

LASEROPTISCHE UNTERSUCHUNGEN AN DICHEM SCHWERÖLSPRAY

LASEROPTICAL ANALYSIS AT DENSE HAVY FUEL OIL

M. Niendorf, B. Buchholz, C. Fink, H. Harndorf

Universität Rostock, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl für Kolbenmotoren und Verbrennungsmaschinen

PDA, LIF, Laser-Lichtschnitt, Mie-Streulicht, kombinierte Streulicht-Schlierenaufnahmen

PDA, LIF, Laser-Sheet, Mie-backscatter-light, combined Mie-Schlieren-photography

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Methoden und Messverfahren vorgestellt, die zur Charakterisierung von Parametern realer Kraftstoffsprays von Großdieselmotoren eingesetzt werden bzw. für den Einsatz vorbereitet werden. Anhand validierter Ergebnisse aus einem abgeschlossenen Projekt wird gezeigt, dass Messwerte die mit Hilfe laseroptischer Messverfahren an einer Hochdruckkammer erzeugt wurden, wichtige Ausgangspunkte zum Eingriff in den Brennverlauf und damit zur Reduzierung der Schadstoffbildung an Großdieselmotoren liefern. Um das Verständnis für die Prozesse der Gemischaufbereitung zu vertiefen, werden Methoden vorgestellt mit denen durch Kopplung von optischen und laseroptischen Messverfahren die fortgeschrittenen Phasen der Gemischbildung an realen Kraftstoffsprays untersucht werden sollen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen helfen, die Prozesskette von der Einspritzung über die Zerstäubung und Verdampfung bis hin zur Zündung weiter zu entschlüsseln um damit systematisch den Schadstoffausstoß moderner Großdieselmotoren zu minimieren.

Einleitung

Die Diskussion um die globale Erwärmung und die damit in Zusammenhang gebrachten Fragen der Treibhausgase zwingt dazu, besonders auch im Bereich von Großdieselmotoren Maßnahmen zu ergreifen, um relevante Schadstoffemissionen derartiger Antriebe zu verringern. Bei Dieselmotoren bildet die Kraftstoffeinspritzung als eine innermotorische Maßnahme zur Steuerung der Verbrennung ein entscheidendes Instrument zur Minimierung schädlicher Abgaskomponenten. Die Untersuchung von Einspritzsprays ist eine wesentliche Grundlage für die Auslegung der Einspritzkomponenten moderner Großdieselmotoren. Trotz fortgeschrittener CFD-Verfahren zur Berechnung von Einspritzsprays sind die Modelle der Berechnungen auf versuchsgestützte Kalibrierwerte angewiesen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die verwendeten Kraftstoffe stark schwankenden physikalischen und chemischen Eigenschaften unterliegen, wie es bei typischen Schiffskraftstoffen der Regelfall ist.

Die optische Untersuchung der Parameter dieser Kraftstoffsprays mit wechselnden fluidischen und optischen Eigenschaften stellt besondere Anforderungen an die zu verwendende Messtechnik. In dem Projekt EMI-MINI-I und dem momentan laufenden Folgeprojekt EMI-MINI-II werden Untersuchungen zu Maßnahmen der Emissionsminimierung von Großdieselmotoren durchgeführt. In diesem Verbundprojekt arbeiten Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft eng miteinander zusammen. Ziel ist es, durch konsequente Verbindung von theoretischer Grundlagenforschung, anwendungsorientierten Labor- und Motorversuchen,

22.2

begleitenden CFD-Berechnungen bis hin zur Validierung am Vollmotor neue Wege der Emissionsminimierung konsequent bis zum Endprodukt umzusetzen.

Die Gemischaufbereitung durch die die Verbrennung im Motor maßgeblich bestimmt wird, wird im Wesentlichen durch die Kraftstoffzerstäubung determiniert.

Dieser zentrale Bereich stellt den Hauptgegenstand der Untersuchungen an der Universität Rostock dar. Mit Sprayuntersuchungen an einer speziell für diese Anwendung angepassten Einspritzkammer werden Abhängigkeiten der Sprayparameter von Motorbedingungen und Kraftstoffeigenschaften analysiert und systematisiert. Über die Entwicklung und Auslegung der Hochdruckkammer wurde bereits in einem vorhergehenden GALA-Beitrag [NIENDORF 2004] berichtet. In einer Vielzahl von Untersuchungen konnten so bereits wichtige Zusammenhänge von mikroskopischen und makroskopischen Sprayparametern und zugehörigen motorrelevanten Einstellgrößen ermittelt werden. Wichtige Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes entstanden sind, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Optische Untersuchungen zur Klassifizierung von Kraftstoffsprayparametern

Das Hauptaugenmerk der gegenwärtigen Untersuchungen liegt auf den erweiterten Phasen der Gemischaufbereitung. Dies soll auch unter besonderer Beachtung hochviskoser Schwerölqualitäten erfolgen. Die erweiterte Phase der Gemischaufbereitung beinhaltet die Verdampfung des Kraftstoffs, die Vermischung mit der Brennraumluft, erste chemische Reaktionen mit Radikalen- und OH-Bildung bis zum Auftreten sichtbarer Flammen im Brennraum.

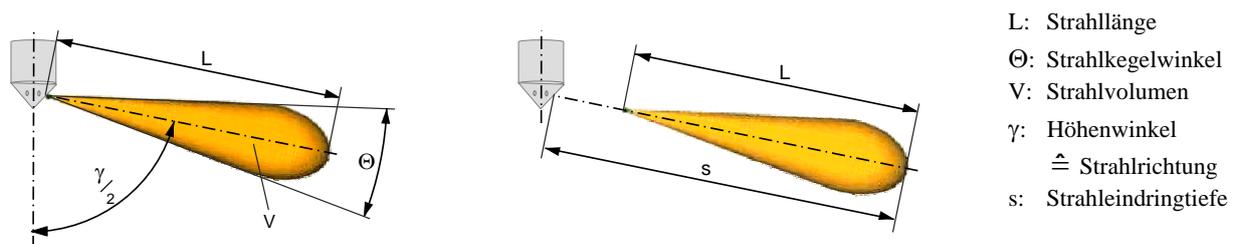


Bild 1. Bestimmung der makroskopischen Sprayparameter [HOPP 05]

Die Untersuchungsmethodik folgt dabei dem Ablauf der Gemischbildung und erfordert entsprechend angepasste Messmethoden. Mit Mie-Streulichtuntersuchungen werden die makroskopischen Parameter des Sprays entsprechend Bild 1 bestimmt. Spraykegelwinkel, Spraylänge und Sprayvolumen in Abhängigkeit der Einspritzzeit, des Brennraumdruckes sowie des Einspritzdruckes werden für unterschiedliche Kraftstoffqualitäten ermittelt und in Zusammenhang gebracht. Diese Werte bilden bereits wichtige Eckpunkte zur Gestaltung der Einspritzparameter bei der Auslegung der Motorsteuerung im Applikationsprozess moderner Common-Rail-Großdieselmotoren.

Mit Hilfe der Laser-Phasendoppler-Anemometrie werden mikroskopische Eigenschaften des Einspritzsprays untersucht. Das sind insbesondere die Tröpfchengrößenverteilung, die Tröpfchengeschwindigkeiten und der Sauterdurchmesser. Die Tröpfchengrößenverteilung lässt Aussagen über den Zerfallsgrad und Verdampfungseigenschaften des Sprays des

Kraftstoffs zu. Der Sauterdurchmesser (SMD) mit $SMD = d_{32} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i}$ stellt ein Verhältnis

der Tröpfchenoberfläche zum Tröpfchenvolumen dar und gibt somit Aufschluss über die jeweils aktive Tröpfchenoberfläche im Einspritzspray. Aus diesen Werten lassen sich wichtige Kenngrößen zur Gemischbildung im Brennraum für unterschiedliche Lastbedingungen des Motors ableiten.

Um die Gemischaufbereitung auch in den weiteren Phasen der Verdampfung untersuchen zu können, soll ein kombiniertes Schlieren-Streulicht-Verfahren zum Einsatz kommen. Durch die gleichzeitige Beleuchtung des Sprays mit monochromatischem Laserlicht im Hintergrund und multispektralem Licht aus einer Xenon-Lichtquelle bei dem durch eine Blende im Brennpunkt einer Linse nur das parallele Licht aufgenommen wird, sollen Brechungen, die durch Dampfanteile des Einspritzsprays entstehen und das flüssige Spray selbst gleichzeitig mit einer Anordnung aufgenommen werden. Dieses Verfahren wurde in [WIRTH 96] für Diesel und monomolekulare Kraftstoffe vorgestellt und soll im vorliegenden Projekt auf schiffstypische Kraftstoffe angewendet werden.

Beginnende chemische Reaktionen gehen mit der Bildung freier OH-Radikale einher. Der Nachweis dieser OH-Bande zur Ortung von Zündorten und so genannter „cold flames“ im Kraftstoffspray erfolgt zweckmäßigerweise mit Hilfe der Laserinduzierten Fluoreszenz. Dabei wird der Kraftstoff in ein bis auf 600°C geheizte und bis auf 60 bar verdichtetes Gasgemisch eingespritzt.

Um die Messwerte zu validieren und eine Korrelation zu den tatsächlichen sichtbaren Zündorten herzustellen, sollen begleitende Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen für das beleuchtete Kraftstoffspray sowie von Flammeneigenleuchten erfolgen.

Prüfstands Aufbau

Im Bild 2 sind wesentliche Teile des Prüfstandsbaus zu erkennen. Die Hauptbestandteile bilden eine optisch zugängliche, beheizbare Hochdruckkammer, ein Drei-Achsen-Positioniertisch auf dem sowohl die PDA-Messeinrichtungen als auch eine intensiviertere Hochgeschwindigkeitskamera positioniert sind. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das Common-Rail-Einspritzsystem.

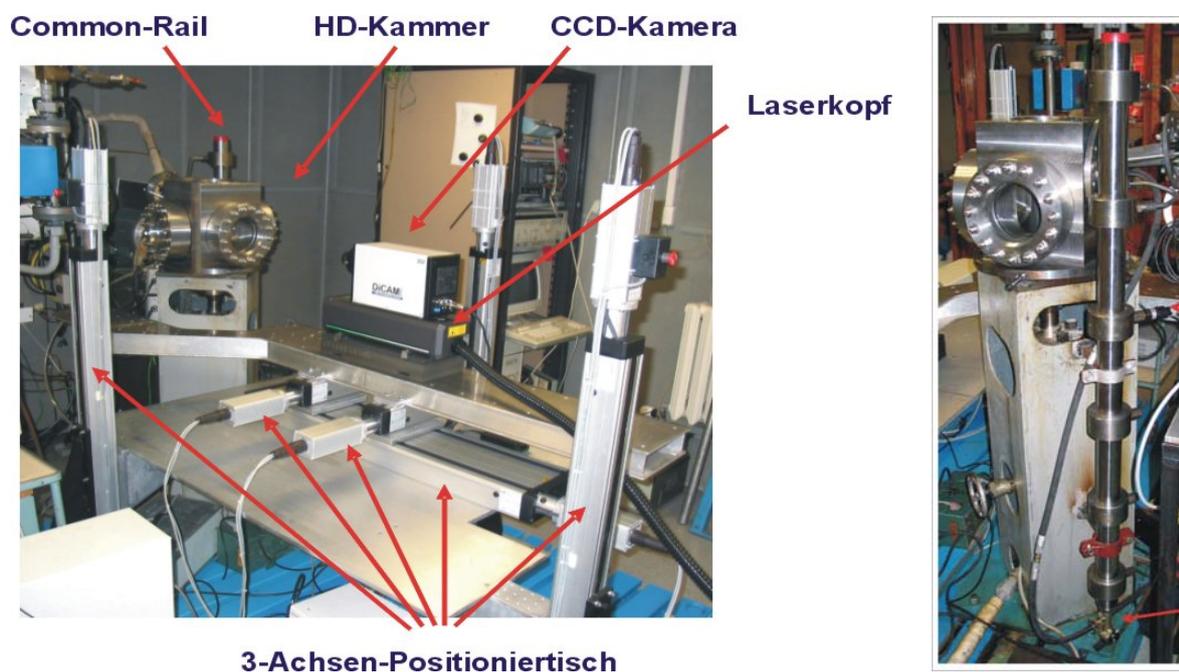


Bild 2 a) Prüfstands Aufbau optische Zugänge

b) Kammer und Rail

Alle Komponenten sind mit einem Steuerrechner verbunden. Mit Hilfe speziell entwickelter Software können die Messungen in allen Messregimes mit hohem Automatisierungsgrad durchgeführt werden. Dies ist gerade für PDA-Untersuchungen vorteilhaft. Bei Messungen in Richtung Strahlzentrum nimmt die Detektierbarkeit der Tröpfchen durch Extinktion und hohe

22.4

Tröpfchendichte stark ab. Um die statistische Sicherheit der gemessenen Werte sicherzustellen, ist somit eine Vielzahl von Messungen pro Messpunkt nötig. Ebenfalls wird eine halbautomatische Auswertesoftware verwendet, die die gemessenen Rohdaten entsprechend der Messvorgaben auswertet und für die weitere Analyse bereitstellt.

Bisherige Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere tausend Einzelmessungen durchgeführt, aus denen eine Vielzahl von Erkenntnissen gewonnen werden konnten.

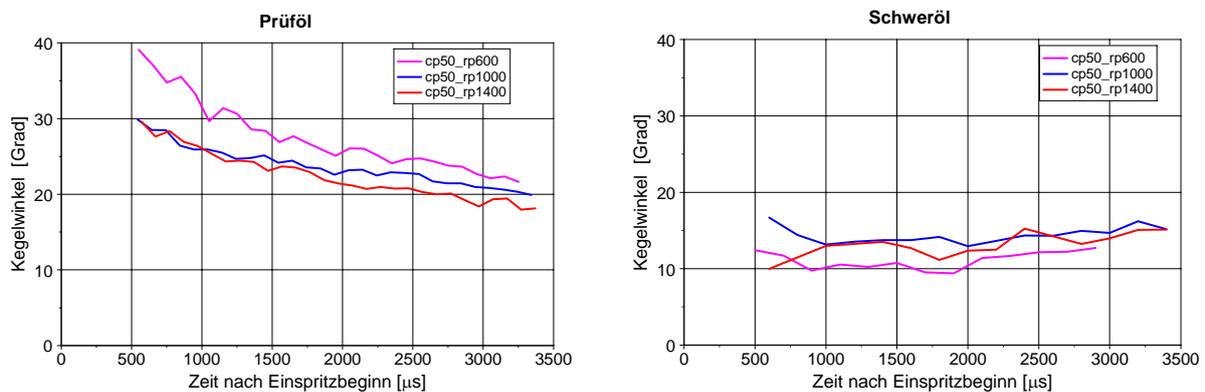
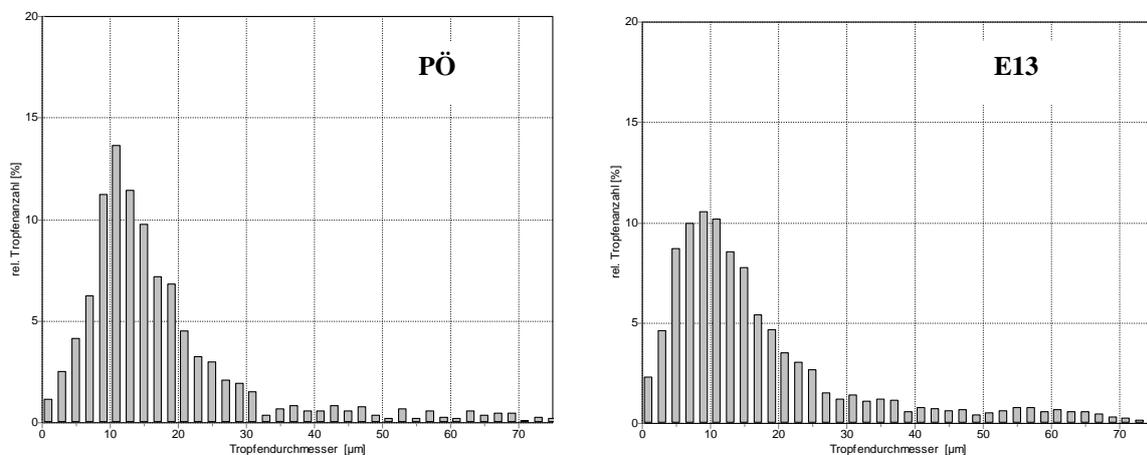


Bild 3 Strahlkegelwinkel von Prüföl/Diesel und Schweröl bei unterschiedlichen Kammer- und Raildrücken.

So wurde mit Hilfe der makroskopischen Strahluntersuchungen festgestellt, dass der Strahlkegelwinkel von Schweröl signifikant kleiner ist als der Strahlkegelwinkel von Prüföl / Diesel. (Prüföl besitzt die gleichen Zerstäubungseigenschaften wie Diesel, wird jedoch aus Sicherheitsgründen anstelle von Diesel verwendet). Ebenfalls untersucht wurden Emulsionen aus Kraftstoff und Wasser. Bei diesen Emulsionen wurden dem Kraftstoff 13 bzw. 20 Volumenprozent Wasser beigemischt (KWE 13, KWE 20 – 13% bzw. 20% Wasser im Kraftstoff emulgiert).

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen unter anderem, dass bei der Zerstäubung von Schweröl zwar eine Vielzahl kleiner Tröpfchen entstehen, aber auch wenige, sehr große Tröpfchen im Spray erhalten bleiben.



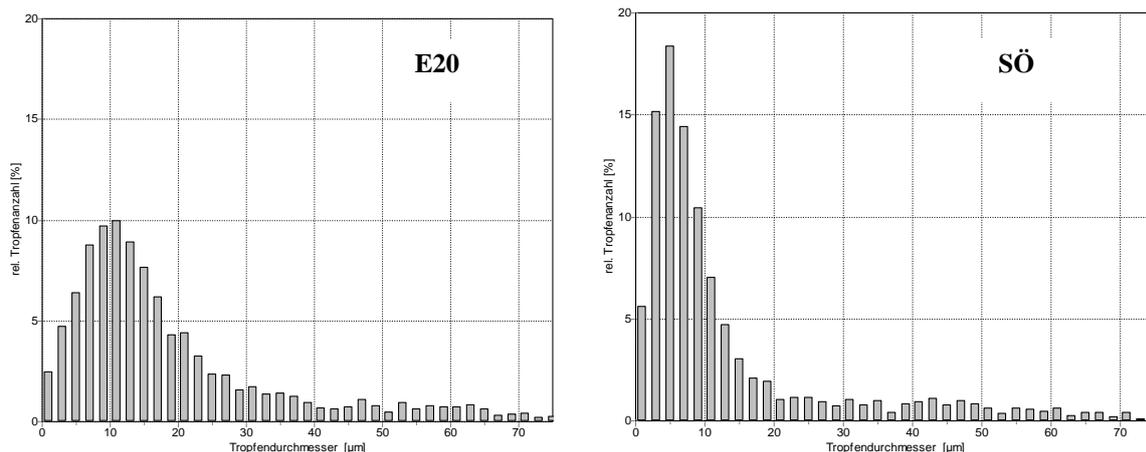


Bild 4 Tropfengrößenverteilungen der vier untersuchten Kraftstoffe (14 bar Kammerdruck, 1000 bar Raildruck, 50mm Düsenabstand)

In Bild 4 ist die Tröpfchengrößenverteilung für unterschiedliche Kraftstoffe dargestellt. Obwohl das Schwerölspray viele kleine Tröpfchen besitzt, bewirken die wenigen großen Tropfen, dass die aktive Oberfläche des Schweröls, die für die Verdampfung und die nachfolgende Gemischaufbereitung entscheidend ist, kleiner ist als bei den anderen untersuchten Kraftstoffen. Diese Eigenschaft wird durch den Sauterdurchmesser, dargestellt in Bild 5, widergespiegelt.

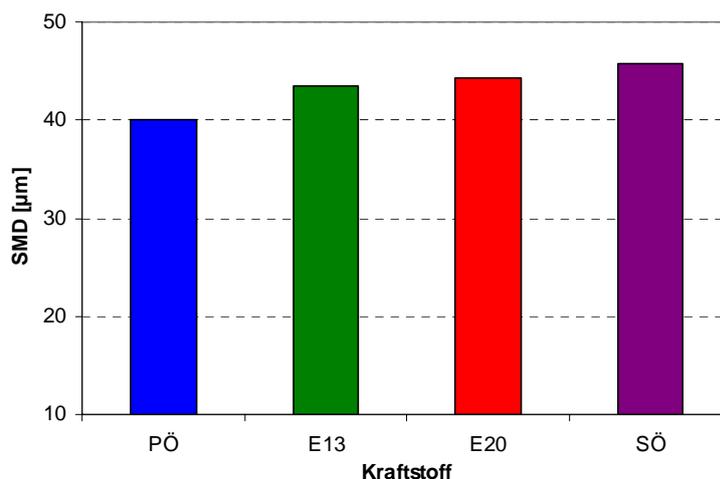


Bild 5 Sauterdurchmesser *SMD* der vier untersuchten Kraftstoffe (14 bar Kammerdruck, 1000 bar Raildruck, 50mm Düsenabstand)

Die so an der Hochdruckkammer ermittelten Ergebnisse wurden durch Messungen am Einzylinder-Versuchsmotor des Projektpartners WTZ-Roßlau und am 6-Zylinder-Vollmotor des Projektpartners MAK-Caterpillar in Kiel bestätigt. Einzelheiten zu den Messergebnissen im Zusammenhang mit Motorversuchen sind in [BUCHHOLZ 07] veröffentlicht.

Für weitere Ergebnisse der optischen Untersuchungen an der Einspritzkammer soll an dieser Stelle auf den Abschlußbericht des Verbundprojektes EMI-MINI verwiesen werden [NIENDORF 05].

Geplante Erweiterungen des Prüfstandes

Zur Charakterisierung des Zündverhaltens von Schwerölen ist die Untersuchung der Verdampfung des Kraftstoffs im Spray von entscheidender Bedeutung. Die Unterscheidung von Flüssig- und Dampfphase und die Erkennung von Dampfanteilen um das Einspritzspray bil-

22.6

den wichtige Voraussetzungen zur Beurteilung der Gemischaufbereitung der untersuchten Kraftstoffe. Mit einer in Bild 6 dargestellten Anordnung soll mit Hilfe einer gekoppelten Schlieren-Streulichtmessung die Unterscheidung von Flüssig- und Dampfphase zeitgleich möglich sein.

Ein entsprechendes Verfahren wird in [WIRTH 96] vorgestellt. In der hier vorgestellten Anordnung wird das Verfahren auf die vorliegenden Messbedingungen angepasst. Dazu wird das Spray mit parallelem, aufgeweitetem Laserlicht durchstrahlt und gleichzeitig mit Blitzlicht von der entgegengesetzten Seite beleuchtet.

Der Schliereneffekt tritt auf, wenn im parallelen Lichtstrom im Inneren der Kammer durch Beugung und Brechung das Licht aus seiner parallelen Bahn abgelenkt wird, und am Ende des Strahlenganges durch die Schlierenblende abgefangen wird. Das durch Dichteunterschiede (Übergang Luft-Kraftstoffdampf) und Tröpfchen abgelenkte Licht kommt also nicht mehr in der Kamera an und erscheint somit als dunkle Stelle im Bild. Damit enthält das reine Schlierenbild nur das parallele Laserlicht abzüglich des durch Beugung und Brechung durch Flüssigspray und Kraftstoffdampf gebeugten nicht parallelen Licht. Um nun die Flüssigphase darzustellen, wird das Spray zeitgleich aus Richtung der Schlierenblende multispektral beleuchtet. Das Streulicht, das nur von der Flüssigphase reflektiert wird, kann teilweise die Schlierenblende passieren und bildet das Flüssigspray in der Kamera ab.

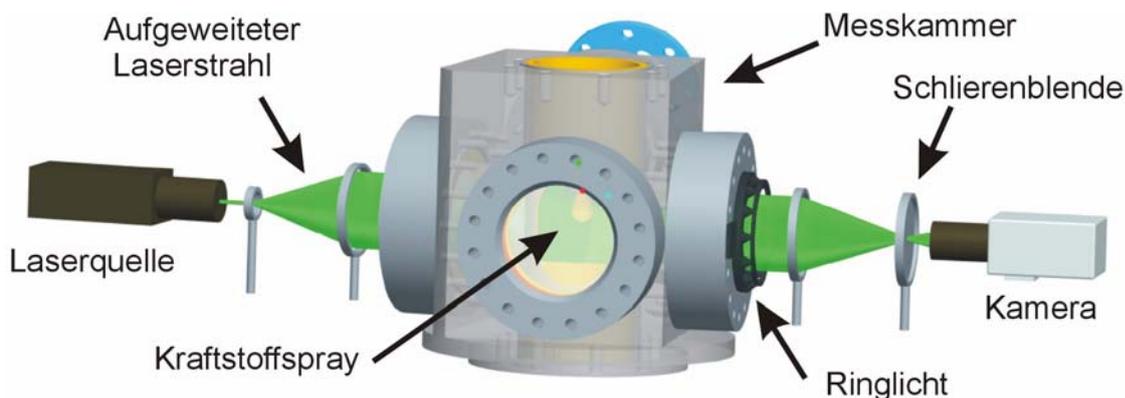


Bild 6 Messanordnung zur kombinierten Schlieren-Streulichtaufnahme an einer Hochdruckmesskammer

Die Laserdurchleuchtung soll mit einem 2 Watt Laser mit kontinuierlichem Licht mit 532nm Wellenlänge erfolgen. Die multispektrale Beleuchtung der Flüssigphase soll durch einen Xenon-Blitz in Ringlichtanordnung realisiert werden. Die Intensität und die Dauer des Blitzes kann zur Einstellung optimaler Beleuchtungsverhältnisse durch am Lehrstuhl entwickeltes Steuergerät flexibel angepasst werden. Das Einspritzspray kann somit wahlweise für einen festgelegten Zeitpunkt mit kurzzeitbelichteten Aufnahmen oder über die gesamte Dauer mit Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen erfasst werden.

Das beschriebene Verfahren soll dazu dienen, zeitabhängig die Lage der Dampfzonen und somit der reaktivsten Bereiche des Kraftstoffsprays zu ermitteln. Die so determinierten Bereiche werden dann mit Hilfe der Laserinduzierten Fluoreszenz untersucht, um freie Radikale und somit beginnende chemische Reaktionen zu detektieren.

Die Vorhersagbarkeit von Zündorten bietet eine wichtige Grundlage zur Steuerung des Brennverlaufs und liefert damit ein entscheidendes Instrument zur Senkung der Schadstoffbildung an Großdieselmotoren.

Ausblick

Im laufenden Projekt erfolgt momentan die Untersuchung der makroskopischen Sprayparameter und der Tröpfchengrößenverteilung und Tröpfchengeschwindigkeiten mittels PDA an nochmals vergrößerten Kraftstoffsprays für Motoren bis 430 mm Kolbendurchmesser. Nach Abschluss dieser Messungen und Erweiterung des Prüfstandes werden die Untersuchungen zur kombinierten Schlieren-Streulicht-Messung zur örtlichen Bestimmung der Dampfphase und zur LIF-Messung zur Detektion von Zündorten eingesetzt, um Grundlagen für die Bildung von CFD-Modellen für die Großmotorische Schwerölverbrennung zu liefern.

Dankesworte

Die Arbeiten und Ergebnisse, die hier vorgestellt werden, sind im Rahmen eines geförderten Verbundprojektes entstanden. In diesem Projekt arbeiten Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft eng miteinander zusammen, um die Ergebnisse der Forschung zu verifizieren und direkt in die Praxis umzusetzen. Ziel ist es dabei, industrie-relevante Grundlagenforschung zu betreiben, deren Ergebnisse mittelbar und unmittelbar in die Produkte deutscher Großdieselmotorenhersteller einfließen. Den Unternehmen soll somit einen Wettbewerbsvorteil auf dem internationalen Markt ermöglicht werden. An dieser Stelle möchten wir uns beim BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) bedanken, ohne deren Unterstützung durch die Förderung die Erarbeitung vorliegender Ergebnisse nicht möglich gewesen wären. Ebenfalls möchten wir uns beim PTJ (Projekträger Jülich GmbH) bedanken. Als Projekträger sowohl für EMI-MINI-I wie auch für EMI-MINI-II hat das PTJ von der Beantragung über die Durchführung bis zum Abschluss von EMI-MINI-I maßgeblich dazu beigetragen, dass die Projekte in der vorliegenden, sehr effizienten und schlagkräftigen Form wirksam werden konnten.

Literatur

- BUCHHOLZ 07 Bert Buchholz, Roland Pittermann Mathias Niendorf Measures to Reduce Smoke and Particulate Emissions from Marine Diesel Engines Using Compact Common Rail Injectors; CIMAC-Paper 129; Wien 2007
- HOPP 05 Hopp, M. Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsölmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor; Dissertation, Universität Rostock, 2005
- NIENDORF 04 Niendorf, M.; Hassel, E.; Hopp, M.; Buchholz, E. „Auslegung eines Prüfstandes zur PDA-Analyse dichter Kraftstoffsprays unter motorrelevanten Bedingungen“, 12. GALA-Konferenz - Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, September 2004, Karlsruhe
- NIENDORF 05 Buchholz, B.; Hassel, E.; Hopp, Niendorf, M.; Rarrasch, C.; Untersuchung der Zerstäubung und Strahlausbreitung an Common-Rail-Einspritzsystemen zur Minimierung der Schadstoffbildung von Großdieselmotoren; Teilbericht zum Verbundvorhaben Experimentelle und numerische Untersuchung zur Strahlerstäubung, Verbrennung und Schadstoffbildung in Schiffsdieselmotoren; BMWi, Förderkennzeichen 03 SX 138
- WIRTH 96 Entwicklung von kombinativen optischen Messtechniken zur Untersuchung der Strahlausbreitung, Gemischbildung und Zündung unter dieselmotorischen Temperaturen und Drücken; Dissertation, Universität Stuttgart, 1996