird insbesondere auf den letzten Punkt der vorangegangenen Aufzählung eingegangen.

#### 3.1 Analytische Betrachtung des $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Zielkonfliktes

Unter der Annahme, dass Partikelfilter zuerst bei größeren Dieselmotoren in schweren Fahrzeugen zwingend erforderlich sind und dann nach und nach bei allen Dieselmotoren eingesetzt werden, wird sich „aus innermotorischem Blickwinkel“ der  $\text{NO}_x/\text{Ruß}$ -Zielkonflikt zur Erfüllung künftiger Abgasstandards in einen  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Zielkonflikt unter Berücksichtigung der Einhaltung sinnvoller Rußgrenzen wandeln. **Bild 5** zeigt die wesentlichen innermotorischen Ansätze zur Lösung des  $\text{NO}_x/\text{CO}_2$ -Zielkonfliktes.

Es steht fest, dass eine Absenkung der lokalen Verbrennungstemperatur in Verbindung mit einem durch Abgasrückführung reduzierten Angebot an Sauerstoff die Stickoxid-Bildung erheblich verringern kann. Idealerweise ist eine homogene Gemischbildung erstrebenswert, welche auch die Partikelproblematik vollständig lösen würde. Zusammen mit einer relativ schnellen Wärmefreisetzung zum thermodynamisch günstigen Zeitpunkt kommt man zwangsläufig auf die homogene Dieselverbrennung.

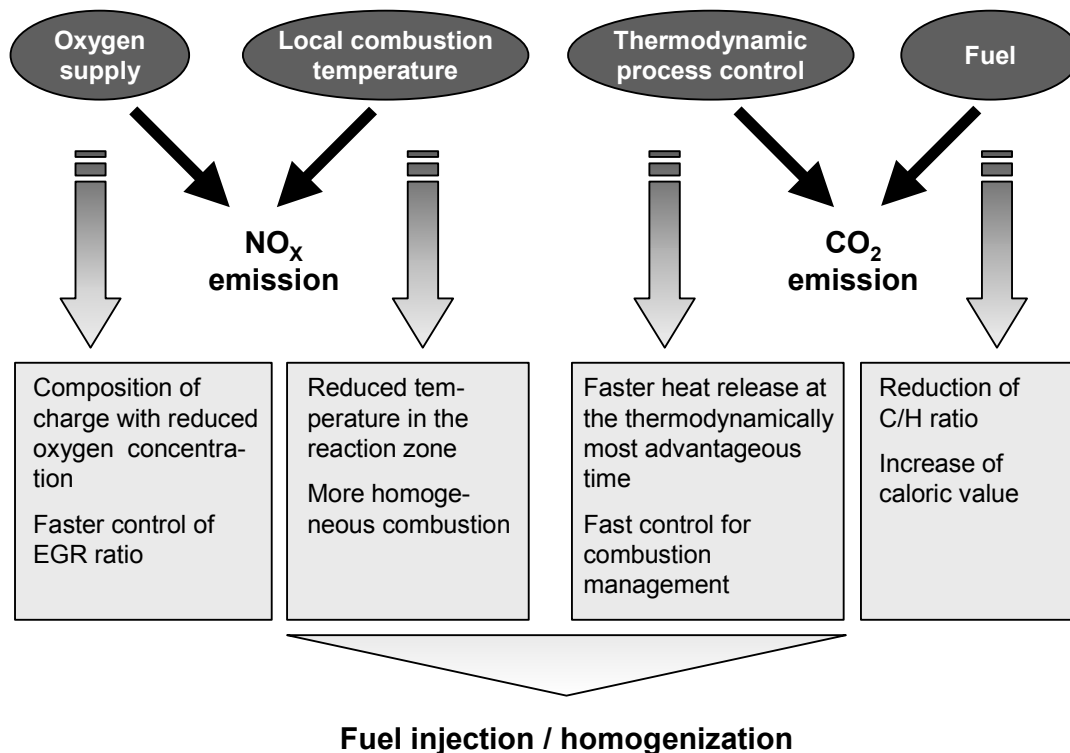


Bild 5: Innermotorische Ansätze zur Lösung des NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>-Zielkonfliktes von DI-Dieselmotoren

Fig. 5: Combustion process improvements to balance conflicting NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> reduction targets of DI diesel engines

Die bei konventioneller Einspritzung unzureichenden Verdampfungseigenschaften des Dieselmotorkraftstoffes in Verbindung mit seiner relativ hohen Zündwilligkeit stellen allerdings das größte Problem für eine verbesserte Kraftstoffaufbereitung dar.

### 3.2 Potenzial idealer homogener Verbrennung (HCCI)

Da sich das Prinzip Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) derzeit großen Interesses erfreut, erscheint es den Autoren wichtig, vor den nachfolgenden Betrachtungen die Begriffsdefinitionen zu klären und einen kurzen Überblick über einige der in den diversen Veröffentlichungen verwendeten Bezeichnungen zu geben.

#### 3.2.1 Merkmale homogener Verbrennung sowie Begriffsdefinitionen

Die Selbstzündung homogener Gemische durch Kompression ist seit vielen Jahrzehnten Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [7,8]. Zahlreiche Veröffentlichungen haben sich mit dieser Thematik beschäftigt – allerdings mit sehr unterschiedlichen Motoren und Kraftstoffen. Daher gibt es auch verschiedenste Zielstellungen und Lösungsansätze, die hier nicht im Detail wiedergegeben werden können.

Eines bleibt jedoch allen Ansätzen gleich: Gelingt es, ein homogenes Gemisch durch Selbstzündung mit einem moderaten Brennverlauf vollständig zu verbrennen, entfallen alle unangenehmen Eigenschaften ottomotorischer und dieselmotorischer Verbrennung. Auch die Verbrennung wird im Idealfall nahezu „homogen“ und weist keine lokal hohen Temperaturen auf. Anders als bei Fremdzündung in der Flammfront oder bei Selbstzündung in den Reaktionszonen der diffusionsgesteuerten Verbrennung werden die  $\text{NO}_x$ -Bildungstemperaturen nicht erreicht, weil die Verbrennung nahezu zeitgleich an allen Orten des Brennraums abläuft.

Die Folge ist eine  $\text{NO}_x$ - und rußfreie Verbrennung, deren Wirkungsgrad im Wesentlichen vom Zeitpunkt bzgl. Kurbelwinkel, von der Verbrennungsdauer und vom Umsetzungsgrad abhängt. Aufgrund der relativ schnellen Wärmefreisetzung ist die darstellbare Motorlast allerdings begrenzt, da sich nur magere Gemische, bevorzugt mit einem erheblichen Abgas- bzw. Restgasanteil, für diese Form der Verbrennung eignen.

Mit Blick auf den Dieselmotor wird ein Grundproblem deutlich: Eine homogene Verbrennung setzt eine homogene Gemischbildung voraus, wenn nicht global im gesamten Brennraum, so doch in den Bereichen des Brennraums, in denen sich Kraftstoff befindet. Insofern ist die Umsetzung des Grundprinzips „Homogeneous Charge Compression Ignition“ (HCCI) in Verbindung mit Dieselmotorkraftstoff eine besonders anspruchsvolle Aufgabe. Da der Begriff HCCI natürlicherweise keinen Bezug zum Kraftstoff oder zum Motortyp beinhaltet, wird in der jüngeren Vergangenheit auch Diesel HCCI Combustion oder Homogeneous Charge Diesel Combustion (HCDC), im Deutschen Homogene Dieselmotorverbrennung (HDV), verwendet. Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) eignet sich in diesem Kontext besser, um den erforderlichen höheren Vormischungsanteil bei Direkteinspritzung von Dieselmotorkraftstoff zu beschreiben.

In der ottomotorischen „HCCI-Welt“ hat sich der Begriff Controlled Auto-Ignition (CAI) durchgesetzt, auch vollständig als Gasoline CAI Combustion bezeichnet.

Schon vor über zwanzig Jahren wurde das gleiche Grundprinzip Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) bei 2-Takt-Motoren genannt [9]. Auch die Bezeichnungen Activated Radicals (AR) oder Activated Radical Combustion (ARC) stammen aus Entwicklungen an 2-Takt-Motoren, in diesem Fall für Motorräder.

Die Unterschiede der diversen Entwicklungsarbeiten bestehen in den verschiedenen Ladungszusammensetzungen (Kraftstoff, Frischluft, Abgas) und thermodynamischen Randbedingungen, die den Ablauf der Selbstzündung entscheidend beeinflussen.

Nach dieser kurzen Übersicht werden im Folgenden Ergebnisse vorgestellt, die an einem modifizierten Dieselmotor im HCCI-Betrieb gewonnen wurden und zur Potenzialabschätzung genutzt werden können.

### 3.2.2. Emission und Kraftstoffverbrauch im HCCI-Betrieb

Für die Darstellung eines HCCI-Betriebes wurde ein Betriebspunkt der unteren Teillast mit einer Drehzahl von  $1600 \text{ min}^{-1}$  gewählt, der für den innerstädtischen Teil des NEFZ relevant ist. Da eine vollständig homogene Gemischbildung mit Direkteinspritzung von Dieselmotorkraftstoff auch bei einem leicht abgesenkten Verdichtungsverhältnis nur mit Zusatzmaßnahmen erreichbar ist, sind hier sowohl Modifikationen im Kraftstoff als auch äußere Gemischbildung mit Ansaugluftkonditionierung zum Einsatz gekommen.

**Bild 6** zeigt die Motorbetriebswerte und die Auswertung der Zylinderdruckindizierung für dieselmotorische und homogene Verbrennung in der unteren Teillast [10].

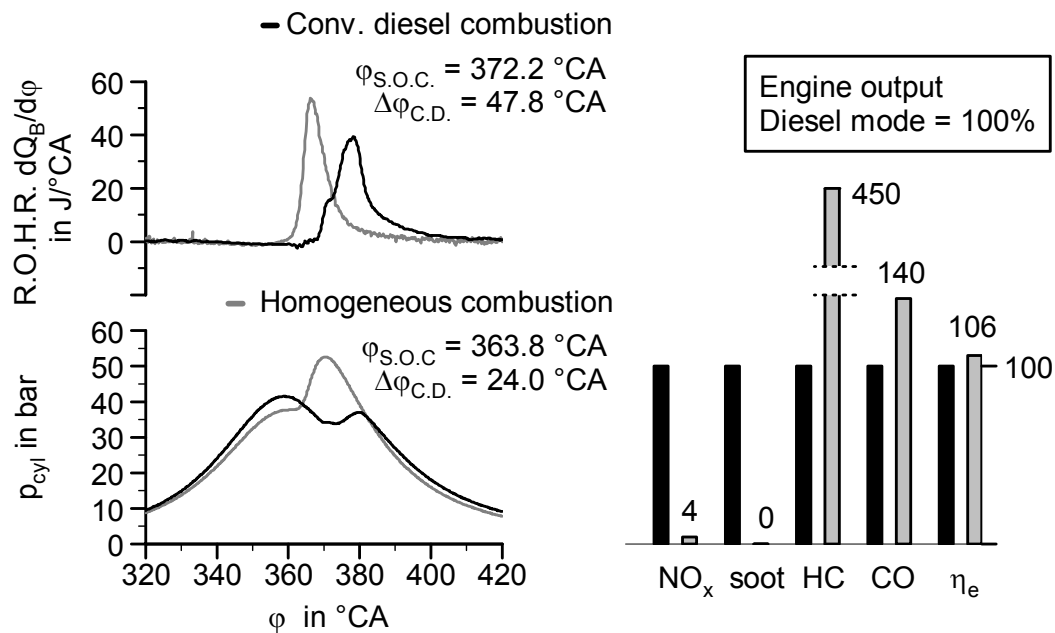


Bild 6: Homogene Verbrennung (HCCI) im Vergleich zum emissionsoptimierten, dieselmotorischen Betrieb (untere Teillast)

Fig. 6: Homogeneous combustion (HCCI) vs. emission optimized diesel combustion (at low part load)

Die für den dieselmotorischen Betrieb mit dem Ziel niedriger  $\text{NO}_x$ - und Rußemission gewählte Abstimmung mit relativ später Haupteinspritzung und hoher Abgasrückführ-rate führt zu einer thermodynamisch ungünstigen, verschleppten Verbrennung. Bei homogener Verbrennung hingegen setzt die Wärmefreisetzung bereits kurz nach Zünd-OT mit deutlich größeren Umsatzraten ein. Infolge vollständiger Gemisch-homogenisierung und Kompressionszündung sind die Zündherde über den gesamten Brennraum verteilt und es ergibt sich ein nahezu gleichmäßiges räum-liches Temperaturprofil. Da die Spitzentemperatur der Verbrennung dabei deutlich unter der Temperatur signifikanter  $\text{NO}$ -Bildung bleibt, erreicht die  $\text{NO}_x$ -Emission lediglich 4 % der ohnehin schon geringen Emission des dieselmotorischen Betriebs. Eine Rußemission ist aufgrund der überstöchiometrischen Verbrennung der voll-ständig homogenisierten Ladung nicht nachweisbar.

Die Verschiebung der Verbrennung nach früh in Verbindung mit der kürzeren Brenndauer führt zu einem Wirkungsgradvorteil bei homogener Verbrennung von 6% gegenüber dem emissionsoptimierten dieselmotorischen Betrieb.

Der Anstieg der  $\text{CO}$ - und vor allem der  $\text{HC}$ -Emission - allerdings von sehr niedrigem Niveau ausgehend - hängt mit dem Übergang von strahlgeführter zu homogener Gemischbildung und Verbrennung zusammen, womit zwangsläufig neben den Einbußen im Umsetzungsgrad auch höhere Wandwärmeverluste zu verzeichnen sind.

Das Potenzial der homogenen Verbrennung ist mit den hier dargestellten Ergebnissen verdeutlicht. Die im Zusammenhang mit der veränderten Verbrennungs-führung entstehenden Aufgaben stellen hohe Anforderungen an die künftige Ent-wicklung (vgl. Bild 5).

### 3.2.3 Potenzialabschätzung für den europäischen Fahrzyklus (NEFZ)

Um die Auswirkungen eines realen HCCI-Betriebs im NEFZ abzuschätzen, ist es notwendig, einige Annahmen zu treffen. Der Testzyklus startet nach der vorangegangenen Fahrzeug-Konditionierung auf einem Temperaturniveau von etwa 25 °C. Aus heutiger Sicht ist es sinnvoll, den HCCI-Betrieb erst kurz nach dem Start über geeignete Maßnahmen in der Motorsteuerung innerhalb eines gewissen Kennfeldbereichs zu realisieren. Hierzu empfiehlt es sich, bzgl. Verbrennungsstabilität und Dynamikfähigkeit geeignete neue Führungsgrößen (z.B. aus Temperatur, Ladedruck und Ladungszusammensetzung im Brennraum) zu definieren.

**Bild 7** zeigt im oberen Bildteil die Kennfeldbereiche, die für die zyklusbasierte Hochrechnung mit optimierten  $\text{NO}_x$ - und Partikelemissionen zu Grunde gelegt wurden. Der Bereich sehr geringer Lasten ist gegenüber heutigen Dieselmotoren durch eine verbesserte, aber nicht ideale Homogenisierung gekennzeichnet, die hier als „Teilhomogenisierung“ bezeichnet wird. Ein nahezu idealer HCCI-Betrieb ist in diesem Bereich aufgrund niedriger Temperaturen im Brennraum in Verbindung mit zwangsläufig hoher Ladungsverdünnung nicht vorteilhaft. Dennoch sind hier schon heute Emissionsvorteile, annähernd vergleichbar zur idealen homogenen Verbrennung, möglich (s. Kap. 3.3).

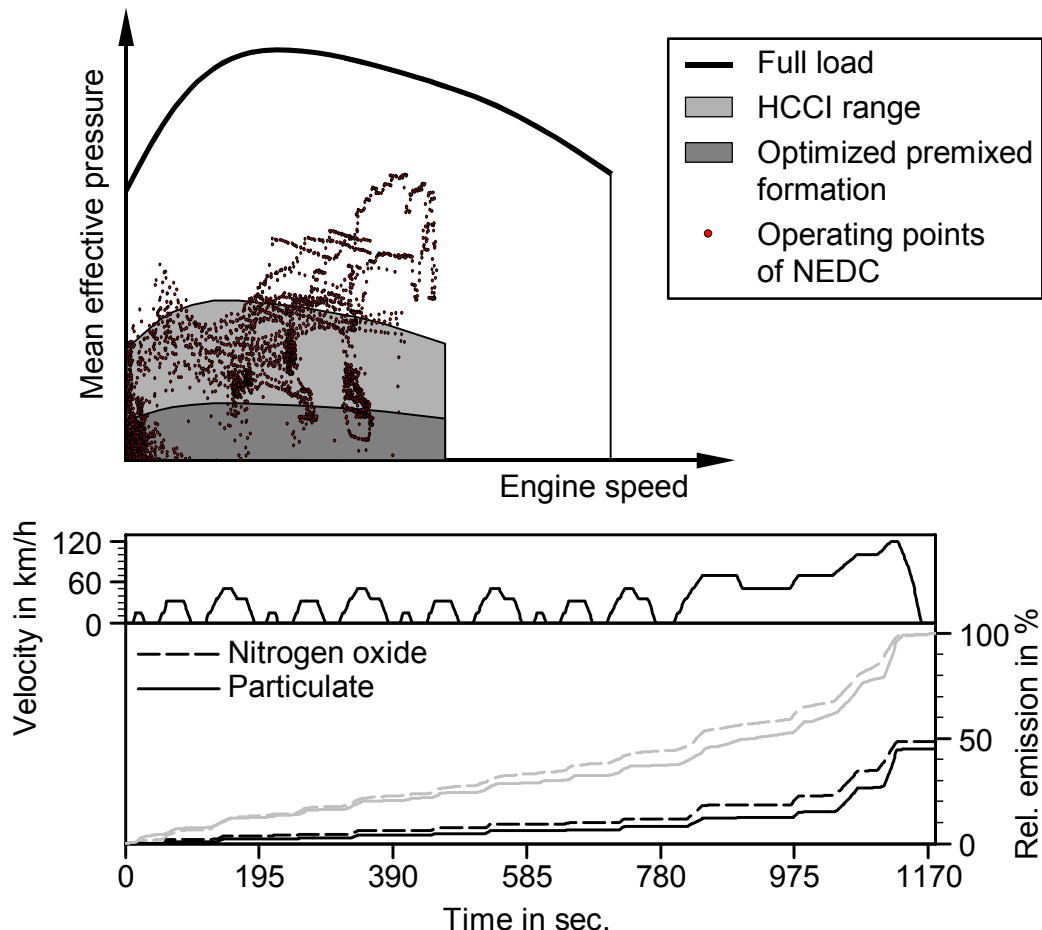


Bild 7: Kumulierte  $\text{NO}_x$ - und Partikelemission (berechnet) bei in der Teillast opt. Verbrennung (vgl. Bild 2) ohne aktive Abgasnachbehandlung im NEFZ

Fig. 7: Integral  $\text{NO}_x$  and particulate emissions (calculated) in case of optimized combustion at part load (vs. Fig. 2) without active exhaust gas aftertreatment system in the NEDC

Es wird weiterhin angenommen, dass außerhalb der gekennzeichneten Kennfeldbereiche dem Fahrprofil mit unverändertem dieselmotorischen Brennverfahren gefolgt wird.

Der untere Teil des Bildes 7 zeigt, dass eine Halbierung der  $\text{NO}_x$ - und Partikelemissionen bei Umsetzung optimierter Brennverfahren im angegebenen Kennfeldbereich erreicht werden kann. Der damit verbundene, deutliche Anstieg der HC- und CO-Emissionen (vgl. Bild 6) muss über geeignete Maßnahmen am Oxidationskatalysator kompensiert werden. Die grafisch hier nicht dargestellte  $\text{CO}_2$ -Emission liegt geringfügig günstiger aufgrund der Vorteile im Wirkungsgrad bei HCCI-Betrieb.

Dieser Entwicklungsschritt würde eine erhebliche Entlastung aktiver Abgasnachbehandlungssysteme bedeuten und somit einen Beitrag zur Senkung der Produktkosten leisten. Vor allem bei Motoren hoher Stückzahl in relativ leichten Fahrzeugen würden sich Möglichkeiten eröffnen, zumindest für  $\text{NO}_x$  vorerst auf aktive Abgasnachbehandlung verzichten und dadurch einen besonders attraktiven Kraftstoffverbrauch erreichen zu können.

### 3.3 Ansätze zur Realisierung „homogenerer“ Dieselerbrennung

#### 3.3.1 Aufgabenschwerpunkte und Entwicklungsprozess

Wie aus Kapitel 3.1 und 3.2 geschlossen werden kann, ist ein fließender Übergang von strahlgeführter und somit überwiegend diffusionsgesteuerter Verbrennung hin zu einer Prozessführung mit einem höheren Anteil homogenisierten Gemisches zu erwarten.

Die wesentlichen Ansätze für die Entwicklung sogenannter „teihomogener“ Dieselerbrennverfahren sind variable Ladungsbewegung (Drall) und –zusammensetzung (AGR), vollflexible Einspritzsysteme (Mehrfacheinspritzung, freie Einspritzverlaufsformung, variable Einspritzdüsen) und ggf. variable Ventiltriebe zur schnellen Füllungsregelung.

Zur Bearbeitung dieser hochkomplexen Themenfelder sind weiterentwickelte Werkzeuge und Entwicklungsprozesse erforderlich. Gerade die Mechanismen der Gemischbildung und Verbrennung werden eine noch größere Rolle spielen, so dass die Detailanalyse von Ladungsbewegung [11], Einspritzung [12] und Verbrennung [13] unverzichtbar sein wird.

Mehr denn je ist also ein systematischer Entwicklungsablauf erforderlich, der ausgehend von den Komponenten Zylinderkopf (Ladungswechselsystem, spez. Einlassseite) und Einspritzsystem über die Zusammenführung am Motor auf dem dynamikfähigen Motorprüfstand bis zur Übertragung ins Konzeptfahrzeug reicht. Der Gesamtprozess wird von Simulation (z.B. Motorprozess-Simulation) und Versuchssystematik (DoE) begleitet, um schon in einer frühen Entwicklungsphase Ergebnisse im Fahrzeug abschätzen bzw. darstellen zu können.

Der jeweilige Fahrzyklus gibt die für die Emissionsoptimierung relevanten Kennfeldbereiche und insbesondere die repräsentativen Betriebspunkte mit höchstem Anteil am Gesamtemissionsergebnis vor, was wiederum bis zur Komponenten-Optimierung im Entwicklungsprozess Berücksichtigung finden sollte.

In **Bild 8** sind die Grundzüge einer konsequent angewendeten Entwicklungssystematik dargestellt.

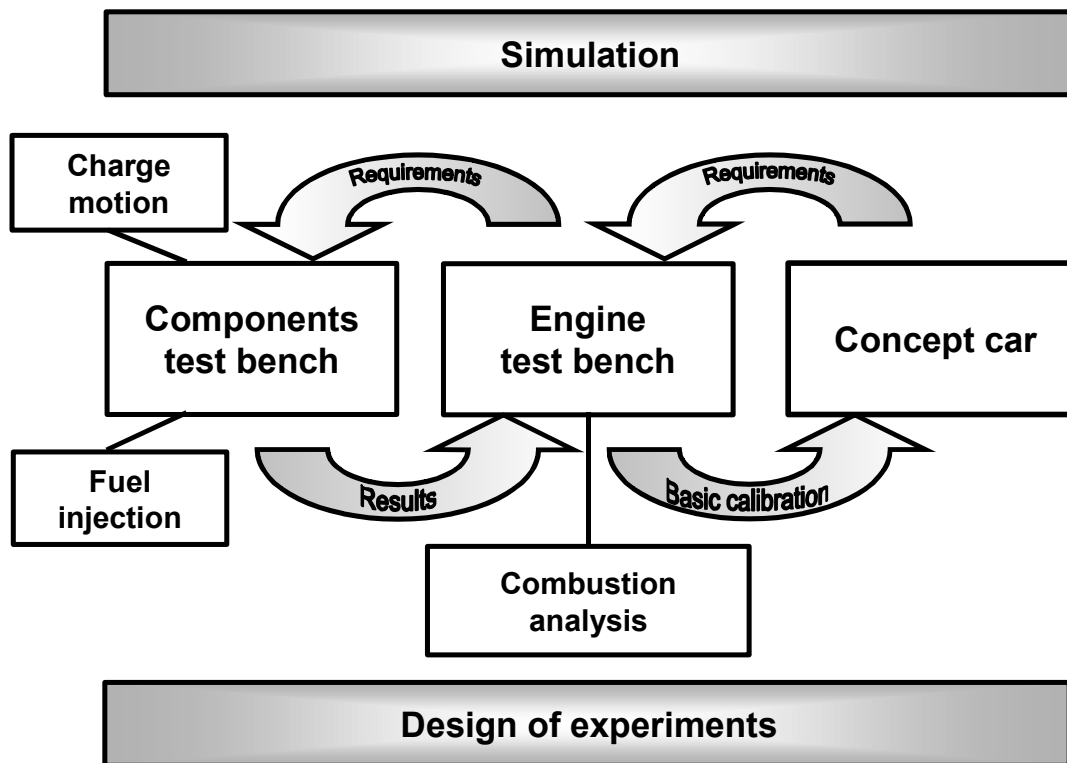


Bild 8: Übersicht über den Entwicklungsprozess für dieselmotorische Brennverfahren

Fig. 8: Overview of the development process for diesel combustion processes

### 3.3.2 Vergleich von „früher“ und „später“ Homogenisierung

Um einen wesentlich höheren Homogenisierungsgrad bei unveränderter „strahlgeführter“ Einspritzung von Dieseldieselkraftstoff mit konventionellen Hochdruckeinspritzsystemen zu erreichen, kann lediglich die Phase des Zündverzuges genutzt werden. Also gibt es generell nur zwei Möglichkeiten zur Realisierung:

1. Frühe Einspritzung in den Kompressionshub.
2. Späte Einspritzung in die Expansionsphase.

Letzteres wird aktuell bei Serienmotoren in Verbindung mit AGR genutzt, um die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte einhalten zu können. Diese Maßnahme hat drei gravierende Nachteile. Erstens führt der späte Verbrennungsschwerpunkt zu einem schlechten Wirkungsgrad, zweitens verbleibt ein Teil von Diffusionsverbrennung aufgrund der begrenzten Zündverzugsphase, drittens werden die Bedingungen für die Rußoxidation im Brennraum bei zunehmender AGR und abnehmender Temperatur ungünstig. Bei den zukünftigen teilhomogenen Dieseldieselbrennverfahren (THDV) geht die Entwicklung in Richtung früherer Einspritzung begrenzter Kraftstoffmengen, wobei dann die Kompressionsphase zur besseren Gemischhomogenisierung genutzt werden kann.

In **Bild 9** wird exemplarisch ein Betriebspunkt mit früher Teilhomogenisierung an einem Dieseldieselmotor mit Common-Rail-System dargestellt. Die gesamte Kraftstoffmenge wird über eine Einspritzung deutlich vor OT eingespritzt. Ausgehend von der Serienabstimmung werden bei einem relativ moderaten Anstieg von HC, CO und  $\text{CO}_2$  die  $\text{NO}_x$ -Emission und der Rauchwert um mehr als 90 % reduziert. Ursachen sind ein nahezu stöchiometrisches Verbrennungsluftverhältnis und eine Prozesstemperatur, die unterhalb der Temperatur der  $\text{NO}_x$ - und Rußbildungsreaktion liegt.

Die hier gewählte Abgasrückführrate liegt bei etwa 70 %. Trotzdem ist der Gradient des Brennverlaufes relativ hoch. Ferner ist für das dynamische Durchfahren des Motorkennfeldes ein optimiertes Regelungskonzept notwendig, um zwischen den stark unterschiedlichen Zuständen von Betriebspunkten mit THDV zu Betriebspunkten mit konventioneller Einspritzstrategie und geringerer AGR-Rate ohne für den Fahrer merklichen Dynamikverlust wechseln zu können.

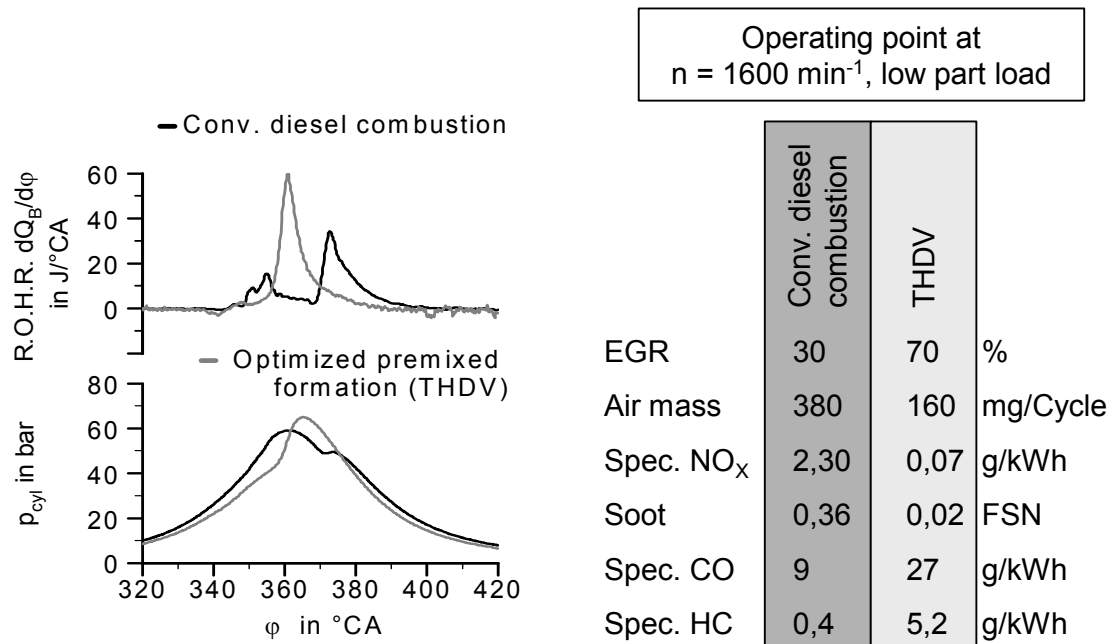


Bild 9: Teilhomogenisierung durch frühe Einspritzung

Fig. 9: Partial homogenization as a result of early injection

Für dieses Verbrennungsverfahren wird an anderer Stelle auch der Begriff Low Temperature Combustion (LTC) verwendet [5], der jedoch nur das Grundprinzip der Niedrig-Temperatur-Verbrennung (unter hohen AGR-Raten) beschreibt, ohne die dazugehörige Einspritzstrategie zu beinhalten.

### 3.3.3. Entwicklungsperspektiven für eine „homogenere“ Dieselerbrennung

In Bild 9 ist zu erkennen, dass die Wärmefreisetzung trotz der sehr hohen AGR-Rate noch immer zu schnell und unter CO<sub>2</sub>-Gesichtspunkten etwas zu früh stattfindet. Um das volle Potenzial dieser Strategie ausnutzen zu können, sind als Zusammenfassung drei Hauptaufgabengebiete für die Zukunft festzuhalten:

1. Prozessführung: AGR-, Füllungs- und Temperatur-Steuerung, Verdichtung
2. Einspritzsysteme: Toleranzen im Hinblick auf Mehrfacheinspritzung und Kleinstmengenfähigkeit, Einspritzdruckerhöhung, Einspritzverlaufsformung z.B. durch Mehr-Steller-Konzepte, variable Einspritzdüse zur opt. Anpassung an Mengenspreizung
3. Kraftstoff: Verdampfungseigenschaften, Zündungs- und Verbrennungsverhalten unter den jeweiligen Bedingungen

Auf den letzten Punkt soll zur inhaltlichen Abrundung im Folgenden eingegangen werden.

### 3.4 Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf das dieselmotorische Brennverfahren

Wie in den Kapiteln 3.2 und 3.3 dargestellt, sind einige Erfolg versprechende Ansätze zu erkennen, das strahlgeführte dieselmotorische Brennverfahren in Richtung eines höheren Homogenisierungsgrades zur Erfüllung künftiger Abgasstandards weiterzuentwickeln. Jedoch basieren alle hier bisher angestellten Überlegungen auf einer Konstante, nämlich auf künftig unveränderten Kraftstoffeigenschaften. Lediglich eine generelle Verringerung des Schwefelanteils im Kraftstoff, deren vorteilhafte Auswirkung auf die Abgasnachbehandlung größer wäre als auf das Brennverfahren, kann aus heutiger Sicht noch in diesem Jahrzehnt erwartet werden, wobei regionale Unterschiede in der Kraftstoffqualität auch weiterhin zu beachten sein werden. Trotzdem lohnt es sich, auch diese Thematik nach möglichen Einflüssen auf das dieselmotorische Entwicklungsszenario zu untersuchen.

#### 3.4.1. Allgemeine Kraftstoffeigenschaften

Die folgende **Tabelle 1** gibt eine kurze Übersicht über die Merkmale verschiedener Kraftstoffe:

Tabelle 1: Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe

Table 1: Characteristics of various fuels

|                      | Einh. | Diesel       | FT-Diesel  | Test-kraftstoff | DME   | SuperPlus    | Methanol     |
|----------------------|-------|--------------|------------|-----------------|-------|--------------|--------------|
| Heizwert $H_u$       | MJ/kg | 42,8         | 43,0       | 24,5            | 28,4  | 42,5         | 19,7         |
| Zündgrenze $\lambda$ | -     | 0,48 .. 1,35 | k. A.      | k. A.           | k. A. | 0,40 .. 1,40 | 0,34 .. 2,00 |
| ROZ                  | -     | -            | -          | -               | k. A. | 99           | 114          |
| CZ                   | -     | > 49         | > 74       | > 100           | > 55  | -            | -            |
| h                    | kg/kg | 0,14         | 0,15       | 0,10            | 0,13  | 0,14         | 0,12         |
| c                    |       | 0,86         | 0,85       | 0,54            | 0,52  | 0,85         | 0,38         |
| o                    |       | 0            | 0          | 0,36            | 0,35  | 0,01         | 0,50         |
| Aromaten             | Gew%  | 15 .. 35     | 0,1        | 0               | 0     | 31 .. 42     | 0            |
| Schwefel             | mg/kg | 20 .. 60     | k. A.      | 0               | 0     | 50           | 0            |
| Siedetemperatur      | °C    | 170 .. 350   | 190 .. 340 | 163             | -24,9 | 30 .. 190    | 65           |
| Verdampfungswärme    | kJ/kg | 300          | k. A.      | 510             | 430   | 420          | 1120         |
| Dichte bei 15°C      | kg/m³ | 830 .. 850   | 785        | 950             | 670   | 745 .. 770   | 795          |
| $L_{St}$             | kg/kg | 14,6         | 14,9       | 8,1             | 9,0   | 14,5         | 6,5          |

Die Verbesserungen heutiger Dieselmotorkraftstoffe lassen sich neben der Schwefelreduzierung durch Anpassungen des C/H-Verhältnisses zugunsten des Wasserstoffes in Verbindung mit der Absenkung des Aromaten-, bevorzugt des Polyaromatenanteils erzielen, was mit einer geringfügigen Dichteabsenkung und einer leichten Anhebung der Zündwilligkeit einhergeht [14]. Hochparaffinische, bspw. aus Erdgas synthetisierte Kraftstoffe (FT, Fischer-Tropsch-Synthese) werden im Zusammenhang mit dem Begriff „Synfuel“ diskutiert [15] und bedeuten einen größeren Schritt in den gerade genannten Merkmalen (C/H und Dichte gering, Cetanzahl hoch). Ferner ist bekannt, dass ein gewisser Sauerstoffgehalt im Kraftstoff bei dieseltypischer Verbrennung mit erheblichem Diffusionsanteil besonders für die

Verringerung der Partikelemission von Vorteil ist [14]. Der gewählte Testkraftstoff soll in diesem Zusammenhang als Extremum bzgl. günstiger Verdampfungseigenschaften, hoher Zündwilligkeit und hohem Sauerstoffgehalt für einen Stichversuch in einem Referenz-Dieselmotor herangezogen werden.

### 3.4.2 Vergleich der Verbrennung von Dieselkraftstoff und synthetischem Testkraftstoff

Um den Einfluss aller wesentlichen motorischen Einstellparameter beim Vergleich des Betriebes mit beiden Kraftstoffen am gleichen Motor darzustellen und um die Versuchszeiten zu begrenzen, wurde das Messprogramm mit der Methode der statistischen Versuchsplanung (o. a. Design of Experiments, DoE) gestaltet.

Aus den Messergebnissen wurde für jede Kraftstoffart je ein Modell für den 120 km/h-Konstantfahrt-Betriebspunkt des NEFZ erstellt. Da der Ansteuerbeginn der Direkteinspritzung (hier für Voreinspritzung, Spritzabstand konstant) und die AGR-Rate, die mit abnehmender Frischluftmasse steigt, die beiden wesentlichen Parameter für die Emissionsabstimmung in der Teillast sind, werden die Betriebswerte in **Bild 10** über diese beiden Größen aufgetragen. Ladedruck und Ladelufttemperatur wurden hier als Eingabegrößen des Modells auf einem sinnvollen Niveau konstant gehalten.

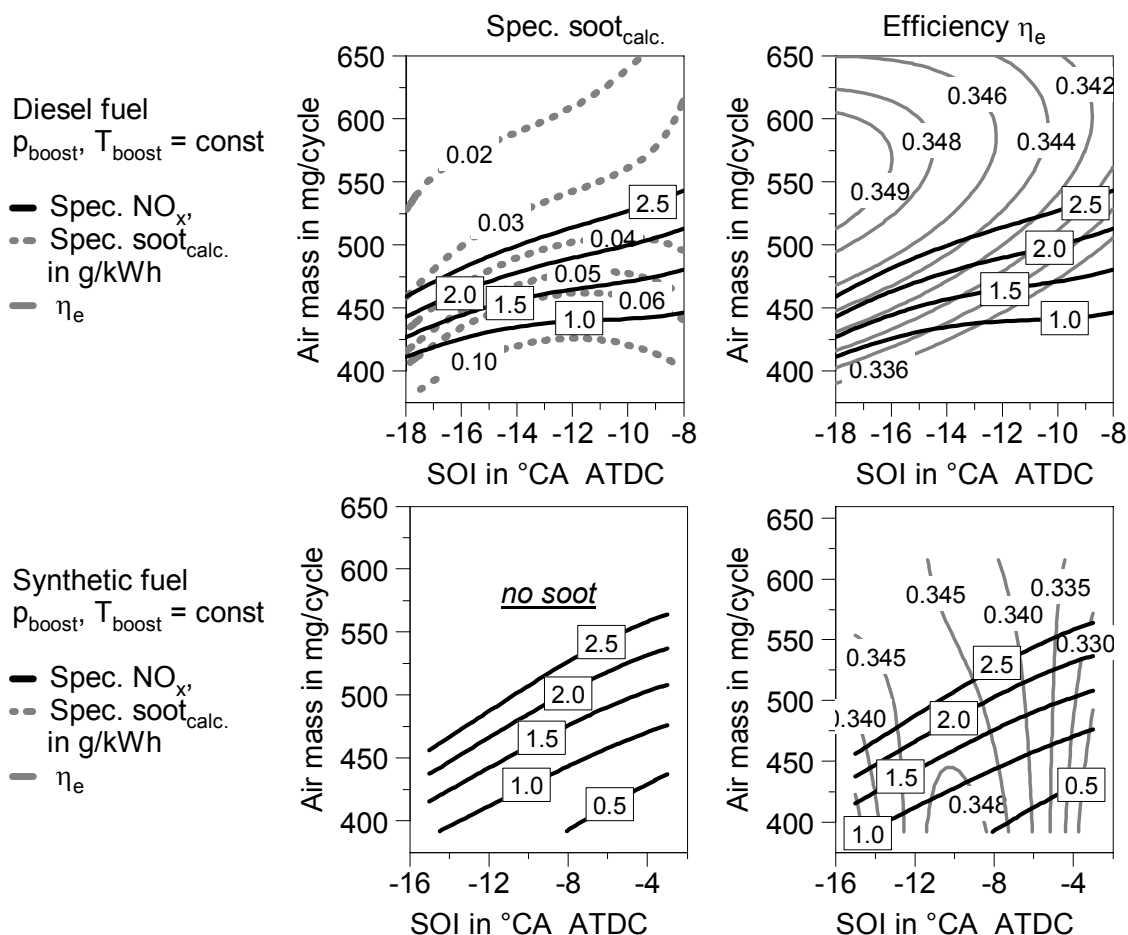


Bild 10: NO<sub>x</sub>, Rußemission und Wirkungsgrad mit Diesel- und synthetischem Kraftstoff im Betriebspunkt  $v = 120$  km/h des NEFZ

Fig. 10: NO<sub>x</sub>, soot emissions and efficiency for diesel and synthetic fuel at operating point  $v = 120$  km/h NEDC

Im oberen Teil von Bild 10 ist für den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff zu erkennen, dass mit geringerer Frischluftmasse, d.h. mit steigender AGR-Rate, und mit späterer Einspritzung die  $\text{NO}_x$ -Emission sinkt, während Rußemission und Kraftstoffverbrauch steigen. Der effektive Wirkungsgrad wurde hier anstelle des Kraftstoffverbrauches dargestellt, um die unterschiedlichen Heizwerte beider Kraftstoffe geeignet zu berücksichtigen.

Mit Orientierung auf den NEFZ würde eine ausgewogene Abstimmung mit relativ früher Einspritzung und hoher AGR-Rate hier bestenfalls folgende Ergebnisse liefern:

$\text{NO}_{x, \text{spez.}} = 1,5 \text{ g/kWh}$ ,  $\text{Ruß}_{\text{spez.}} = 0,05 \text{ g/kWh}$ ,  $\eta_e = 34,2 \%$ .

Mit dem Testkraftstoff (s. unterer Bildteil) können bei geringfügig niedrigerer HC- und CO-Emission und bei deutlich niedrigerem Verbrennungsgeräusch folgende Werte dargestellt werden, ohne die AGR-Rate weiter spürbar erhöhen zu müssen:

$\text{NO}_{x, \text{spez.}} < 1,0 \text{ g/kWh}$ ,  $\text{Ruß}_{\text{spez.}} = 0,00 \text{ g/kWh}$ ,  $\eta_e = 34,8 \%$ .

Hier wirken sich die günstigeren Verdampfungs- und Verbrennungseigenschaften des synthetischen Testkraftstoffes in allen Zielgrößen positiv aus – trotz längerer Einspritzzeiten aufgrund des niedrigeren Heizwertes. Auffällig ist, dass der effektive Wirkungsgrad wesentlich stärker von der Lage der Haupteinspritzung als von der Höhe der AGR-Rate abhängt, was zusätzlich zu den bereits genannten Eigenschaften durch den hohen Sauerstoffgehalt im Kraftstoff erreicht wird.

Aus dem gezeigten Wirkungsgradvorteil darf jedoch nicht direkt auf einen  $\text{CO}_2$ -Vorteil gleicher Höhe geschlossen werden, da die  $\text{CO}_2$ -Emission erheblich von der Kraftstoffzusammensetzung abhängt, die hier als Folge der extremen Kraftstoffformulierung einen gegenläufigen Einfluss hat.

### 3.4.3 Bewertung von Kraftstoffeigenschaften im Hinblick auf mögliche Entwicklungstrends

Wie gerade beispielhaft gezeigt, können modifizierte Kraftstoffe das Entwicklungsszenario erheblich beeinflussen und sind daher als eine Führungsgröße für die Entwicklung dieselmotorischer Brennverfahren zu behandeln.

Inwiefern synthetische Kraftstoffe jedoch für eine HCCI- oder PCCI-Verbrennung geeignet sind, ist gesondert zu prüfen. Sicherlich sind verbesserte Verdampfungseigenschaften und ein verringertes C/H-Verhältnis vorteilhaft, solange eine weitgehende Gemischhomogenisierung erzielt und die Wärmefreisetzung bis zum gewünschten Zeitpunkt verzögert werden kann. Eine hohe Cetanzahl jedoch ist eher ungünstig, wenn sie mit einer noch früheren Selbstzündung und einer schnelleren Verbrennung einhergeht. Cetanzahlen können aber nur einen ungefähren Anhaltspunkt für das Selbstzündungs- und Verbrennungsverhalten des jeweiligen Kraftstoffes im idealen HCCI-Betrieb geben, was für Oktanzahlen bei unterschiedlichen Kraftstofftypen in keiner Weise mehr gilt [16]. Vielmehr sind hier die Mechanismen der Niedrigtemperatur-Oxidation relevant.

## 4. Literatur

- [1] Liebl, J., Hofmann, R., Melcher, Th.:  
Das BMW SULEV (PZEV) Konzept: Emissionsreduzierung ohne Kompromisse.  
23. Int. Wiener Motorensymposium 2002

- [2] Wiedmann, M., Friese, M., Ganzer, M., Wittig, F.-M.:  
Das Super-ULEV-Konzept des Volkswagen-Konzerns für den  
nordamerikanischen Markt.  
23. Int. Wiener Motorensymposium 2002
- [3] Duvinage, F., Nolte, A., Paule, M.:  
Dieselpartikelfilter für Pkw – gestern, heute und morgen.  
Tagung Emission Control, Dresden 2002
- [4] Paquet, T., Tahara, J., Sugiyama, T., Hirota, S., Matsuoka, H., Fujimura, T.:  
Erste Feldversuchsergebnisse eines Diesel-Pkw, ausgerüstet mit der DPNR  
Abgasnachbehandlung.  
11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentechnik 2002
- [5] Sazaki, S., Kobayashi, N., Hashimoto, Y., Tanaka, T., Hirota, S.:  
Neues Verbrennungsverfahren für ein „Clean Diesel System“ mit DPNR.  
MTZ 11/2002
- [6] Oelschlegel, H., Schäfer, A.: Strategien zur Abgasnachbehandlung von  
Nutzfahrzeug-Dieselmotoren für die zukünftigen EURO 4/5.  
10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentechnik 2001
- [7] Thring, R.H.: Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines.  
SAE 892068
- [8] Stockinger, M.: Möglichkeiten der Verbesserung des Arbeitsprozesses im  
gemischtsaugenden Verbrennungsmotor durch Verdichtungszündung.  
VDI-Berichte Reihe 12, Nr.169, 1992
- [9] Onishi, S., Jo, S.H., Shoda, K., Jo, P.D, Kato, S.: Active Thermo-Atmosphere  
Combustion (ATAC) – A New Combustion Process for Internal Combustion  
Engines. SAE 790501
- [10] Kahrstedt, J., Buchwald, R.: Vorteile eines hybriden Brennverfahrens auf der  
Basis eines aufgeladenen DI-Dieselmotors.  
8. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Graz 2001
- [11] Dingel, O., Seidel, T., Schodl, R., Willert, C.:  
Messung der Zylinderinnenströmung mit Doppler Global Velocimetry.  
HdT-Tagung Optisches Indizieren, Essen 2002
- [12] Rölle, T., Behnk, K.: Der Einspritzkomponentenversuch –  
eine wesentliche Stütze der Motorenentwicklung bei der IAV.  
HdT Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung, Berlin 2002
- [13] Seiffert, A., Diezemann, M., Sommer, A., Kahrstedt, J.:  
Integrale Lichtleit-Messtechnik (ILM) und Abbildende Lichtleit-Messtechnik  
(ALM) – moderne optische Werkzeuge für die Brennverfahrensentwicklung.  
HdT-Tagung Optisches Indizieren, Essen 2002
- [14] Schögl, H., Richter, K., Held, W., Warnecke, W., Graupner, O.:  
Der Einfluss der Kraftstoffqualität auf Arbeitsprozeß und Abgasemission bei  
Nutzfahrzeug-Motoren mit Common-Rail.  
7. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Graz 1999
- [15] Steiger, W., König, A., Schumacher, V., Heinrich, H.:  
Die Volkswagen Strategie zum effizienten Antrieb.  
22. Int. Wiener Motorensymposium 2001
- [16] Montagne, X., Duret, P.: What Will Be the Future Combustion and Fuel-  
Related Technology Challenges?  
IFP International Congress; A New Generation of Engine Combustion  
Processes for the Future, Rueil-Malmaison 2002