

Schlussbericht 2004, 29. März 2004

## Projekt Nr. 30304

# Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen

Autor und Koautoren	S. Kunte, K. Boulouchos
beauftragte Institution	Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETH Zürich
Adresse	Institut für Energietechnik/ LAV, ETH Zentrum, Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich
Telefon, Internetadresse	01 / 632 49 76 (S. Kunte), <a href="http://www.lav.ethz.ch">www.lav.ethz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Sensor / 30304
Dauer des Projekts (von – bis)	1. August 1999 – 31. Juli 2002

### ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge des vorliegenden Projektes wurden Vorarbeiten zur industriellen Entwicklung einer miniaturisierten Lichtwellenleiter-Messkette, zusammen mit der Firma Kistler AG, Winterthur, geleistet. Hintergrund der Bemühungen sind neue Technologien wie die Common Rail Einspritzung, welche neue Möglichkeiten der Schadstoffminimierung durch innermotorische Massnahmen zulassen. Zielvorgaben hierzu sind die Erreichung der EURO-IV Grenzwerte.

Für die Lichtleitersmesstechnik wurden am Beispiel eines 1-Zylinder „Heavy Duty“ Diesel-Versuchsmotor die notwendigen Grundlagen erarbeitet. Hierzu gehören massgeblich die Auswahl eines Kalibrationsverfahrens, sowie Möglichkeiten die Verschmutzung der Optik durch Russbeschlag zu korrigieren. Ferner wurde ein Algorithmus erstellt, welcher eine iterative Berechnung der Grössen KL (Russkonzentration) und Russtemperatur T in vernünftiger Zeit als Postprocessing erlaubt.

Der optische und elektronische Aufbau wurde entsprechend der zu erwartenden Signalstärken angepasst. Die im Brennraum erfassten Lichtsignale werden über eine Trifurkation aufgesplittet und wellenlängenselektiv auf eine Diode geleitet. Eine den Anforderungen angepasste Verstärkereinheit wandelt die Diodensignale in eine messbare Spannung um. Die Daten werden mit einem Transientenrecorder zusammen mit Kurbelwinkel und Druckindizierung aufgenommen. Ueber die Druckdaten konnte über die Wärmeentwicklung der Brennverlauf, sowie theoretische Temperaturen der Rauchgas und Frischgaszone berechnet werden. Aus den Lichtsignalen wurden die Russkonzentration und –temperatur bestimmt.

Messungen an einem 1-Zylinder Versuchsaggregat zeigen den vielfältigen Einsatzbereich der Lichtleitersondenmesstechnik zur Charakterisierung der Russentwicklung (KL-Wert) als auch der Zusammenhänge zwischen erfasstem Maximum im Temperaturverlauf und NO<sub>x</sub>-Entwicklung.

Im Anschluss an das Projekt wurde ein KTI-Projekt ausgelöst, welches die Relevanz der Thematik unterstreicht. Ziel des neuen Projektes ist, aus dem „know-how“ der ETH ein marktfähiges Produkt (in Zusammenarbeit mit der Fa. Kistler) zur realisieren.



## Projektziele

Neben der heutzutage standardisierten Druckindizierung in Verbrennungsmotoren, sind neue Entwicklungstools gefragt, die die Erfassung von zusätzliche Informationen über die Verbrennungs- und Schadstoffentwicklung direkt im Brennraum erlauben. Speziell bei Dieselmotoren, aber auch in modernen direkteingespritzten Ottomotoren, stellt die Russ- und NO<sub>x</sub>-Problematik eine ernstzunehmende Herausforderung dar. Hierzu soll im Rahmen dieses Projektes folgende Zielsetzung verfolgt werden:

- Konstruktion einer einfachen Messkette für die Messung der integralen Lichtintensität im Brennraum von Diesel –und Ottomotoren
- Berechnung der Größen KL-Wert (Russkonzentration) und Russtemperatur T aus jeweils einer wellenlängenselektiven Intensitätspaarung
- Messungen an einem 1-Zylinder Diesel Versuchsaggregat und Demonstration der Einsetzbarkeit
- Schlussfolgerungen für die Umsetzung der Lichtleitermesstechnik auf eine miniaturisierte Sonde

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das im Zuge des Projektes entwickelte Zweiwellenlängenpyrometer wurde schrittweise optimiert und an einem 1-Zylinder Forschungsmotor erfolgreich erprobt. Hierzu wurde neben der Indizierbohrung eine zweite Bohrung im Zylinderkopf gesetzt zur Führung der Messsonde. Es wurde ein Messraster mit verschiedenen Einspritzstrategien und Abgasrückführaten (AGR) gefahren um den entwicklungstechnischen Nutzen der Messtechnik zu demonstrieren.

### Lichtwellenleitermesskette

Die Gesamtmesskette besteht aus einer Saphiroptik mit variablem Erfassungswinkel (14° - 62°). Daran angekoppelt ist ein Lichtleitfaserbündel, welches in seinem Verlauf in drei gleiche Lichtsignalstränge aufgesplittet wird. Jeder Einzellichtleiter wird durch jeweils einen Filter (550nm, 650nm, 750nm; 10nm FWHM) auf jeweils eine Diode geleitet. Die drei Diodensignale können individuell über eine Verstärkerelektronik entsprechend verstärkt (Dynamik 1:1000) werden, sodass eine Spannung von 0V-10V resultiert, welche z.B. mit einem Transientenrecorder aufgenommen werden kann.

Zur Messkette gehört eine Kalibrationseinheit, welche aus einem Schwarzkörperstrahler besteht. Hiermit können die Lichtintensitäten bei einer Emissivität von annähernd 1 in einem praktikablen Temperaturbereich von 900°C bis 1000°C in praktisch beliebiger Schrittweite, mit der Sonde erfasst werden. Mittels einer Halogenlampe lassen sich die während den Messungen auftretenden Verschmutzungen durch Russbelag in der sich verändernden optischen Transmission nachweisen und festhalten. Diese Werte müssen zwischen einzelnen Messkampagnen erfasst werden und in die Auswertung mit einfließen.

### Auswertalgorithmus

Die in der Regel zusammen mit dem Kurbelwinkel gespeicherten Signale können nicht „on-line“ berechnet werden, sondern müssen im Nachgang aufbereitet werden. Hierzu wird für jedes Signal über den linearen Zusammenhang mit den Kalibrationswerten die jeweilige Lichtintensität bei der entsprechenden Wellenlänge berechnet. Aus den drei Lichtintensitäten kann jetzt die scheinbare Temperatur berechnet werden. Dies ist die Temperatur, welche sich aus dem Planck'schen Ge-

setz unter der Annahme errechnen würde, dass das vermessene Objekt (Russwolke) einen schwarzen Körper (Emissivität 1) darstellt. Somit resultieren 3 scheinbare Temperaturen. Nach dem Gesetz von Hottel und Broughton ist die Emissivität einer Russwolke abhängig von der Wellenlänge und dem sogenannten KL-Wert. Dieser KL-Wert für sich genommen ist jedoch unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Es lassen sich nun aus zwei scheinbaren Temperaturen die wahre Russtemperatur  $T$  und der KL-Wert, welcher ein Mass für die Russkonzentration darstellt, berechnen. Der Rechenprozess ist iterativ und verhindert somit leider eine on-line Auswertung.

Die Qualität der erhaltenen Resultate lässt sich über einen Vergleich der berechneten Grössen aus den 3 möglichen Signalpaarungen ableiten, welche möglichst nahe beieinander liegen müssen.

### Versuchsträger

Der überwiegende Teil der Messungen wurde an einem 1-Zylinder Forschungsmotor durchgeführt. Lediglich zur Demonstration der Einsatzfähigkeit kam auch ein direkteingespritzter Ottomotor zum Einsatz. In diesem Bericht soll jedoch nur auf die dieselmotorischen Ergebnisse eingegangen werden.

Der 1-Zylinder Dieselmotor hat einen Hubraum von 2.11l (135x150mm) und stammt von der Firma AVL. In den verbrennungsrelevanten Teilen entspricht das Aggregat einem LIEBHERR V8 D9408 TI-E A3. Die Eckdaten des Versuchsträgers sind in Tabelle 1 dargestellt.

<b>Motortyp</b>	DI Diesel Viertakt, 2 Ventile, asymmetrische Kolbenmulde
<b>Hubvolumen</b>	2.14 dm <sup>3</sup>
<b>Bohrung / Hub</b>	135mm / 150mm
<b>Verdichtung</b>	17.2
<b>Nennleistung</b>	~55kW bei 2100min <sup>-1</sup>
<b>Einspritzsystem</b>	Common Rail System mit ETH-Pumpe und Elektronik, Ganser Hydromag Injektoren
<b>Düsen spitzen</b>	6x0.26mm

**Tabelle 1:** Kennwerte des Versuchsmotors

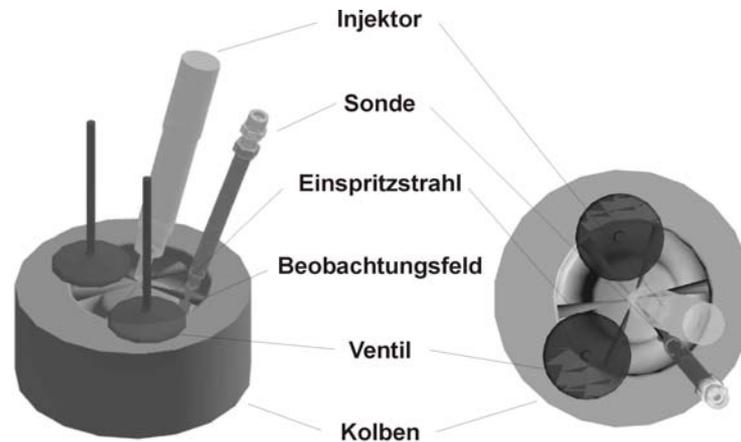
Der Turbolader wurde durch ein Rootsgebläse und eine Gegendruckklappe simuliert, die Einstellwerte entsprechen denen des Vollmotors unter Berücksichtigung der verschiedenen Reibmitteldrücke. Zum Ausgleich von Pulsationen waren dem Motor je ein Beruhigungsbehälter vor- und nachgeschaltet. Ausserdem war das System mit einem Ladeluftkühler bestückt. Sowohl Öl- wie auch Wasserpumpe waren fremdbetrieben.

Neben den üblichen Motorprüfstandsmessgrössen wie Drehzahl, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch, sowie diversen Drücken und Temperaturen wurden zusätzlich zum optischen Signal folgende Grössen erfasst:

- Einlass-, Brennraum- und Raildruck
- Nadelhubverlauf, Verbrennungsgeräusch
- Abgaszusammensetzung (CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, Opazität, Schwärzungszahl Bosch)

### Versuche am Dieselmotor

Der Sensor wurde über die zweite Bohrung in den Zylinderkopf eingebracht. Abbildung 1 zeigt schematisch die Einbaulage beim 1-Zylinder Aggregat. Vorüberlegungen haben dazu geführt, dass das Sichtfeld der Sonde eingeschränkt wurde. Dies konnte durch eine künstliche Verringerung der numerischen Appertur bewerkstelligt werden.



**Abbildung 1:** Einbaulage der optischen Sonde (schematisch)

Zur Demonstration des Nutzen dieser Messtechnik wurden verschiedene Einspritzstrategien und Abgasrückführaten (AGR) gefahren. Im wesentlichen wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Stickoxidmessungen bei 72 verschiedenen Betriebspunkten und Ermittlung der maximalen Russtemperatur im Zyklus
- Einspritzdruckvariation bei  $n = 1460 \text{ min}^{-1}$ , 75% Last und  $\lambda_{\text{global}} = 1.7$
- Lastvariation bei  $n = 1460 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{\text{Rail}} = 500 \text{ bar}$
- AGR-Variation bei  $n = 1460 \text{ min}^{-1}$ , 50% Last und  $p_{\text{Rail}} = 600 \text{ bar}$

### Ergebnisse am Dieselmotor

Die Ergebnisse sollen dokumentieren, dass die neu gewonnenen Messgrößen, Russtemperatur und „Russkonzentration“ wichtige Interpretationsgrößen für die innermotorischen Verbrennungsprozesse darstellt. Hierzu werden am Beispiel obiger Parametervariationen die Resultate für die jeweiligen Einstellgrößen einzeln dargestellt.

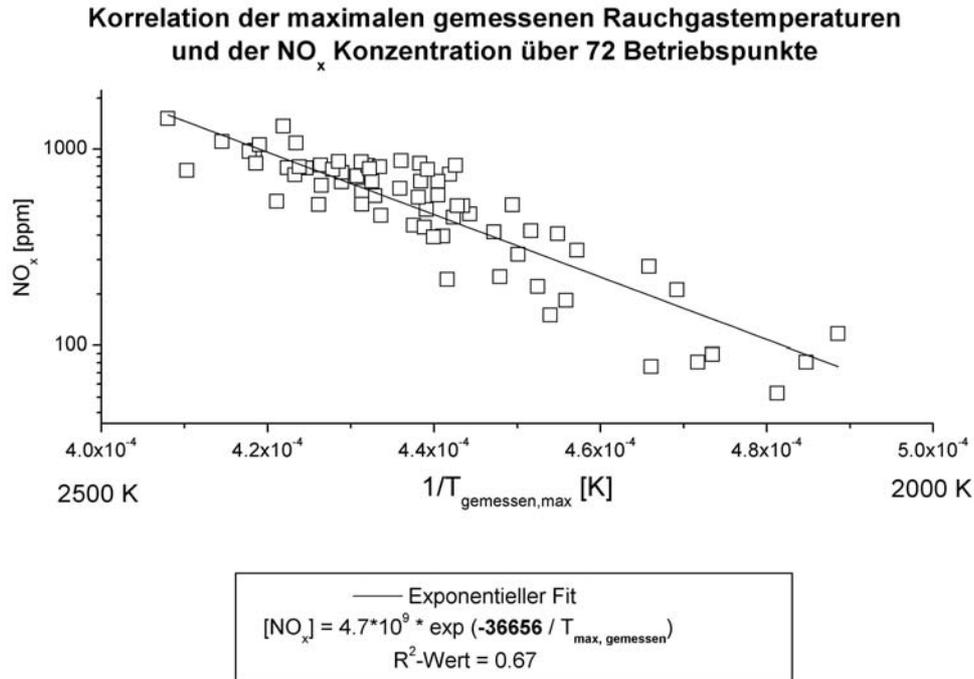
#### Vergleich der maximalen gemessenen Rauchgastemperaturen mit der NOx-Konzentration an 72 verschiedenen Messpunkten

Die Stickoxidbildung in der Verbrennung ist sehr stark temperaturabhängig. In diesem Zusammenhang werden sehr häufig die sogenannten Zeldovich-Mechanismen angegeben, welche sich nach Heywood [1] folgendermassen zusammensetzen:

Reaktion	Reaktionskonstante [ $\text{cm}^3/(\text{mol s})$ ]	$T_A$ [K]
$O + N_2 \rightarrow NO + N$	$7,6 \cdot 10^{13} \cdot e^{(-38000/T)}$	38000
$N + O_2 \rightarrow NO + N$	$6,4 \cdot 10^9 \cdot T \cdot e^{(-3150/T)}$	3150

**Tabelle 2:** Aktivierungstemperaturen der ersten beiden Zeldovich-Reaktionen

Aus 72 Messungen der Parametervariationen: AGR, Einspritzzeitpunkt, Einspritzdruck und Last wurden die gemessenen Stickoxidewerte im Abgasstrang logarithmisch über der reziproken, maximalen Russstemperatur im jeweiligen gemittelten Zyklus aufgetragen (siehe Abbildung 2). Auf diese Weise lässt sich ein exponentieller Fit durch eine Gerade darstellen, deren Steigung die Aktivierungsenergie beinhaltet.



**Abbildung 2:** Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Stickoxidbildung

Aus der Korrelation ergibt sich eine Aktivierungstemperatur von 36656K, welches nahe am ersten Zeldovich-Mechanismus aus Tabelle 2 liegt. Dies legt dar, dass dieser Mechanismus dominant ist.

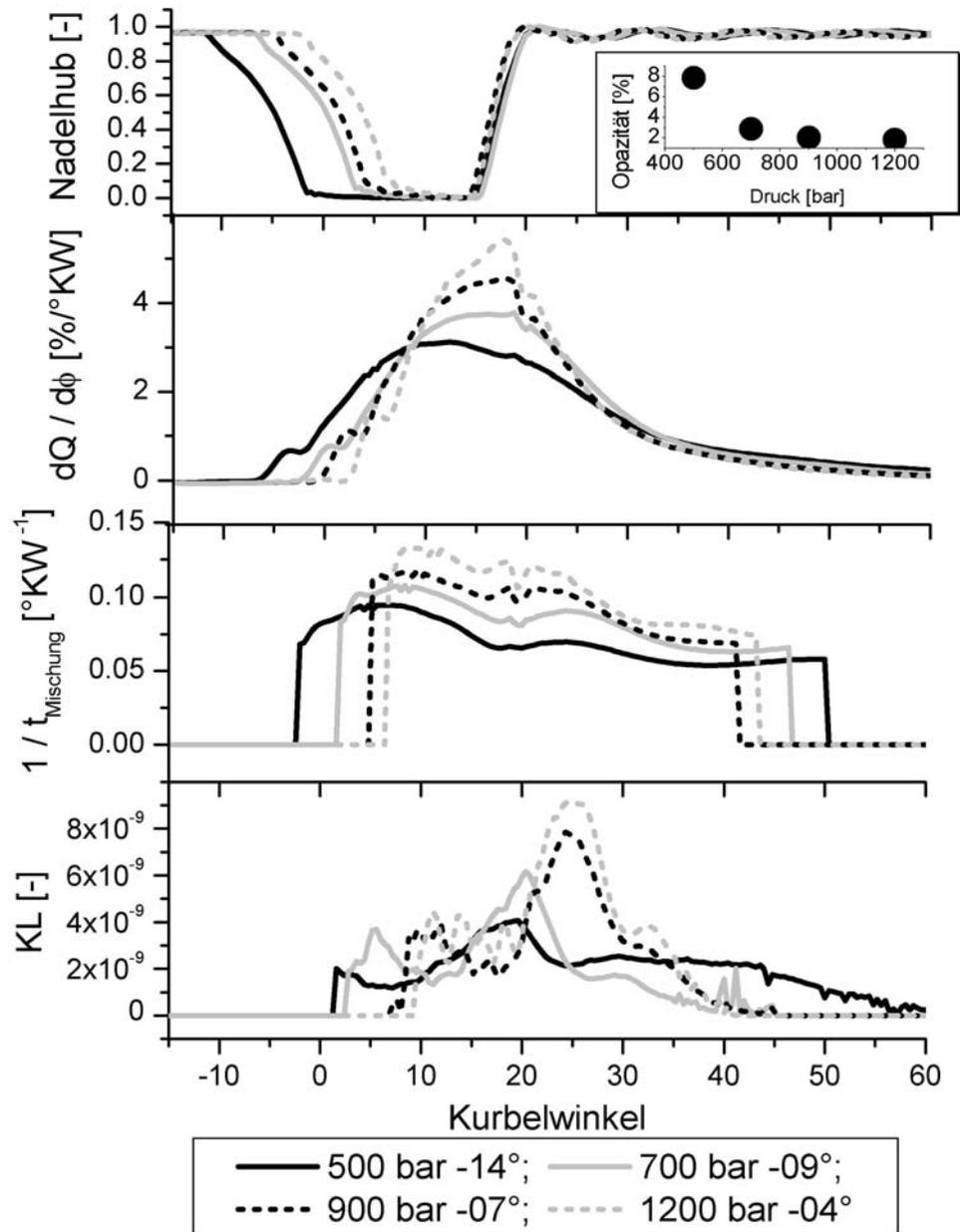
#### Einfluss des Einspritzdruckes

Die den Motor verlassende Russmenge ist das Resultat aus dem Gleichgewicht zwischen Russbildung und Russoxidation. Um diesen Effekt eingehender untersuchen zu können ist es sinnvoll die Russentwicklung im Zylinder zu verfolgen.

So zeigt Abbildung 3 einige typische Russverläufe bei einer Einspritzdruckvariation. Dargestellt ist von oben nach unten der Nadelhub um den Einspritzzeitpunkt und Dauer zu charakterisieren, dann der Brennstoffumsatz. Nachfolgend die charakteristische Mischungszeit, ein Mass für die Mischungsintensität des Brennstoffes mit dem Zylindersauerstoff. Und ganz unten der KL-Wert, welcher die Russkonzentration repräsentiert.

Es ist allgemein bekannt, dass mit Erhöhung des Einspritzdruckes die Opazität und somit die Russkonzentration im Abgasstrang abnimmt. Dies ist jedoch das Resultat aus einer anfänglich verstärkten Russproduktion durch hohen Brennstoffumsatz und somit hoher Pyrolyserate und einer dann verstärkt einsetzenden Russoxidation, welche den Russ dann fast vollständig oxidiert. Ein zunächst höhere Russbelastung im Zylinder wird durch die verstärkte Oxidation durch stärkere Mischung demnach vollständig wegoxidiert.

1460 U/min; 75% Last;  $\lambda = 1.7$

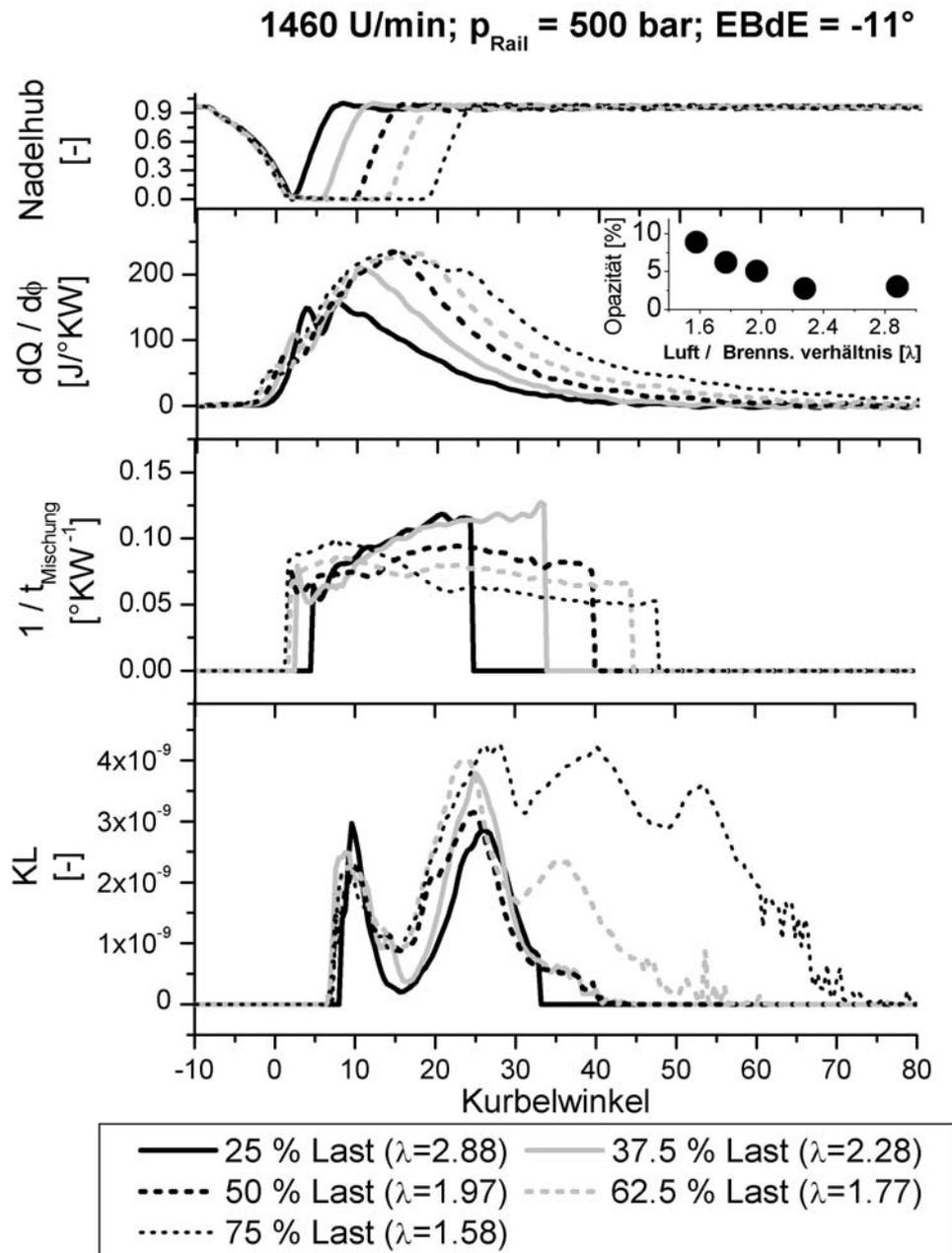


**Abbildung 3:** Nadelhub, Wärmefreisetzungsrate, reziproke Mischungszeit und KL-Faktor für eine Variation des Einspritzdruckes bei 1460 U/min,  $p_{me} = 14\text{bar}$  und  $\lambda = 1.7$

#### Einfluss der Last

Mit Erhöhung der Last wird die für die Verbrennung zur Verfügung stehende Sauerstoffmenge (Luft) reduziert, sodass es zu einem verstärkten Russverhalten kommt. Dies lässt sich an einer Reduktion des globalen Lambdas verifizieren.

Abbildung 4 zeigt wieder den Nadelhub, die Wärmefreisetzungsrate, reziproke Mischungszeit und Russkonzentration (KL-Wert) über mehrere gemittelte Zyklen.

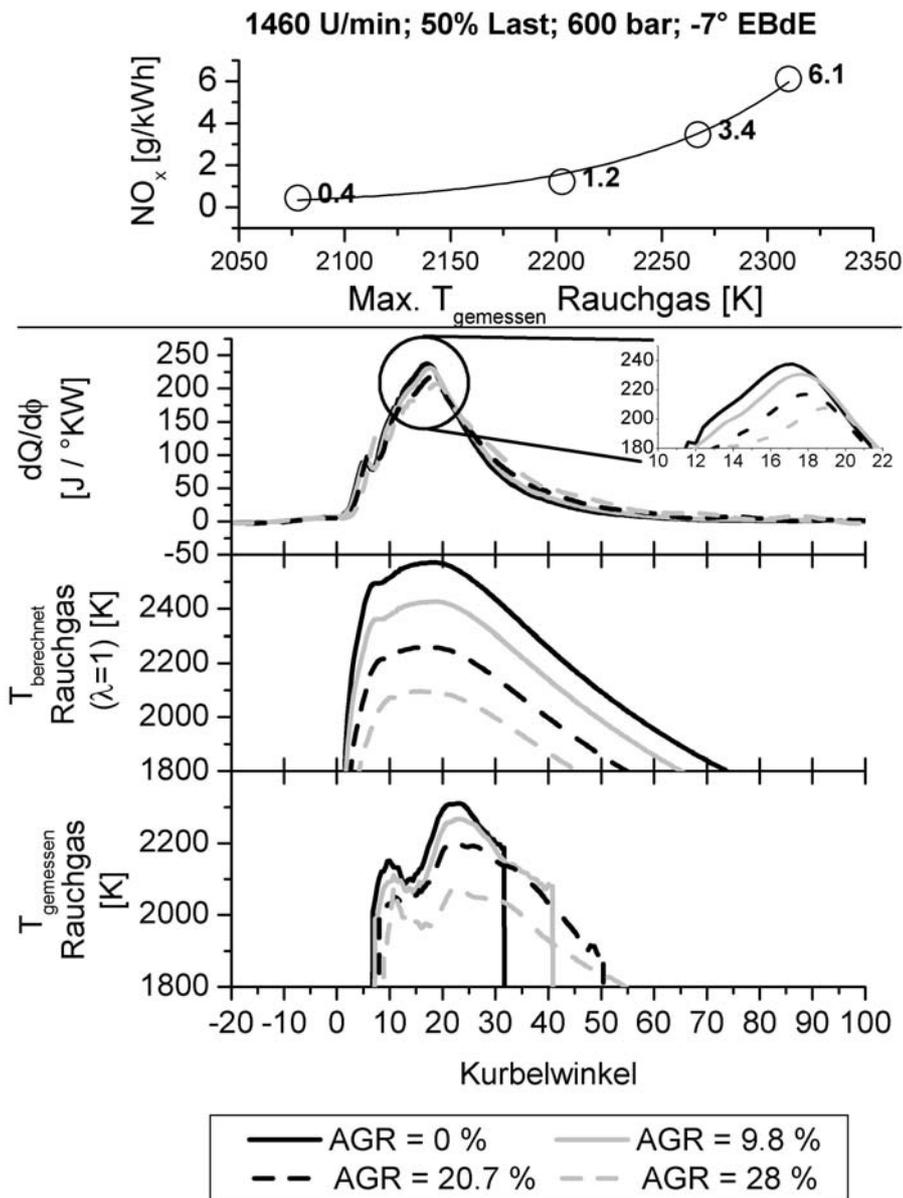


**Abbildung 4:** Nadelhub, Wärmefreisetzungsrate, reziproke Mischungszeit und KL-Faktor für eine Variation der Last bei 1460 U/min,  $P_{\text{Rail}} = 500 \text{ bar}$  und EBdE =  $-11^\circ$  KW VOT

Die Russkonzentration steigt mit zunehmender Last. Dies ist zum einen auf die grössere umgesetzte Brennstoffmenge zurückzuführen. Gleichzeitig nimmt aber auch der Diffusionsanteil durch die längere Einspritzung bei gleichem Einspritzdruck bei in etwa gleichbleibendem Zündverzug (der die Vormischverbrennung kontrolliert) zu. Ab einem globalen Brennstoff-Luftverhältnis von etwa 2 kommt es zu einer Sauerstoffverknappung bei der Oxidation, sodass einmal gebildeter Russ nicht mehr vollständig oxidiert werden kann. Dies führt zu erhöhten Russemissionen, welches sich an der Opazität ablesen lässt.

### Temperaturen und NO<sub>x</sub> (AGR-Rate)

Auch die Russtemperatur ist eine sehr sinnvolle Messgröße, da sie sich der Rauchgastemperatur annähert. Wie eingangs erwähnt sind die Temperaturen massgeblich für die Stickoxidbildung verantwortlich. Dies lässt sich an einem Beispiel, wie es in Abbildung 5 als zusammengesetzte Graphik dargestellt ist, verdeutlichen. Aufgetragen sind hier von oben nach unten die gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen über der maximalen Rauchgastemperatur. Dann die Wärmefreisetzung, die berechnete Rauchgastemperatur und die gemessene Rauchgastemperatur jeweils über den Kurbelwinkel.

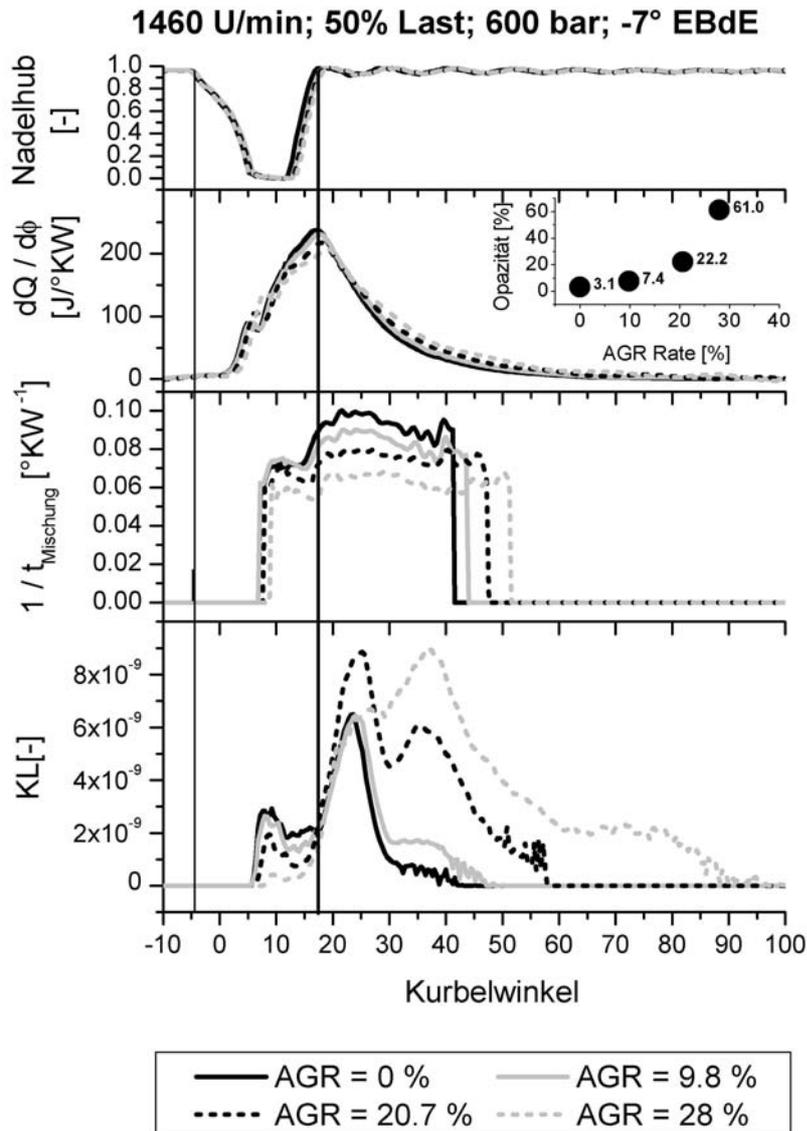


**Abbildung 5:** Korrelation der NO<sub>x</sub>-Emissionen und der Rauchgastemperatur für eine Variation der AGR-Rate bei 1460U/min;  $p_{\text{me}} = 9.3 \text{ bar}$ ;  $p_{\text{Rail}} = 600 \text{ bar}$  und EBdE = -7° KW VOT

Es zeigt sich sowohl rechnerisch als auch aus der Messung, dass mit zunehmender AGR-Rate die Rauchgastemperatur abnimmt und somit die Stickoxidbildung reduziert werden kann. Die Temperaturherabsenkung lässt sich aufgrund zweier Tatsachen begründen. Zum Einen nimmt die maxi-

male Energieumsetzung ab. Desweiteren wird mit dem erhöhten Inertgasanteil, vornehmlich dem Wasser, die Wärmekapazität des Zylinderinhaltes erhöht.

Neben der Stickoxidreduktion durch AGR, gilt es auch die Russentwicklung im Auge zu behalten, da die Russmenge im Abgasstrom ansteigt. Hierzu ist der Russkonzentrationsverlauf nochmals in Abbildung 6 aufgetragen.



**Abbildung 6:** Energieumsatzrate, Nadelhub, KL-Faktoren und charakteristische reziproke Mischungszeit für eine Variation der AGR-Rate bei 1460U/min;  $p_{me} = 9.3$  bar;  $p_{Rail} = 600$ bar und EBdE = -7° KW VOT

Die charakteristischen reziproken Mischungszeiten zeigen ein für AGR-Variationen typisches Verhalten. Trotz gleichem Einspritzdruck und -zeitpunkt nimmt die Mischungsfrequenz ab. Dies ist auf den Sauerstoffmangel durch die erhöhte AGR-Rate zurückzuführen. Die lokale Mischung mit Sauerstoff verschlechtert sich. Mit dem Schliessen der Düsenadel wird die Mischungsfrequenz nochmals erhöht. Dieser Effekt wird durch das „atmen“ des Einspritzstrahles durch den Abriss des Spraycontinuums ermöglicht. Mehr Luft kann in der Schleppe des Einspritzstrahles eingesaugt

werden. Einmal gebildeter Russ lässt sich bei hohen AGR-Raten nur noch langsam oxidieren, wobei die Zeit dann nicht mehr zur Verfügung steht.

## Bewertung 2002 und Ausblick 2003/2004

Mit der systematischen Entwicklung des Mehrfarbenpyrometers wurden die Projektziele vollständig erreicht. Es konnten zwei grosse Bereiche gegeneinander abgegrenzt werden. Zum einen die Hardware in Gestalt des Sensors und der dazugehörigen Elektronik und Kalibrationseinrichtung. Desweiteren die Entwicklung des Auswertalgorithmus in Form einer Software. Beide Teilaspekte haben zu einem vertieften Verständnis der Mehrfarbenpyrometrie beigetragen. Es wurden die Grundlagen für zukünftige Messsysteme erarbeitet.

Die Erkenntnisse haben erfolgreich ein nachfolgendes KTI-Projekt ausgelöst, welches auf sehr grosses Interesse seitens der Industrie stösst. Hierbei handelt es sich um eine Miniaturisierung der Messsonde um auch an kleineren Motoren minimalinvasive, optische Messungen durchführen zu können. Desweiteren sollen Elektronik und Software standardisiert werden um grössere Stückzahlen an Messketten herstellen zu können

## Referenzen

[1] Heywood, John B. : „Internal Combustion Fundamentals“, McGraw-Hill, 1988

## Publikationen

**Schubiger, R.** : „Untersuchungen zur Russbildung und –oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrössen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie“, Diss. ETH Nr. 14445, 2001

**Lutz Thomas; Bertola Andrea; Schubiger Raffael; Boulouchos Konstantinos; Nellen Christian; Schänzlin Katharina et al.**: “Particulates of piston engine combustion processes”, KTI Project 4207.2 KTS, final report 2001

**Bertola Andrea; Schubiger Raffael; Kasper Adelheid; Matter Ulrich; Forss Anna Maria; Mohr Martin; Boulouchos Konstantinos; Lutz Thomas**: “Characterization of Diesel Particulate Emissions in Heavy-Duty DI-Diesel Engines with Common-Rail Fuel Injection: Influence of Injection Parameters and Fuel Composition”, SAE Paper 2001-01-3573; SAE Special Publication SP-1715, *Diesel and Particulate Emissions*, pp. 9-21; SAE 2001 Transactions – *Journal of Fuels & Lubricants*, section 4, pp. 1925-1937.

**Schubiger Raffael; Bertola Andrea**: “Influence of Common-Rail Injection Parameters on Particulate Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines”, 5th International ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, August 2001 Zurich.

**Schubiger Raffael; Bertola Andrea; Boulouchos Konstantinos**: “Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection Systems”, SAE Paper 2001-01-3497; SAE Special Publication SP-1713, *Diesel Engine Experiments*, pp. 1-10.