

Abschlussbericht, 12. Dezember 2002

# Projekt-Nr. 76664

## Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasen Strömungen

Autor und Koautoren	Stephan Kunte, Bruno Schneider und Konstantinos Boulouchos
beauftragte Institution	Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, ETH Zürich
Adresse	Sonneggstr. 3, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internet	<a href="http://www.lav.ethz.ch">www.lav.ethz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen / 76664
Dauer des Projekts (von – bis)	1. April 1999 bis 31. März 2002

### ZUSAMMENFASSUNG

#### Teil A: Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russbildung in einer Diffusionsflamme

Mittels verschiedener laseroptischer Messtechniken wurden die Russparameter Russvolumenbruch  $f_v$ , Primärpartikeldurchmesser  $d_p$  und Russtemperatur  $T_r$  in laminaren Diffusionsflammen für verschiedene Zumischungen der Testbrennstoffe DME (sauerstoffhaltig) und Ethan (parafinisch) zum Basisbrennstoff Ethylen (olefinisch) bestimmt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen für beide Versuchsbrennstoffe eine Reduktion des Russes in der Flamme, wobei DME einen wesentlich wirksamer die Russbildung unterdrückt und die  $\gamma$ -oxidation fördert.

Erklärungsansätze können durch die numerische Simulation der jeweiligen Reinbrennstoffflammen geliefert werden. Gleichgewichtsberechnungen ergeben eine Erhöhung des Wassergehaltes in der Flamme, was eine Russminderung verursachen kann.

Die experimentellen Resultate liegen in einer umfangreichen Datensammlung vor, welche zur Validierung und Verbesserung zukünftiger numerischer Russmodelle herangezogen wird.

#### Teil B: Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck

Die zeitabhängige Ausbreitung des Einspritzstrahls wurde mit der Schattenbildtechnik erfasst, als Versuchsträger diente die Hochtemperatur- und Hochdruckzelle des LAV. Der Einsatz der Konstantvolumenzelle erlaubte eine sehr grosse Variation der Umgebungsbedingungen für die Experimente, wodurch neue Erkenntnisse über das Einspritzstrahlverhalten unter hohem Gasdruck resp. bei hohen Gastemperaturen gewonnen werden konnten. Die lokalen Tropfengrössen und Tropfengeschwindigkeiten wurden mittels Phasen Doppler Anemometrie bestimmt. Sie geben Auskunft über die Qualität des Strahlaufbruchs resp. der weiteren, sekundären Atomisierung. Die Auswirkung der Gastemperatur auf die mittleren Tropfengrössen ist sehr gross, dagegen zeigt eine Variation der Gasdichte keinen Einfluss auf die entstehenden Tropfengrössen.

Die ermittelten Sprayparameter sind hochwertige Basisdaten resp. Referenzdaten für die numerische Simulation der Sprayausbreitung. Die Parameterauswahl ist äusserst weit gefasst, was für die erforderliche Validierung von grossem Wert ist.



## Projektziele

### **Teil A: Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russbildung in einer Diffusionsflamme**

Bei der Diffusionsverbrennung, wie sie zu einem grossen Teil bei der dieselmotorischen Verbrennung vorliegt, findet Russbildung durch Verbrennung unter lokalen Sauerstoffmangel statt. Einmal gebildeter Russ kann aber bei entsprechend hohen Temperaturen durch Zusammentreffen mit im Zylinder verbliebenem Sauerstoff wieder oxidiert werden. So werden in etwa 90% des im Zylinder entstandenen Russes vor dem Austritt in das Abgassystem wieder abgebrannt. Die restlichen 10% verlassen den Zylinder und müssen unter Umständen durch Filter oder Oxidationskatalysatoren aus dem Abgasstrom entfernt werden.

Durch innermotorische Massnahmen kann z.B. eine intensivere Gemischaufbereitung vor der Selbstzündung durch Verwendung eines Common-Rail Einspritzsystems eine Verbesserung bringen. Hierdurch wird das Gemisch physikalisch besser homogenisiert und somit jedem Brennstoffmolekül mehr Sauerstoff zugeführt. Diese Sauerstoffzuführung lässt sich aber z.B. auch durch die Verwendung von sauerstoffhaltigen Brennstoffen verbessern. Diese enthalten im Brennstoffmolekül bereits ein oder mehrere Sauerstoffatome, welche dann im Brennstoffgemisch homogen verteilt sind.

Solche sauerstoffhaltigen Brennstoffe stehen in der Debatte auf die Russbildung eindämmend zu wirken oder diese gegebenenfalls ganz zu unterdrücken. Sie könnten ein probates Mittel zur Russreduktion darstellen wie es aus [1] bereits bekannt ist. Ein Teilziel stellt nun dar, auf welche Weise solche Brennstoffe die Russentwicklung beeinflussen. Greifen sie bereits in der Russbildungsphase ein, bringen sie Verbesserungen in der Russoxidation oder sind beide Wirkweisen zu finden?

### **Teil B: Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck:**

Die gezielte Optimierung von Diesel-Verbrennungsmotoren erfordert Möglichkeiten, die relevanten Vorgänge wie Einspritzung, Strahlausbreitung, Strahlzerfall in Tropfen und deren Verdampfung sowie die nachfolgende Verbrennung mit Computerprogrammen simulieren zu können. Da die physikalischen Prozesse nicht bei allen Teilvorgängen bekannt sind müssen diese teilweise durch Modelle ersetzt werden. Für die Entwicklung und Validierung dieser Modelle und CFD Codes ist eine gute, umfassende experimentelle Datenbasis eine unabdingbare Voraussetzung. Mit der Hochtemperatur und Hochdruckzelle des LVV können entsprechende experimentelle Daten mit verschiedensten Messtechniken in einem weiten Parameterfeld gewonnen werden.

Die globale Sprayausbreitungscharakteristik für verdampfende und nicht verdampfende Diesel Einspritzstrahlen wurde mit Hilfe der Schattenbild-Technik erfasst. Diese Technik macht zudem auch die Strukturen der flüssigen Phase im Einspritzstrahl sichtbar, was für die Interpretation der beim Strahlaufbruch ablaufenden Prozesse eine grosse Hilfe ist.

Die lokalen Tropfengrössen und Tropfengeschwindigkeitsmessungen wurden mithilfe der Phasen Doppler Anemometrie Messtechnik an verschiedenen, aufgrund der Schattenbilder ausgewählten charakteristischen Messpunkten im Spray ausgemessen. Diese Messungen erlauben, die mithilfe der Schattenbilder erzielten Aussagen zu validieren und geben Aufschluss über die Atomisierungsqualität der eingesetzten Einspritzdüse resp. Düsen spitze unter den jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Teil A: Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russbildung in einer Diffusionsflamme

Bei der Untersuchung des Einflusses von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russentwicklung ist neben der zunächst reinen Quantifizierung des Russminderungspotentials erwartungsgemäss auch das Verständnis der zugrunde liegenden chemisch-physikalischen Gesetzmässigkeiten von Interesse. Um dies zu untersuchen ist es hilfreich den naturgemäss sehr komplexen Verbrennungsprozess derart zu gestalten dass sich einzelne Einflussparameter auf die Russbildung und –Oxidation voneinander entkoppelt betrachten lassen. Ermöglicht wird dies z.B. durch die Verwendung einer laminaren Diffusionsflamme als Versuchsobjekt. Der Vorteil einer laminaren Diffusionsflamme ist einerseits ihre Stationarität, welche die Anwendung mehrerer Messtechniken in serieller Anordnung erlaubt. Des Weiteren werden Brennstoff und Sauerstoff (hier Luftsauerstoff) getrennt voneinander der Reaktionszone zugeführt, welches eine gezielte Beobachtung der brennstoffseitigen Abläufe unter Ausschluss des originären Luftsauerstoffes ermöglicht.

### Experimentelle Vorgehensweise und Ergebnisse

Die Untersuchung der Russbildung und –Oxidation wurde an einer nichtrauchenden, laminaren Diffusionsflamme durchgeführt, stabilisiert auf einem Wolfhard-Parker Brenner (Schlitzbrenner). Als Basisbrennstoff diente das stark russende, olefinische Ethylen, welches schrittweise mit einerseits Ethan als parafinischem Vergleichsbrennstoff oder dem zu untersuchenden einfach sauerstoffhaltigen Dimethylether (DME) substituiert wurde. Methylal wurde tentativ untersucht, da dieses bei Raumtemperatur flüssig ist und beim verwendeten Versuchsaufbau nur in Verbindung von hoher Verdünnung durch Stickstoff in die Flamme gebracht werden konnte. Die Mischungsstrategie ist in [2] eingehend erläutert.

Für die Russuntersuchungen kamen 4 optische Messtechniken in Kombination zum Einsatz. Diese sind explizit die Laserinduzierte Inkandescenz (LII) zur Ermittlung des Russvolumenbruches  $f_v$ , die zeitaufgelöste Laserinduzierte Inkandescenz für die Primärpartikelgrösse  $d_p$ . Die Zweifarbenpyrometrie liefert die Russtemperatur  $T_R$  sowie zur Lokalisierung von OH-Radikalen die Laserinduzierte Fluoreszenz (OH-LIF). Der Experimentelle Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

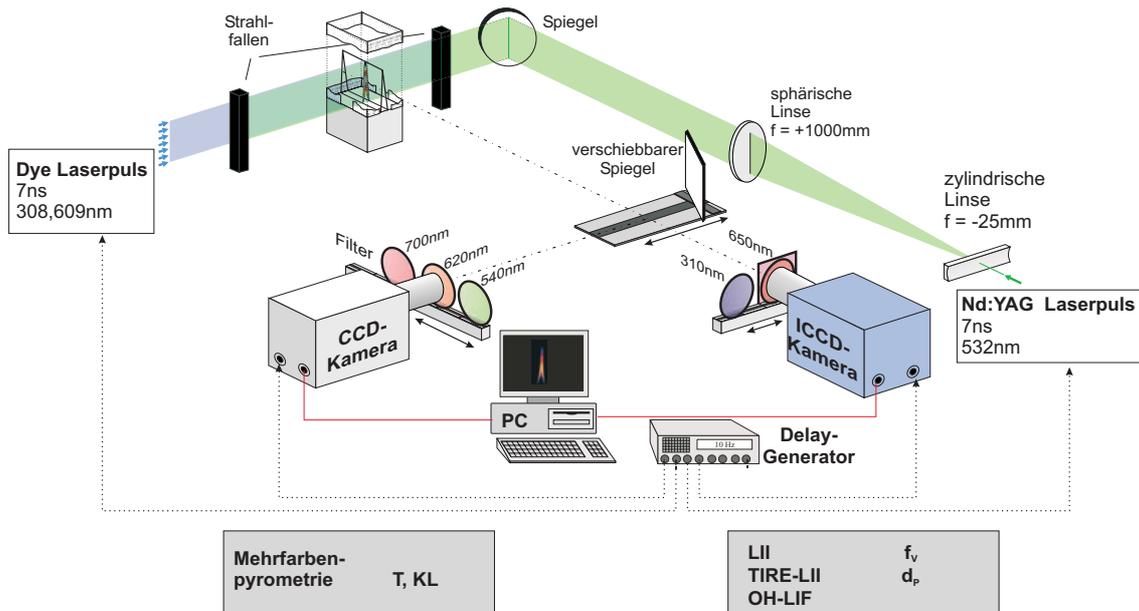


Abb. 1: Gesamtanordnung Messtechniken

Die Ergebnisse der Messungen für einen orthogonalen Schnitt durch die Flammenmitte sind in den Abbildungen 2-5 dargestellt. Die Resultatanordnung ist wie folgt: Die obere Reihe zeigt die schrittweise (10 Vol-% Schritte) Substitution von Ethylen durch Ethan. In der zweiten Reihe finden sich die Ergebnisse für die Substitution durch DME.

Zunächst wurden die OH-Radiakale für alle Flammen lokalisiert. Diese sind bei der Diffusionsflamme nicht zwangsläufig ein Indikator für die Reaktionszone, wie dies bei der Vormischflamme der Fall ist und zur Bestimmung der Flammenfront herangezogen werden kann. Dennoch wird die Lage der OH-Radiale in der Flamme verdeutlicht, welche aufgrund hoher Temperaturen und Wasserkonzentrationen zugegen sind. Der Beginn der „OH-Zone“ wurde mit einer Linie gekennzeichnet. Die Linie ist auf alle weiteren Ergebnisfiles übertragen um eine Mitwirkung von OH-Radikalen bei der Russoxidation zu erörtern.

Die Zumischung von Ethan verlagert die OH-Zonen weiter stromabwärts, also in der Flamme weiter nach oben (Abbildung 2). Im Vergleich hierzu ändert sich bei der Verwendung von DME die Position der OH-Zone nicht wesentlich.

Abbildung 3 zeigt die Russvolumenbruchverteilung in der Flamme. Schon in einem vorangegangenen Bericht wurde darauf eingegangen, dass sowohl Ethan- als auch DME-Anteile den Russinhalt in der Flamme reduzieren [2]. Hierbei ist DME wesentlich effektiver, da es bereits bei einer 1:1 Mischung Ethylen/DME den Russinhalt der Flamme um 75 % reduziert. Dies ist ein Wert, der bei Ethan nur durch den Reinbrennstoff erreicht wird. Russt die Flamme stark, so ist das Russkonzentrationsfeld quer über die Flamme stark strukturiert. Die höchsten Russvolumenbrüche finden sich brennstoffseitig entlang der Reaktionszone, welche sich durch die höchsten Temperaturen manifestiert. Mit zunehmender Substitution wird das Russkonzentrationsfeld homogener und die Konzentrationsmaxima finden sich dann entlang der Flammenachse. Bei DME gibt es erste Hinweise, dass der Russ auch ohne die Gegenwart von OH abgebaut wird.

Vergleicht man hierzu die Partikelgrößenverteilung (Abbildung 4), so entstehen die grössten Partikel in fast allen Brennstoffmischungen ebenfalls entlang der Reaktionszone. Auch hier ist eine inhomogene Struktur über die Flammenbreite festzustellen. Erst mit sehr viel Ethan oder DME Zugabe wird auch hier die Struktur im messbaren Bereich homogener. Ein Zusammenhang zwischen Anwesenheit von OH-Radikalen und Russpartikeldurchmesser ist nicht offensichtlich.

Der letzte dargestellte Parameter ist die Russpartikeltemperatur (Abbildung 5). Diese bewegt sich bei allen Flammen im Bereich von 1800 K und 2200 K. Die Russtemperatur nimmt generell von der reinen Ethylenflamme hin zur Ethanflamme kontinuierlich zu, trotzdem die rein rechnerische adiabate Flammtemperatur niedriger ist. DME zeigt hier ein ähnliches Verhalten. Bei hohen Russkonzentrationen, wie sie bei der Ethylenflamme vorliegen, kommt es zu einer Kühlung der Flamme durch Wärmestrahlung, welche mit zunehmendem Ethan bzw. DME Anteil durch eine abnehmende Russkonzentration immer niedriger ausfällt. Bei der reinen Ethanflamme beispielsweise steigt die Russtemperatur mit der Flammenhöhe, da das gesamte Russgebiet innerhalb der Reaktionszone liegt und sich das Russgebiet brennstoffseitig mit zunehmender Höhe der Reaktionszone nähert und die lokal vorliegende Temperatur annimmt.

Um einen übersichtlicheren Vergleich im Russverhalten zu gewinnen ist es sinnvoll die Russentwicklung entlang der Flammenachse anzuschauen, wo sich für alle Flammen eine gemeinsame Stromlinie befindet.

## OH-Konzentration (qualitativ)

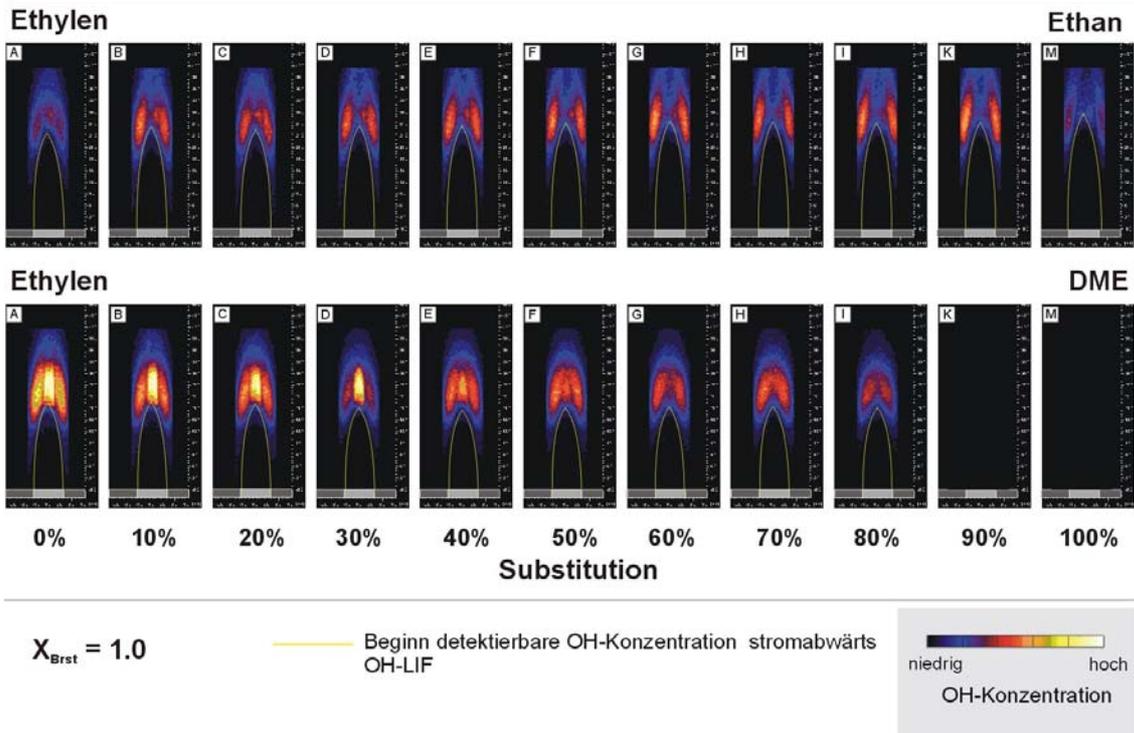


Abb. 2: Lokale OH-Verteilung bei den Brennstoffmischungen

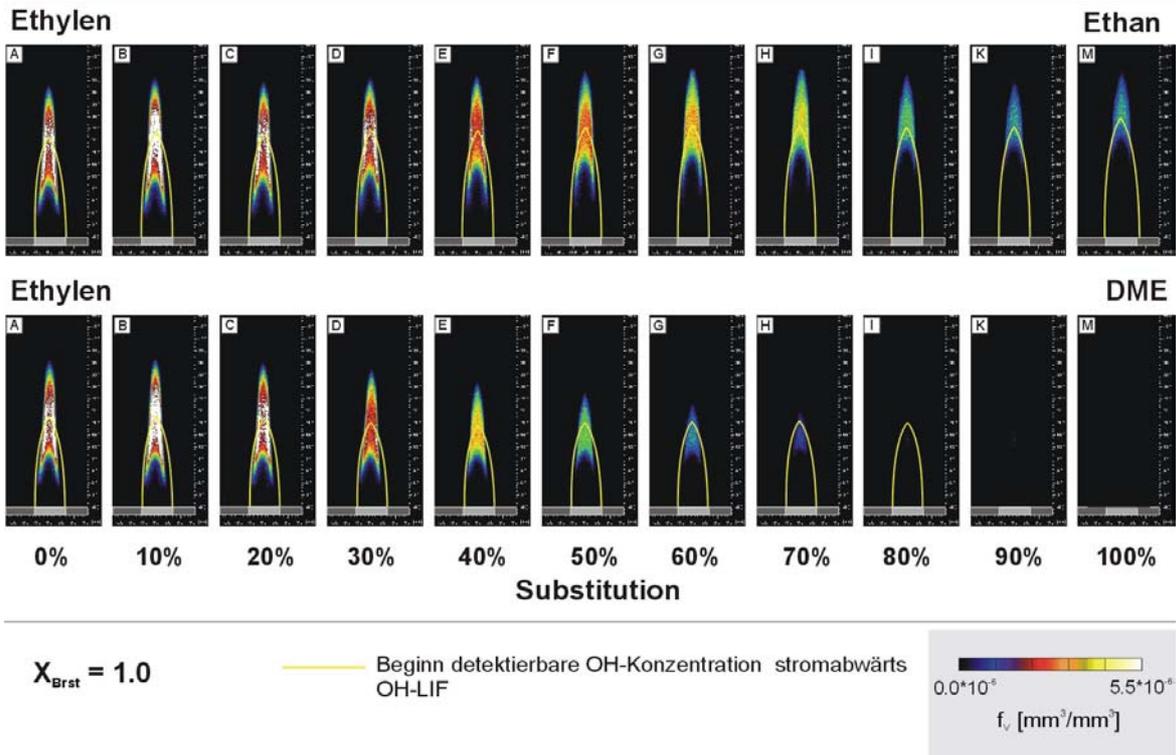
Russvolumenbruch  $f_v$ 

Abb. 3: Russvolumenbruchverteilung bei verschiedenen Brennstoffmischungen

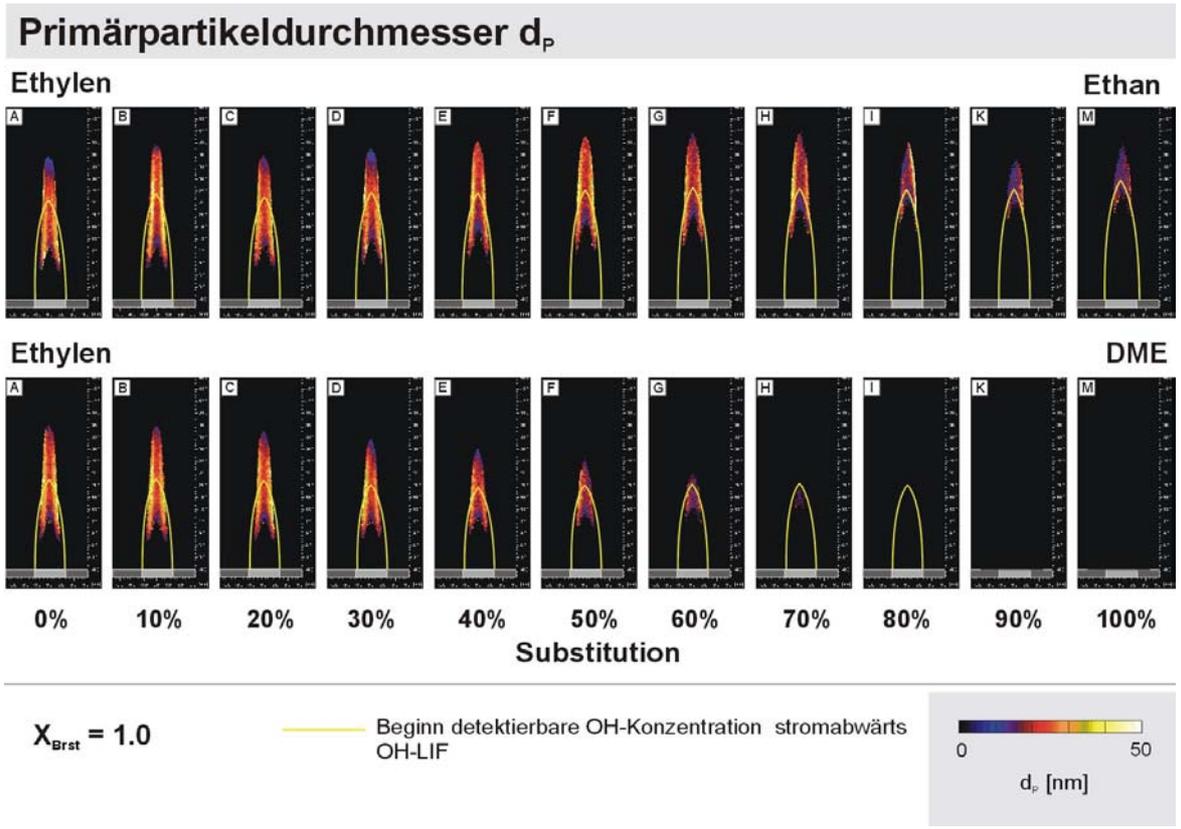


Abb. 4: Primärpartikelgrößen verschiedener Brennstoffmischungen

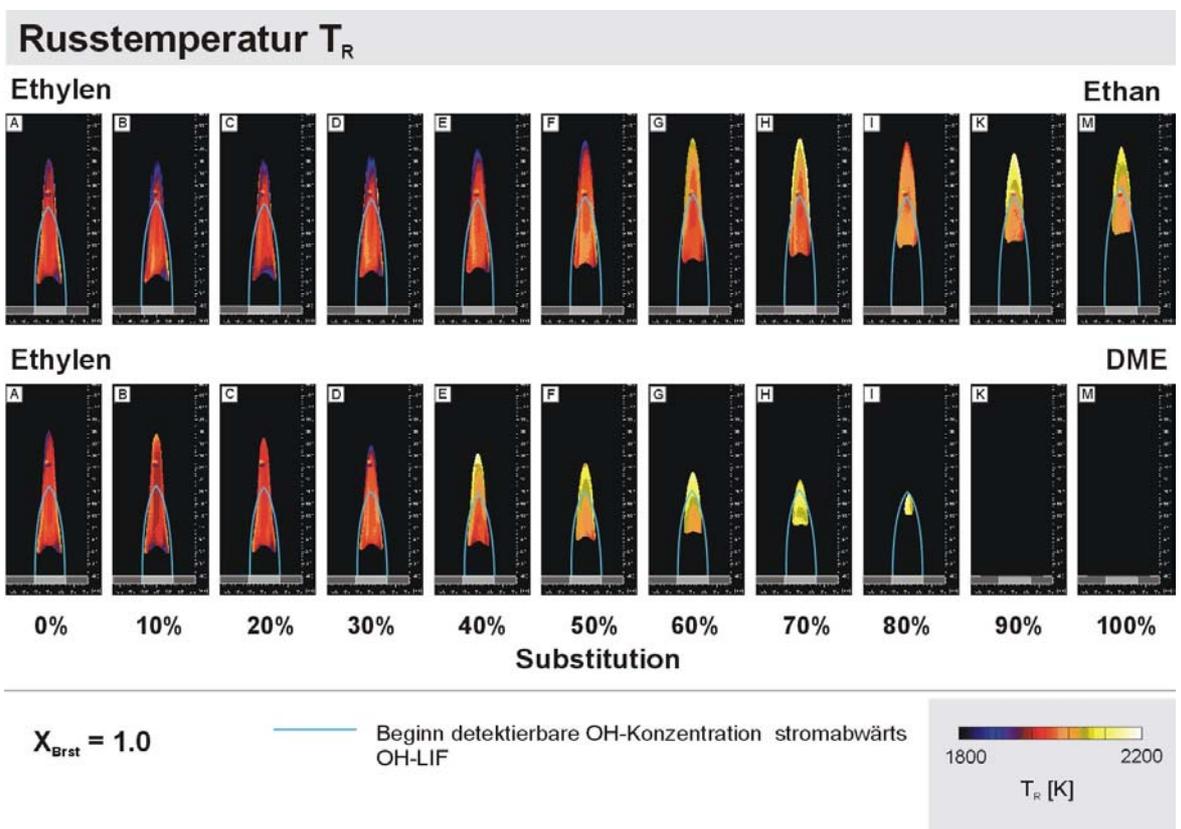
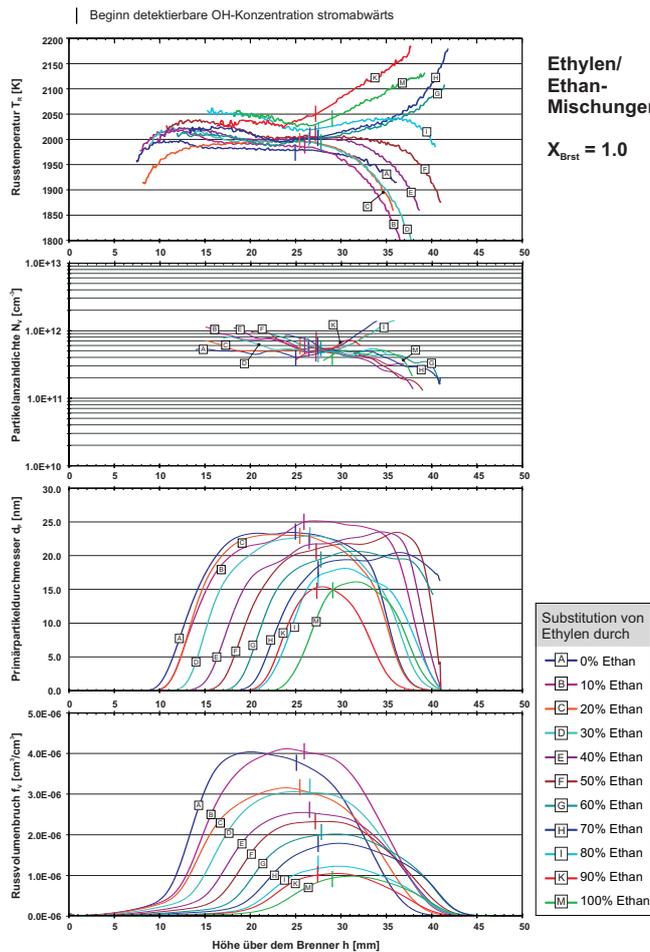


Abb. 5: Russpartikeltemperatur verschiedener Brennstoffmischungen

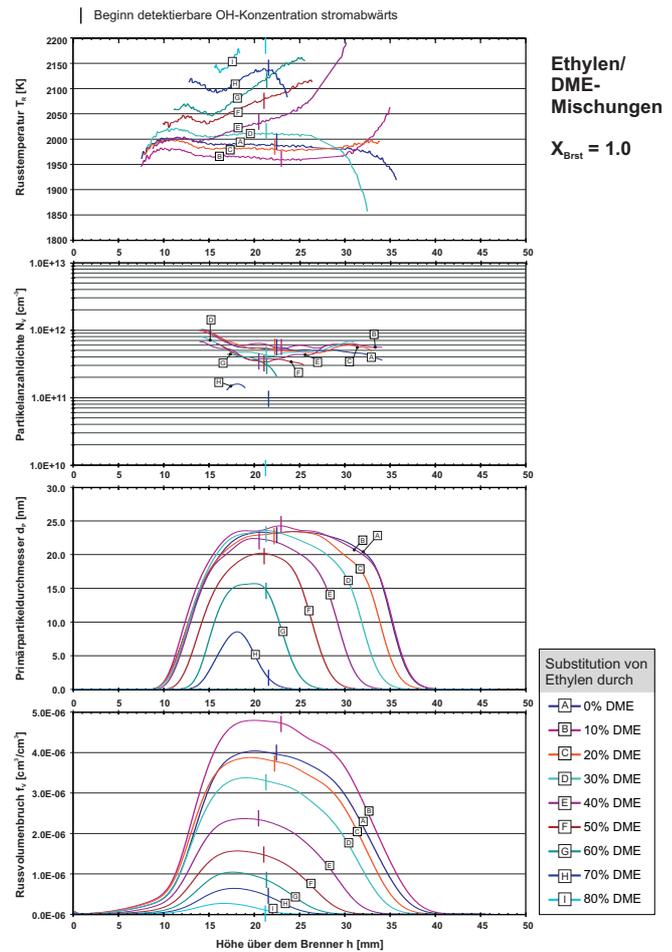
Abbildungen 6 und 7 zeigen dies für die Ethylen/Ethan- und für die Ethylen/DME-Mischungsreihe. Dargestellt sind der Russvolumenbruch  $f_V$ , die Primärpartikelgröße  $d_P$ , die Partikelanzahldichte  $N_V$  und die Russtemperatur  $T_R$  entlang der Flammenachse.

Bei den Ethylen/Ethanmischungen erfolgt mit zunehmendem Ethananteil eine Reduktion im Russvolumenbruch. Zurückzuführen ist dies auf einen verzögerten Beginn der Russbildung einerseits, als auch einer Reduktion des Russpartikelwachstums. Werden Russgebiete in den verschiedenen Flammen verglichen, so zeigt sich bei der Partikelanzahl, dass ähnliche Werte erreicht werden, sofern Russ vorhanden ist.

Die Russbildung bei Zusatz von DME beginnt immer in derselben Höhe. Die Partikelanzahl und das Partikelwachstum wird reduziert, was in einer Minderung des Russvolumenbruches resultiert.



**Abb. 6:** Russsparameter entlang der Flammenachse für Ethylen/Ethan Flammen



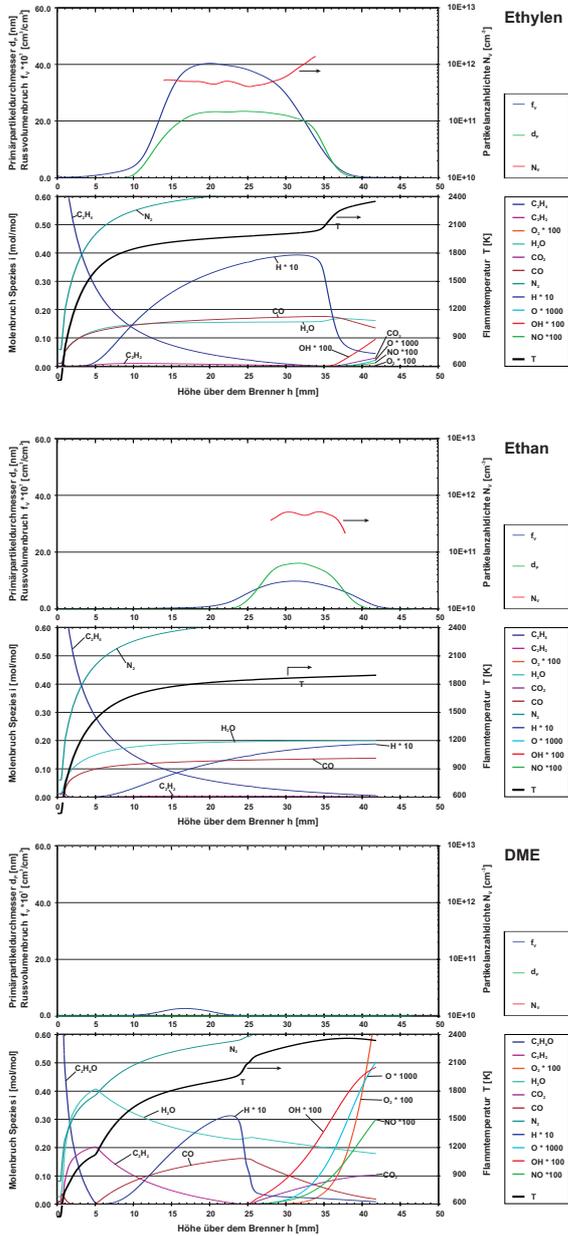
**Abb.7:** Russsparameter entlang der Flammenachse für Ethylen/DME Flammen

Es erweist sich, dass bei Ethanzumischung der Russ erst mit dem Eintritt in die OH-Zone abgebaut wird. Bei DME beginnt die Russreduktion bevor OH-Radikale zugegen sind. Dies deutet auf einen bisher nicht spezifizierten Russabbaumechanismus hin.

Auffällig ist sowohl bei Ethan als auch bei DME das Temperaturverhalten in der Flamme. Mit zunehmender Substitution steigert sich die Temperatur allgemein. Bei hohen Zumischungen wird die Temperatur stromabwärts zusätzlich durch die Annäherung des Russgebietes an die Reaktionszone gesteigert.

## Numerische Simulation

Für die Reinbrennstoffe Ethylen, Ethan und DME wurden die Flammen über eine Einschrittkinetik mit dem Programmpaket StarCD berechnet. Da hierbei jedoch nur die in der Globalreaktion vorkommenden Moleküle Brennstoff, Sauerstoff, Wasser und Kohlendioxid und das Inertgas Stickstoff berücksichtigt werden, lassen sich zunächst keine Aussagen über weitere vorhandene Spezies treffen. Um dennoch weitere Spezies mit einzu- beziehen wurde eine Gleichgewichtsberechnung mit CHEMKIN als postprocessing durchgeführt in welcher auch Dissoziationsprodukte und Zwischenprodukte mit in das Gleichgewicht eingeschlossen werden. In Abbildung 8 sind die berechneten Spezieskonzentrationen und Temperaturen auf der Flammenachse für die Reinbrennstoffe Ethylen, Ethan und DME dargestellt, sowie die gemessenen Russparameter: Russvolumenbruch, Primärpartikeldurchmesser und Partikelanzahldichte.



Um dennoch weitere Spezies mit einzu- beziehen wurde eine Gleichgewichtsberechnung mit CHEMKIN als postprocessing durchgeführt in welcher auch Dissoziationsprodukte und Zwischenprodukte mit in das Gleichgewicht eingeschlossen werden. In Abbildung 8 sind die berechneten Spezieskonzentrationen und Temperaturen auf der Flammenachse für die Reinbrennstoffe Ethylen, Ethan und DME dargestellt, sowie die gemessenen Russparameter: Russvolumenbruch, Primärpartikeldurchmesser und Partikelanzahldichte.

Sauerstoffatome gelangen in gebundener Form in die Flamme durch Diffusion der Produkte Kohlendioxid und Wasser. Im Gleichgewicht liegt brennstoffseitig zunächst Kohlenmonoxid vor. Weiter oben in der Flamme, beim Zusammen- treffen mit dem in der Umgebungsluft vorhanden Sauerstoff wird das Kohlenmonoxid durch Reaktion vollständig aufoxidiert, wobei es zu einer weiteren Wärmefreisetzung und damit Tempera- turerhöhung kommt.

Wasser enthält auch ein Sauerstoffatom. Diese kann im Falle von Ethylen und Ethan nur über die Diffusion Wasser und im geringen Masse durch die Gleichgewichtsbedingungen in der Flamme vorhanden sein. Im Falle von DME jedoch findet sich der dort gebundene Sauerstoff im Gleichgewicht in zusätzlichem Wasser wieder. Die hohe Wasserkonzentration ist ein wahr- scheinlicher Grund, dass die Russbildung einge- dämmt wird. Zudem kann Wasser bei hohen Temperaturen über das heterogene Wassergas- gleichgewicht mit Russ reagieren den Kohlen- stoff zu Kohlenmonoxid oxidieren.

**Abb. 8:** Berechnete Gleichgewichtskonzentrationen, Temperatur und Russ-Parameter

### **Teil B: Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck:**

Für eine zielgerichtete Optimierung der innermotorischen Verbrennung müssen die wesentlichen ablaufenden Prozesse bei der Brennstoff-Einspritzung, Gemischbildung, Zündung und Verbrennung bekannt sein. Dies ist aber schon am Anfang dieser eng miteinander verknüpften Prozesskette nicht gegeben: Trotz vieler vergangener und aktueller Forschungsvorhaben sind die ablaufenden Vorgänge bei der Einspritzung, dem Aufbrechen des Einspritzstrahls, der Atomisierung und Verdampfung der Brennstofftropfen sowie der Gemischbildung aufgrund ihrer ausserordentlichen Komplexität nicht genau bekannt.

Zielsetzung dieses Projekts ist die experimentelle Untersuchung der ablaufenden Prozesse bei der Einspritzung, dem Strahlaufbruch und dem nachfolgenden Zerfall der Tropfen und deren Verdampfung. Der Einfluss der normalerweise folgenden Zündung und Verbrennung des Gemischs wird durch die Einspritzung in ein inertes Gas (Stickstoff) ausgeschaltet.

Insgesamt wurden acht verschiedene Düsenspitzen mit einem zentralen, coaxial zur Düsenachse ausgerichteten Spritzloch mit unterschiedlichen Durchmessern und Lochlängen untersucht. Die Einspritzung erfolgte mit einem Common-Rail Einspritzsystem. Die Messungen wurden in einer Konstantvolumen-Versuchszelle mit externer Gasaufbereitung durchgeführt. Der Einfluss des Umgebungsdrucks und / oder der Umgebungstemperatur konnte auf diese Weise getrennt voneinander untersucht werden.

Die im Verlauf dieses Projekts gewonnenen Daten über die globale axiale und radiale Einspritzstrahlausbreitung und die lokalen Tropfengrößen- resp. Tropfengeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Parameter Gasdruck, Gastemperatur, Einspritzdüsenloch und Einspritzdruck dienen nicht nur dem besseren Verständnis der Vorgänge sondern bilden auch eine solide Datenbasis für die Validierung und Weiterentwicklung der Computer-Simulationsmodelle für Einspritzstrahlen.

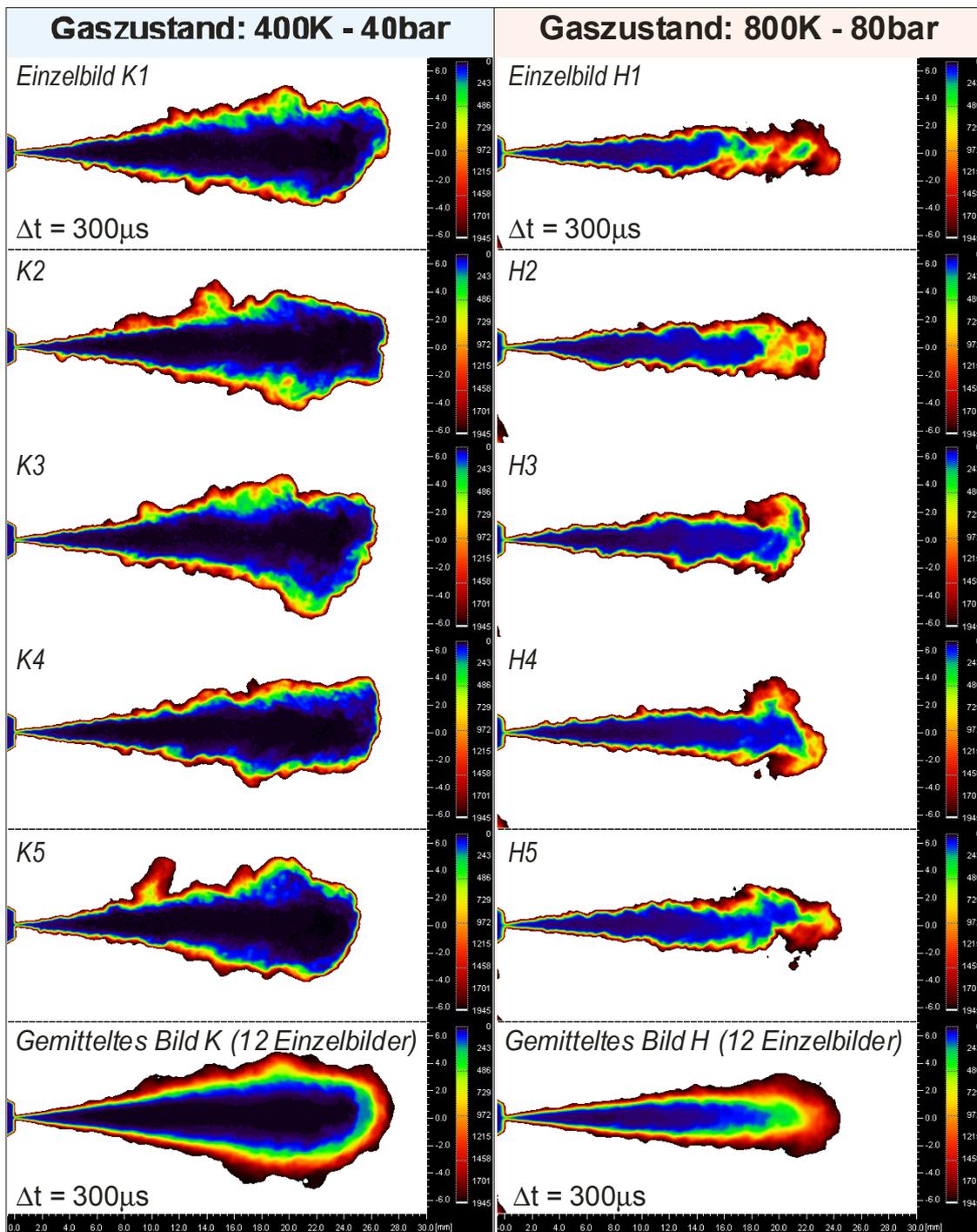
Die zeitabhängige *Ausbreitung des Einspritzstrahls* wurde mit der Schattenbildtechnik erfasst. Sie (d.h. die axiale Penetration, der Kegelwinkel und die Strahlgeschwindigkeit) gehört zu den wichtigsten Größen für die Auslegung der Dieselmotorischen Einspritzung. Sie bestimmt massgebend die Qualität der Gemischbildung, die Luftausnutzung im Brennraum und den allfälligen (unerwünschten) Auftrag von Brennstoff auf die Brennraumwände.

Neben der Verteilung des Brennstoffs im Raum durch die radiale und axiale Einspritzstrahlausbreitung spielt auch die Atomisierungsqualität, d.h. *mittlere Grösse und die Grössenverteilung der Tropfen* eine wichtige Rolle in der dieselmotorischen Gemischbildung. Sie wurde mit der Phasen Doppler Anemometrie Messtechnik an ausgewählten und für den Einspritzstrahl charakteristischen Punkten im Spray ausgemessen. Je kleiner die Tropfen bei einer gegebenen Brennstoffmenge sind, desto grösser ist die für den Wärmeübergang und die Verdampfung zur Verfügung stehende Fläche.

### **Zyklus zu Zyklus Variationen der Einspritzstrahlkonturen**

Bedingt durch die bei der Einspritzung vorhandenen grossen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten verlaufen die Zerfallsprozesse des Einspritzstrahls sehr heftig und unstetig (chaotisch). Dies hat zur Folge, dass jede Einspritzung ein Einzelereignis darstellt, das sich unter Umständen deutlich von den vorausgegangen und nachfolgenden Ereignissen unterscheidet.

Generelle Aussagen über das Verhalten des Einspritzstrahls oder Vergleiche mit theoretischen Modellen können nur mit über viele Einspritzungen gemittelten Daten erzielt werden. Die Unsicherheit (resp. die Standardabweichung) bleibt aber durch die chaotische Natur der im Strahl ablaufenden Zerfallsprozesse unabhängig von der Anzahl ausgewerteter Einspritzstrahlen gross.



**Abb. 9:** Zyklische Variationen der Einspritzstrahlkonturen bei gleicher Gasdichte, aber unterschiedlichen Gastemperaturen. Schattenbilder der Düse Nr. 1 ( $\varnothing 0.15 \times 0.60\text{mm}$ ),  $D_p = 900\text{bar}$ . (Weiss = Hintergrund, Schwarz = Strahlkern).

In Abbildung 9 sind je fünf Schattenbilder einzelner Einspritzungen mit den entsprechenden, über alle Einspritzungen gemittelten Aufnahmen für verdampfende und nicht verdampfende Umgebungsbedingungen dargestellt:

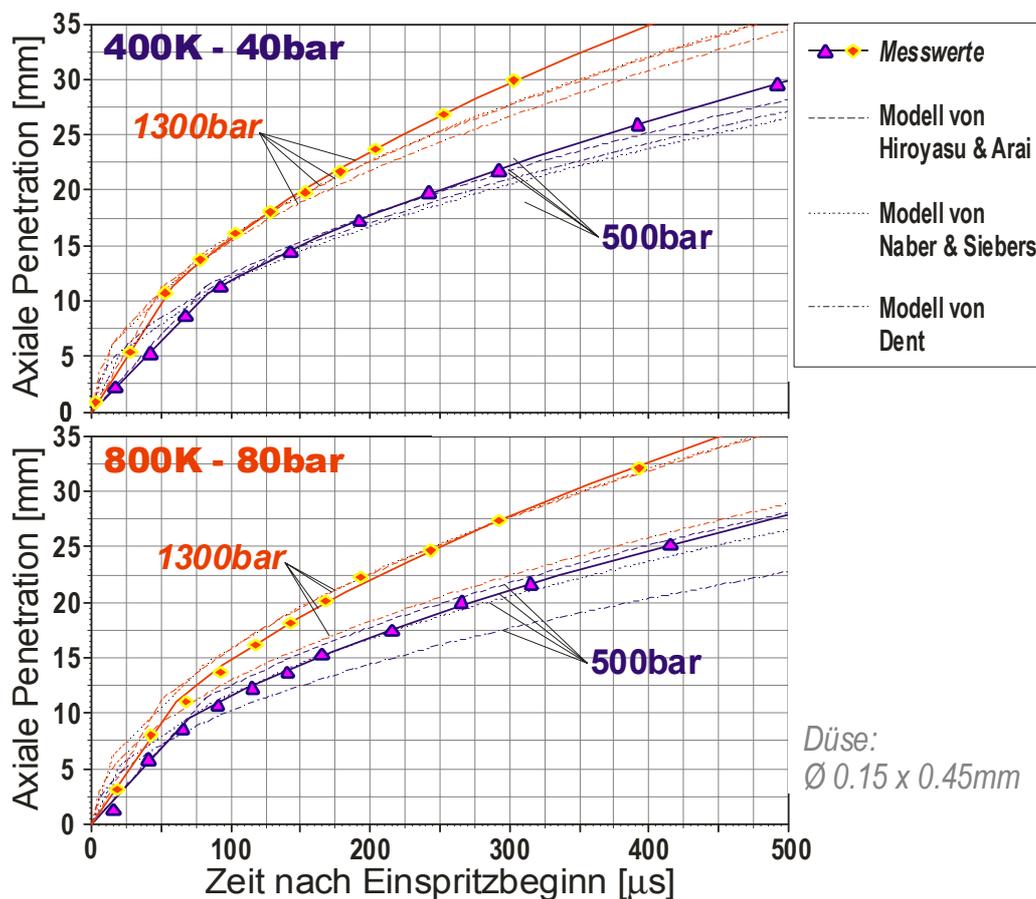
**Nicht verdampfend (400K - 40bar):** In den Einzelbildern sind insbesondere im vorderen Bereich der Einspritzstrahlen grosse Asymmetrien erkennbar. Entlang der seitlichen Konturen der Ein-

spritzstrahlen ragen teilweise Strukturen radial aus dem Strahl. Der Gradient der Grauwerte (d.h. der Tropfendichte) an der Strahlspitze ist sehr steil.

**Verdampfend (800K - 80bar):** Durch die intensive Verdampfung verkürzt sich der dichte Strahlkern. Der vordere Bereich des Einspritzstrahls besteht aus einem relativ lockeren Tropfennebel (rot-schwarze Zonen), indem einzelne "Inseln" mit grosser Tropfen- resp. Flüssigkeitsdichte erkennbar sind (grün-blaue Zonen). Diese dichten Flüssigkeitsstrukturen treten laufend aus dem dichten Strahlkern aus und treiben die Einspritzstrahlpenetration voran. Ihre Lage weist ähnliche Asymmetrien auf wie die Strahlkonturen im nicht verdampfenden Fall. Es sind keine radial aus dem Strahl ragenden Strukturen zu sehen, da diese nur wenig Flüssigkeit enthaltenden Zonen sehr schnell verdampfen.

Naturgemäss hat die Verdampfung nahe an der Düse noch keinen grossen Einfluss auf den Einspritzstrahl, die radialen Dichte- resp. Intensitätsgradienten in den Schattenbildern der Einspritzstrahlen entsprechen denjenigen im nicht verdampfenden Fall. An der Strahlspitze hingegen ist der Dichte- resp. Intensitätsgradient wesentlich kleiner (sofern sich zum Zeitpunkt der Aufnahme keines der dichten Tropfenpakete an der Strahlspitze befindet).

### Einspritzstrahl-Penetration, Vergleich mit theoretischen Ansätzen aus der Literatur



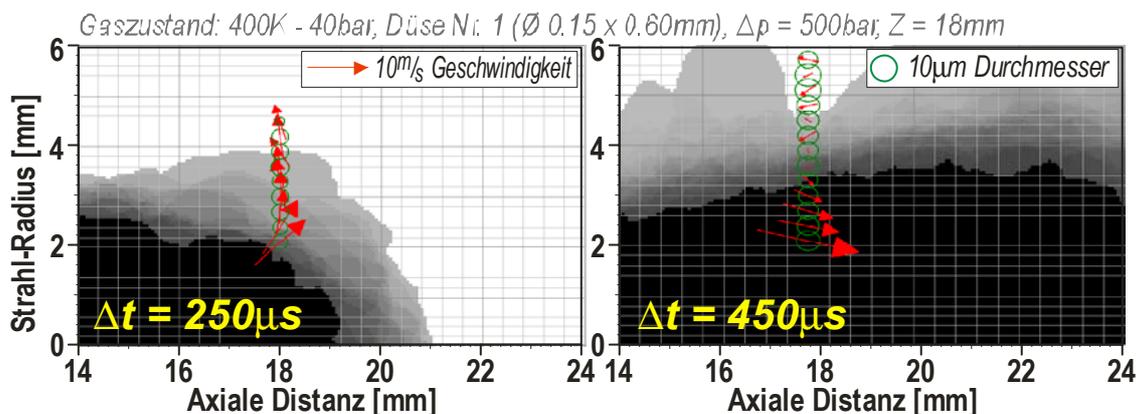
**Abb. 10:** Gemessene und theoretische Penetrationsverläufe  $S(t)$ , Düsenspitze  $\varnothing 0.15 \times 0.45\text{mm}$ , Gaszustand 400K-40bar resp. 800K-80bar.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der gemessenen Penetrationsverläufe  $S(t)$  mit einigen Modellen aus der Literatur bei gleicher Gasdichte, aber unterschiedlichen Gastemperaturen. Die einzel-

nen Messpunkte der Penetrationsmessung wurden zuvor mit der bestimmten Verschleppungszeit (bedingt durch das langsame Öffnen der Düse) korrigiert, die ausgezogenen Linien zeigen den Verlauf des in dieser Arbeit entwickelten, in die Messwerte gelegten Ausbreitungsmodells.

- Die Auswertung der eigenen Messungen zeigt, dass der Einfluss der Gasdichte auf die Strahlausbreitung im düsennahen Bereich nicht vernachlässigt werden darf: (Literatur: nicht berücksichtigt, eigene Messungen:  $S \propto \rho_{\text{Gas}}^{-0.29}$ ).
- Bei 400K Gastemperatur liegen die gemessenen Einspritzstrahlpenetrationen und alle in dieser Graphik berücksichtigten Modelle aus der Literatur im Bereich der Aufbruchlänge (nach 12mm) nahe beieinander. Erst weiter von der Düse entfernt zeigt sich, dass die theoretischen Verläufe hinter den Messwerten zurückbleiben. (Literatur:  $S \propto t^{0.50}$ , eigene Messungen:  $S \propto t^{0.58}$ ).
- Die Penetrationsverläufe nach den Modellen von Hiroyasu & Arai, Naber & Siebers und Dent unterscheiden sich (im düsenfernen Bereich) nur wenig.
- Bei gleicher Gasdichte, aber 800K Gastemperatur sind die gemessenen Penetrationslängen durch den Einfluss der Verdampfung kürzer als im kalten Fall. Im düsenfernen Bereich ist die Übereinstimmung mit den theoretischen Verläufen gemäss Hiroyasu & Arai und Naber & Siebers nun sehr gut.
- Das Modell von Dent, das als einziges die Gastemperatur berücksichtigt, überschätzt den Einfluss der Verdampfung: Im Vergleich zu den Messungen fällt der theoretische Penetrationsverlauf viel zu kurz aus (Dent:  $S \propto T^{-0.25}$ , eigene Messungen:  $S \propto T^{-0.15}$ ).

### Überlagerung von Schattenbild und zweidimensionalen PDA Messungen bei nicht verdampfenden Einspritzstrahlen



**Abb. 11:** Vergleich Schattenbilder und zweidimensionale PDA Messungen bei einem axialen Abstand von  $120 \cdot d_0 = 18\text{mm}$ . Nicht verdampfende Umgebungsbedingungen.

Abbildung 11 zeigt eine Überlagerung der PDA Messungen mit den entsprechenden Schattenbildern des Einspritzstrahls. Die Abstufung der Graustufen in den Schattenbildern von Schwarz nach Weiss entspricht einer abnehmenden Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Strahls an der entsprechenden Stelle beim aktuellen Zeitschritt (Schwarz = immer eine Strahlkontur vorhanden, Weiss = nie, d.h. Hintergrund).

Der Zeitpunkt der linken Abbildung ist so gewählt, dass der Einspritzstrahl eben die Messpunkte erreicht. Aus den PDA Messungen ist erkennbar wie die Strahlspitze das Gas vor sich verdrängt. Die mittleren Tropfengeschwindigkeiten sind zum Teil senkrecht nach aussen gerichtet, ganz am Rand weist der Geschwindigkeitsvektor sogar leicht Rückwärts in Richtung Einspritzdüse (wie

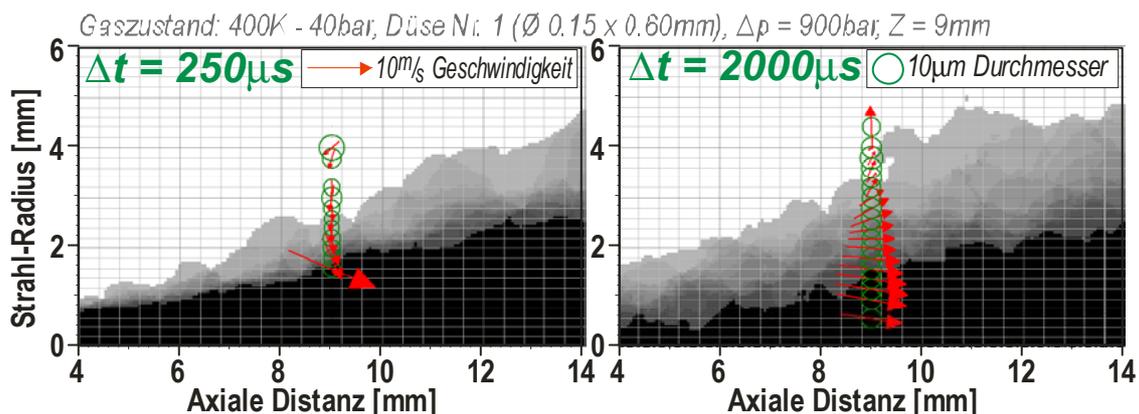
auch an den Geschwindigkeitsverläufen der äusseren Messpunkte in Abbildung 5.18 erkennbar ist).

Im rechten Teil der Abbildung 11 hat sich die Strahlspitze bereits weit von den Messpunkten entfernt. Die Tropfengeschwindigkeiten an den äussersten Messpunkten zeigen in Richtung der Einspritzdüse - d.h. die Tropfen an diesen Messpunkten charakterisieren die induzierte Gasströmung um den Einspritzstrahl herum. Auch im inneren des Einspritzstrahls sind die mittleren Geschwindigkeitsvektoren trotz der kegelförmigen Ausbreitung des Einspritzstrahls immer nach innen gerichtet, dies auch wenn die Gewichtung für die Mittelwertbildung nicht über die Tropfenzahl sondern über das Tropfenvolumen erfolgt!

Diese Diskrepanz zwischen der kegelförmigen Ausbreitung des Einspritzstrahls und der Richtung der mittleren Tropfengeschwindigkeiten in den PDA Messungen ist ein Hinweis auf die Art des Flüssigkeitstransports vom Strahlkern an die Strahloberfläche: Erfolgt dieser nicht durch eine Tröpfchenströmung, sondern durch beim Aufbrechen des Strahlkerns entstehende, nach aussen geschleuderte grössere Flüssigkeitselemente oder sehr dichte "Tropfencluster", so können sie nicht mit der PDA Messtechnik erfasst werden: sie sind zu dicht oder die darin enthaltenen grossen Tropfen sind zu stark deformiert.

### Vergleich zu Messungen bei $60 \cdot d_0 = 9\text{mm}$ Abstand von der Düse

Der Einspritzstrahl ist näher an der Einspritzdüse sowohl dichter als auch schneller - beides erschwert PDA Messungen, so dass die "Sichtweite" in den Strahl hinein weiter abnimmt.



**Abb. 12:** Vergleich Schattenbilder und zweidimensionale PDA Messungen bei einem axialen Abstand von  $60 \cdot d_0 = 9\text{mm}$ . Nicht verdampfende Umgebungsbedingungen.

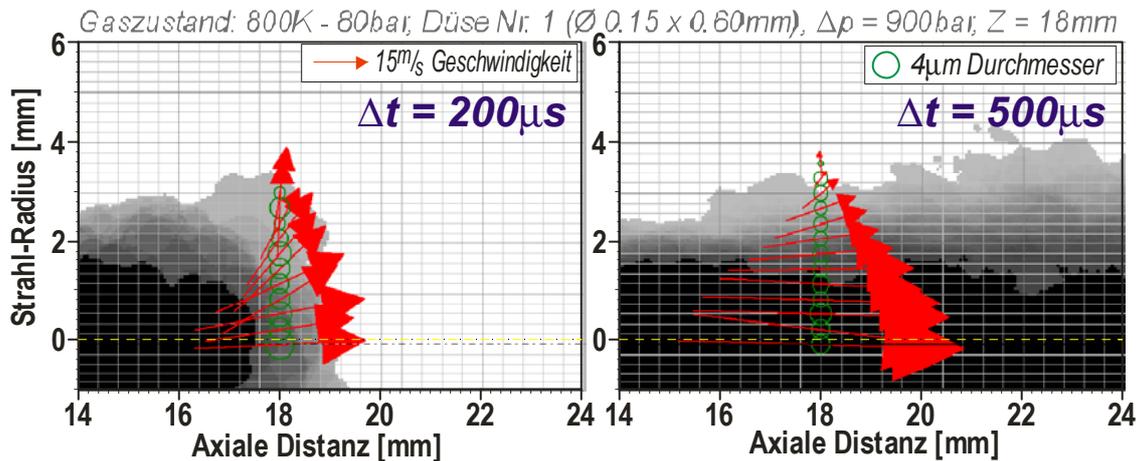
In Abbildung 12 ist wie zuvor in Abbildung 11 eine Überlagerung der aus den Schattenbildern berechneten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Strahlkonturen mit den entsprechenden zweidimensionalen PDA Messungen abgebildet, hier bei einem axialen Abstand von der Düsen Spitze von  $60 \cdot d_0 = 9\text{mm}$ .

In der Hauptphase der Einspritzung (im linken Teil der Abbildung) ist die mittlere Tropfengeschwindigkeit am Strahlrand senkrecht in den Strahl hinein gerichtet - auch hier weisen die gemessenen Tropfengeschwindigkeiten auf die Richtung der induzierten Gasströmung hin. Der grosse Geschwindigkeitsgradient zwischen den zwei innersten Messpunkten deutet darauf hin, dass sich der Rand des eigentlichen Einspritzstrahls im Bereich dieser Messpunkte befindet.

Der rechte Teil der Abbildung 12 zeigt den nach dem Einspritzende im Raum zurückbleibenden Tropfennebel. Da die induzierte Gasströmung nicht mehr durch den Einspritzstrahl angetrieben wird, schwächt sie sich rasch ab. Das radiale Geschwindigkeitsprofil der Strömung wird breiter, ganz am Rand deuten die Geschwindigkeitsvektoren (und einzelne Strahlkonturen) auf torusförmige Wirbel um den Einspritzstrahl hin.

## Überlagerung von Schattenbild und zweidimensionalen PDA Messungen bei verdampfenden Einspritzstrahlen

Eine Überlagerung der PDA Messungen mit den entsprechenden Schattenbildern bei verdampfenden Umgebungsbedingungen ist in Abbildung 13 zu sehen. Die Abstufung der Graustufen in den Schattenbildern von Schwarz nach Weiss entspricht einer abnehmenden Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Strahls an der entsprechenden Stelle beim aktuellen Zeitschritt (Schwarz = immer eine Strahlkontur vorhanden, Weiss = nie, d.h. Hintergrund).



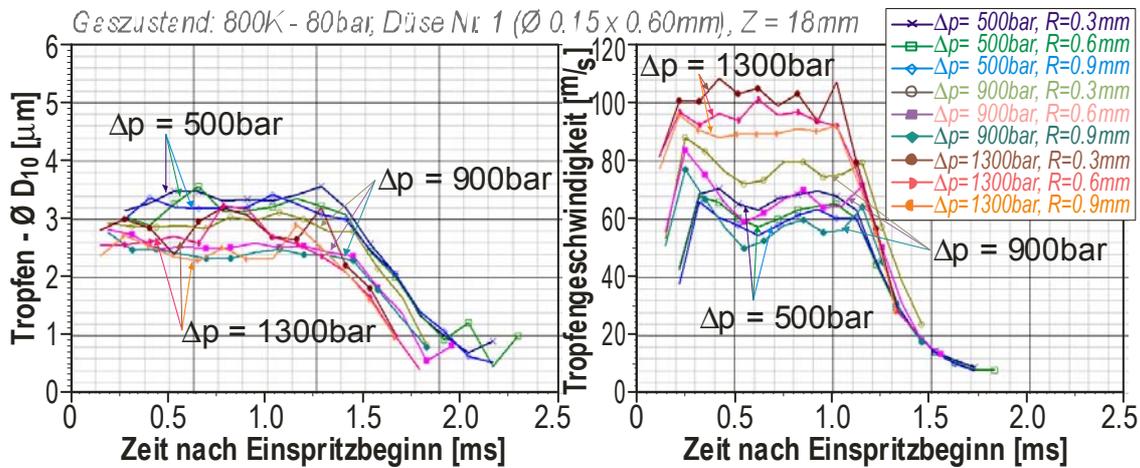
**Abb. 13:** Vergleich Schattenbilder und zweidimensionale PDA Messungen bei einem axialen Abstand von  $120 \cdot d_0 = 18\text{mm}$ . Verdampfende Umgebungsbedingungen.

Auf der linken Seite der Abbildung 13 hat die Strahlspitze eben die axiale Position der Messpunkte erreicht. Die vordersten Tropfen widerspiegeln an dieser Stelle sowohl die Bewegung des Einspritzstrahls an sich als auch die Bewegung des vom Strahl verdrängten Gases (durch die mitgerissenen, noch nicht verdampften Tröpfchen).

Auf der rechten Seite der Abbildung befinden sich die Messpunkte im stationären Einspritzstrahlbereich hinter der Strahlspitze. Im Vergleich zum entsprechenden Bild des nicht verdampfenden Einspritzstrahls (Abbildung 11) fällt auf, dass hier die mittleren Tropfengeschwindigkeiten nach aussen gerichtet sind, also der kegelförmigen Einspritzstrahlausbreitung viel besser entsprechen. Dies kann auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Der die nicht verdampfenden Einspritzstrahlen umgebende Tropfennebel ist bei hohen Gastemperaturen nicht vorhanden (verdampft), und ohne diese Tröpfchen fehlen die notwendigen Tracer für die Erfassung der Gasbewegung. Alle im Einspritzstrahl vorhandenen Tröpfchen befinden sich deshalb in der kurzen Phase zwischen ihrer "Produktion" (durch den Zerfall grösserer Tropfen etc.) und ihrer "Auflösung" durch die Verdampfung. Auch die Geschwindigkeit dieser Tröpfchen liegt zwischen der Geschwindigkeit bei der Produktion (d.h. die Geschwindigkeit der grösseren Flüssigkeitsstrukturen) und der Geschwindigkeit der Gasströmung im Einspritzstrahl. Je höher die Gastemperatur und/oder die Flüssigkeitstemperatur, desto kürzer ist die Lebensdauer der Tröpfchen, desto mehr widerspiegelt die Tropfengeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Messung diejenige der grösseren Flüssigkeitsstrukturen.
- Im Fall von nicht verdampfenden Einspritzstrahlen ist die Lebensdauer der Tröpfchen sehr lang, fast alle vorhandenen Tropfen im Einspritzstrahl widerspiegeln daher zum Zeitpunkt der Messung die Geschwindigkeit der induzierten Gasströmung.

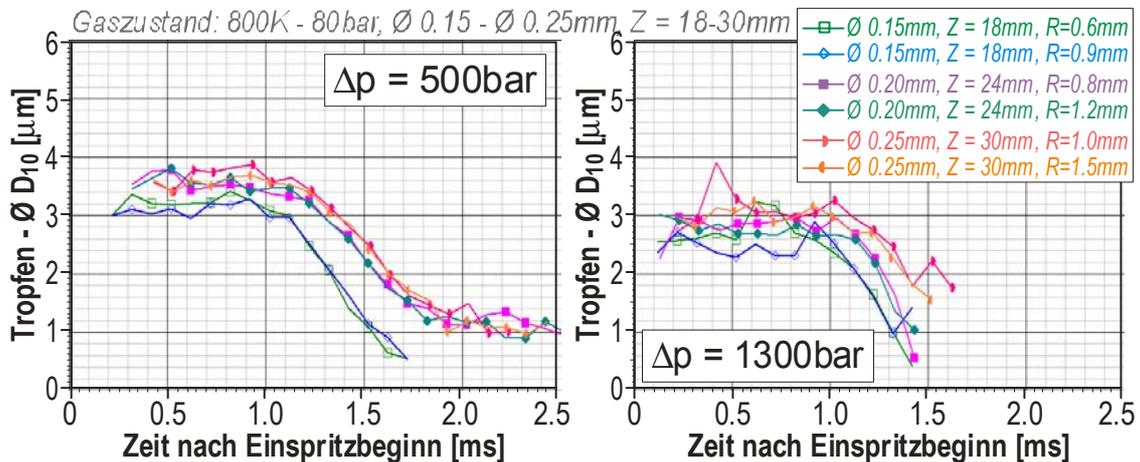
### Einfluss des Einspritzdrucks auf die Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten unter verdampfenden Umgebungsbedingungen



**Abb. 14:** Vergleich der Tropfengrößen und Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Einspritzdrücken, verdampfende Einspritzstrahlen.

Da unter verdampfenden Umgebungsbedingungen PDA Messungen bis ins Zentrum der Einspritzstrahlen hinein möglich sind kann der Einfluss des Einspritzdrucks auf die mittleren Tropfengeschwindigkeiten deutlich erkannt werden (Abbildung 14). Bei einer Erhöhung des Einspritzdrucks von  $\Delta p = 500\text{bar}$  auf  $\Delta p = 1300\text{bar}$  sinkt der mittlere Tropfendurchmesser  $D_{10}$  um 25% ab.

### Einfluss des Düsenlochdurchmessers auf die Tropfengrößen unter verdampfende Umgebungsbedingungen



**Abb. 15:** Einfluss des Düsenlochdurchmessers  $d_0$  auf die Tropfengrößen im Einspritzstrahl, verdampfende Umgebungsbedingungen.

Abbildung 15 zeigt den Einfluss des Düsenlochdurchmessers auf die mittleren Tropfengrößen  $D_{10}$  unter verdampfenden Umgebungsbedingungen. Im Gegensatz zu den entsprechenden Messungen an nicht verdampfenden Einspritzstrahlen ist in diesem Fall unabhängig vom Einspritzdruck der Einfluss des Düsenlochdurchmessers auf die Tropfengrößen erkennbar: Bei einer Änderung des Lochdurchmessers von  $\varnothing 0.15\text{mm}$  auf  $\varnothing 0.25\text{mm}$  steigen die mittleren Tropfendurchmesser  $D_{10}$  an vergleichbaren Messpunkten im Einspritzstrahl um 20% bis 25% an.

## Nationale Zusammenarbeit

**Teil A:** Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe Reaktionsanalyse des Paul Scherrer Institutes, Villigen durchgeführt.

**Teil B:** Für den Betrieb der Hochtemperatur und Hochdruckzelle wurde mit der Gruppe Reaktionsanalyse des Paul Scherrer Institutes, Villigen zusammengearbeitet.

## Internationale Zusammenarbeit

**Teil B:** Mit der University of Loughborough auf dem Gebiet der Laserdiagnostik (Dr. G. Wigley)

## Bewertung

### **Teil A:**

Am Beispiel von Dimethylether (DME) konnte nicht nur der russmindernde Effekt von sauerstoffhaltigen Brennstoffen im Zusammenspiel von Russbildung und  $\text{-oxidation}$  quantitativ belegt werden. Russentwicklungsstudien lassen auch Schlüsse auf die Wirkungsweise zu.

Der im Brennstoffmolekül gebundene Sauerstoff und sein Anteil am Gesamtbrennstoff hat im Vergleich zu einer reinen Brennstoffstrukturänderung einen wesentlich ausgeprägteren Einfluss auf die Russentwicklung in einer laminaren Diffusionsflamme. Wird statt dem olefinischen Brennstoff Ethylen (C=C Bindung) der parafinische Brennstoff Ethan (C-C Bindung) verwendet, so enthält die Flamme 75 % weniger Russ. Denselben Netto-Effekt kann man bereits durch eine 50 %-ige Substitution von Ethylen durch DME erreichen.

Bei genauerer Betrachtung der Entwicklung einzelner Russparameter, ist festzustellen, dass die erzielte Reduktionswirkung auf verschiedenen Wegen erreicht wird. Während Ethan im Vergleich zu Ethylen, vornehmlich das Partikelwachstum hemmt, wird bei DME zusätzlich auch die Partikelanzahl reduziert.

Desweiteren wird bei einer Zumischung von DME zur Ethylenflamme der Russ bereits abgebaut, bevor OH-Radikale detektierbar sind. Russ in Ethylen-Ethanflammen wird erst dann oxidiert, wenn er in die OH-Zone eintritt. Offensichtlich wird durch DME ein weiterer Russabbaumechanismus aktiviert oder ein bereits bestehender verstärkt.

Durch numerische Berechnungen der Reibrennstoffflammen sowie anschliessende thermodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen der in der Flamme vermuteten Spezies, deuten darauf hin, dass sich der Sauerstoff aus dem DME-Molekül in Wasser umlagert. Verglichen mit der berechneten Ethylen bzw. Ethan Flamme ist bei DME wesentlich mehr Wasser in der Flamme zu finden. Wasser gilt als russbildungshemmend und kann über das so genannte heterogene Wassergasgleichgewicht sogar Russ abbauen.

Für die Modellierung der Russbildung und  $\text{-oxidation}$  steht eine weitgefaste Datensammlung zur Verfügung, welche zur Verbesserung und Validierung herangezogen werden kann.

### **Teil B:**

In diesem Projekt konnte die Zweiphasenströmung durch rationale Kopplung optischer Messtechniken und statistischen Auswertemethoden charakterisiert werden. Die wohlüberlegte Parameterwahl bei der Versuchsdurchführung liefert geeignete und problemorientierte Datensätze zur Vali-

dierung und Verbesserung von Spraymodellen. Diese konnten bereits für hausinterne StarCD-Berechnungen erfolgreich genutzt werden.

Es wurden Diesel-Einspritzstrahlen unter hohem Gasdruck bei verdampfenden und nicht verdampfenden Umgebungsbedingungen untersucht. Die Experimente fanden in einer Hochtemperatur- und Hochdruckzelle statt, die Experimente in einem grossen, voneinander unabhängigen Gasdruck- und Gastemperaturbereich ermöglicht, inklusive der bei der dieselmotorischen Einspritzung vorherrschenden Bedingungen. Der Einsatz von Stickstoff als Arbeitsgas erlaubte die Untersuchung von verdampfenden Einspritzstrahlen ohne die Beeinflussung der Messungen durch die Zündung und Verbrennung des dabei entstehenden Gemischs. Im Verlauf dieser Arbeit wurden folgende Versuchsparameter variiert: Gasdruck und Gastemperatur in der Zelle, der Einspritzdruck, der Düsenlochdurchmesser und das Verhältnis zwischen Düsenlochlänge und Lochdurchmesser. Total waren insgesamt 96 Parameterkombinationen möglich.

Die Ergebnisse aus diesem Projekt tragen dazu bei, die beim Zerfall von Diesel-Einspritzstrahlen ablaufenden Vorgänge besser verstehen zu können und bilden gleichzeitig eine solide Datenbasis für den Test und die Weiterentwicklung von Einspritzstrahlmodellen in Simulationsprogrammen.

Zwei sich sehr gut ergänzende Messmethoden wurden bei den Untersuchungen eingesetzt: Die globale Einspritzstrahlausbreitung sowie die Strukturen der flüssigen Phase im Einspritzstrahl konnten mit der Schattenbildtechnik erfasst werden. Die Messung der lokalen Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten im Einspritzstrahl erfolgte mit der Phasen-Doppler-Anemometrie Messtechnik (PDA).

Diese Arbeit hat zu einem besseren Verständnis der Dieseleinspritzung beigetragen. Neben dem Einfluss der Injektorcharakteristik auf die Sprayausbreitung ist vor allem das Verhalten der Zweiphasenströmung unter verdampfenden Bedingungen von grossem Interesse. Die umfangreichen Datensätze sind Grundlage für die Weiterentwicklung von Einspritzstrahlmodellen bei der numerischen Simulation.

## Referenzen

- [1] Aufdemblatten, S., Schänzlin, K., Bertola, A., Mohr, M., Przybilla, K., Lutz, T. : „**Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungsmotoren**“, MTZ 11/2002, S. 962-974
- [2] Konstantinos Boulouchos, Stephan Kunte, Bruno Schneider: **BFE Jahresbericht 2001 des Projekts „Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasen Strömungen“/76664**, 2001.

## Publikationen

- Kunte, S.: „**Influence of oxygenated fuels on the sooting behaviour within a laminar diffusion flame**“, 5<sup>th</sup> Int. Conference on Nanoparticle Measurement 2001, Zürich
- Kunte, S.: „**The influence of oxygenated fuels on the soot production potential – experiments and modelling**“, 6<sup>th</sup> Int. Conference on Nanoparticle Measurement 2002, Zürich
- Kunte, S.: „**Optical measuring techniques towards the characterization of soot formation and oxidation within a laminar diffusion flame**“, ERCOFTAC Tagung, 11.06.2001, ETH Zürich

Kunte S., **“Untersuchungen zum Einfluss von Brennstoffstruktur und -sauerstoffgehalt auf die Russbildung und -oxidation in laminaren Diffusionsflammen”**, Dissertation ETH Zürich, 2003

Schneider B., **“Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck”**, Dissertation ETH Zürich, 2003