

Auslegung eines Prüfstandes zur PDA-Analyse dichter Kraftstoffsprays unter motorrelevanten Bedingungen

M.Niendorf, B.Buchholz, M.Hopp, E.Hassel,

Universität Rostock, Fachbereich Maschinenbau, Lehrstuhl für Kolbenmotoren und Verbrennungsmaschinen

1. Abstract

Die Kraftstoffeinspritzung besitzt das Potenzial zur Reduzierung der Emissionswerte moderner Großdieselmotoren. Besonders im instationären Betrieb und bei niedriger Last kann durch optimierte Einspritzung deutlich geringere Ruß- und Kohlenwasserstoffemissionen erreicht werden. Zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellung, wurde das Verbundprojekt EMI-MINI mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft initiiert. Ziel ist es, durch optimierte Einspritzparameter den Verbrennungsprozess so zu steuern, dass ein emissionsarmer und wirtschaftlicher Betrieb künftiger Großdieselmotoren ohne aufwendige Abgasnachbehandlung möglich wird.

Die Aufgabe der Universität Rostock in diesem Verbundprojekt ist die Bestimmung und Analyse wichtiger Kenngrößen bei der Kraftstoffzerstäubung. Mit Hochdruck-Common-Rail-Injektoren wird unter motorrelevanten Bedingungen in einer optisch zugänglichen Kammer Kraftstoffspray erzeugt. Mit einem PDA-Messsystem werden hiervon Tröpfchengrößenverteilung und Tröpfchengeschwindigkeit ermittelt.

Mit Hilfe begleitender Hochgeschwindigkeits-Streulichtaufnahmen wird sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch die Ausbreitung des Sprays im Brennraum für unterschiedliche Lastparameter der Motoren und für verschiedene Kraftstoffe untersucht. Es werden der Spraykegelwinkel, die Strahl-Frontgeschwindigkeit und das Sprayvolumen von schiffstypischen Kraftstoffen sowie von Kraftstoff-Wasser-Emulsionen (KWE) ermittelt.

Um die notwendigen Messungen durchführen zu können, musste eine Hochdruckkammer für einen Prüfstand entwickelt und ausgelegt werden, die sowohl für PDA als auch für Streulichtaufnahmen an Injektoren dieser Größe geeignet ist und in der die Bedingungen moderner hochaufgeladener Schiffsdieselmotoren nachgebildet werden können.

Die Messergebnisse bilden die Grundlage zur Schaffung von CFD-Simulationsmodellen für die Entwicklung von Schiffs- und Großdieselmotoren. Zusammen mit den Ergebnissen der Projektpartner schafft dieses BMBF-geförderte Projekt wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung umweltfreundlicher Schiffmotoren.

2. Einleitung

Der Betrieb von Dieselmotoren auf Schiffen ist durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet. Schiffsmotoren arbeiten, abgesehen von wenigen Manövern, fast ausschließlich in hohen Lastbereichen. Ihr Betrieb erfolgt größtenteils auf hoher See. Dort existieren bisher lediglich für die Stickoxyd (NO_x) - Emission international gültige Grenzwerte, die durch die IMO (International Maritime Organisation) 1998 festgelegt worden sind(1). Diese seit dem Jahr 2000 de facto gültigen Grenzwerte gelten aufgrund der vorgeschriebenen Testzyklen ebenfalls nur für hohe Lastbereiche. Davon ausgehend erfolgten die Entwicklungsanstrengungen der Hersteller bisher maßgeblich mit dem Ziel der Steigerung des Wirkungsgrades im Nennlastbereich bei Einhaltung der NO_x -Grenzwerte. Die überwiegende Mehrheit der Motoren wird zudem aus Kostengründen mit Schweröl betrieben. Der Betrieb bei geringer Last sowie bei Lastwechsel stellt nur einen vergleichsweise geringen Teil der Betriebszeit dar. Daher ist dieser Bereich bei der Optimierung der Antriebe bisher eher wenig beachtet worden.



Bild 1 Stark rußendes Schiff bei Teillastbetrieb (5)

Gerade hier erfolgt aber aufgrund ungünstiger Betriebsbedingungen ein erheblicher Ausstoß schädlicher Emissionen (Bild 1). Insbesondere Ruß und Kohlenwasserstoffe werden durch ungünstiger Gemischbildung und Temperaturverhältnisse verstärkt emittiert.

In vielen Hafenstädten und schiff Gegend bilden Schiffsantriebe daher die Hauptquelle der Luftverschmutzung. In der Hansestadt Lübeck werden beispielsweise 80% der NO_x – Emissionen durch den Schiffsverkehr verursacht (2)

In Schweden wurden aufgrund dieser Tatsache in der Form erlassen, dass die Liegegebühren für Schiffe emissionsabhängig gestaltet werden. Anhand dieser Maßnahmen und der zu erwartenden allgemeinen Verschärfung der Umweltgesetzgebung, ist das Interesse seitens der Reeder nach emissionsarmen Schiffsantrieben deutlich gestiegen.

3. EMI-MINI - Verbundprojekt zur Reduzierung der Emissionen von Schiffsantrieben

Die strenge Abgasgesetzgebung im Bereich straßengebundener Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge in Europa und den USA hat zur Entwicklung neuer teils revolutionärer Techniken zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes in allen Lastbereichen moderner Kleindieselmotoren geführt. Abgasrückführung, elektronisch gesteuerte Kraftstoffeinspritzung mit Common-Rail, Partikelfilter und Katalysatoren sind moderner Standard.

Aufgrund der besonderen Betriebsbedingungen von Schiffsdieselmotoren ist eine Übertragung der in diesem Anwendungsbereich etablierten Techniken nicht ohne weiteres möglich. Stark abweichende geometrische Verhältnisse und damit im Zusammenhang stehende Strömungsverhältnisse, höhere Verdichtung, abweichende Einspritzmengen und die Verwendung von Schweröl stellen ernstzunehmende Hindernisse dar.

Ein besonderes Potenzial für Großdieselmotoren bietet die Verwendung von Common-Rail-Einspritzsystemen. Dabei wird Kraftstoff aus einem Hochdruckspeicher über elektrisch

gesteuerte Injektoren im Brennraum zerstäubt. Eine derartige Anordnung zeigt Bild 2. Einspritzzeiten, Einspritzdruck und Anzahl der Einspritzungen sind damit frei wählbar. Die Vorgänge des Strahlerfalls und der Strahlausbreitung mit Common-Rail Systemen insbesondere bei Verwendung von Schweröl und Kraftstoff-Wasser Emulsionen sind bisher weitgehend unbekannt. Gerade die Kenntnis dieser Größen bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Einflussnahme auf die innermotorische Gemischbildung und damit auf die

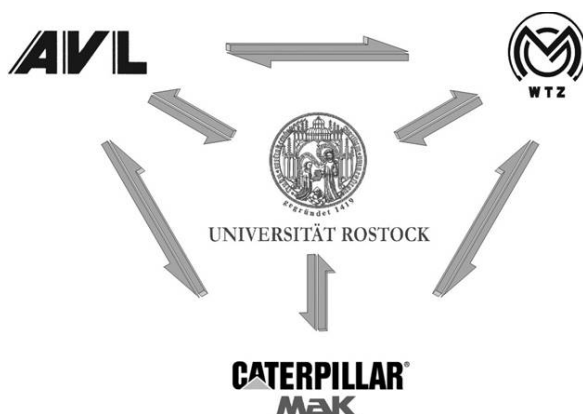


Bild 3 Verbundprojekt EMI-MINI

Senkung der Schadstoffemissionen. Zur Untersuchung dieser Phänomene wird vom BMBF das Verbundprojekt EMI-MINI (Bild 3) mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft mit dem Ziel gefördert, das Emissionsverhalten moderner Großdieselmotoren zu verbessern.

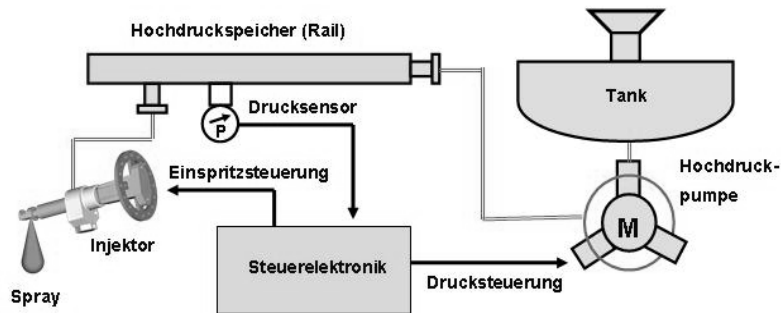


Bild 2 Common-Rail-Kraftstoffeinspritzsystem (stark vereinfacht)

Die Partner des Projektes haben dabei unterschiedliche Teilaufgaben übernommen. Arbeitsgegenstand der Universität Rostock ist die Untersuchung des Strahlzerfalls an Common-Rail-Injektoren unter motorrelevanten Bedingungen. Die erzielten Ergebnisse sollen sowohl direkt in Form von Parametern, Kennfeldern und Einstellvorschriften, als auch indirekt in Form von Rechenmodellen der Simulationssoftware AVL-FIRE in die Entwicklung neuer Dieselmotoren der Firma MAK-Caterpillar einfließen. Das WTZ führt zur Verifizierung der Ergebnisse die Motorversuche an einem Einzylinder-Versuchsmotor durch.

4. Dichte Kraftstoffsprays und innermotorische Verbrennung

Beim dieselmotorischen Prozess erfolgt die Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum zum Ende des Verdichtungsaktes. Typischerweise wird der Kraftstoff mit hohem Druck durch eine Einspritzdüse mit mehreren Düsenöffnungen (Bild 5) direkt in den Brennraum eingespritzt. Das sich ausbildende Spray ist daher von einer Vielzahl beeinflussender Größen abhängig. Feste Parameter sind die mit Hub, Bohrung, Mulden- und Kopfform den Brennraum bestimmende Geometrien. Großen Einfluss auf die Kraftstoffzerstäubung besitzt ebenfalls die Einspritzdüse. Einspritzwinkel, Lochzahl und -form mit den daraus entstehenden Strömungsverhältnissen sowie Öffnungs- und Schließcharakteristik sind entscheidende Einflussfaktoren für den primären Strahlzerfall. Kraftstoffparameter wie Viskosität, Oberflächenspannung, eingestellte Temperatur, Dichte und der Einspritzverlauf besitzen zusammen mit den Eigenschaften der Luft im Brennraum den größten Einfluss auf die Strahlausbreitung.

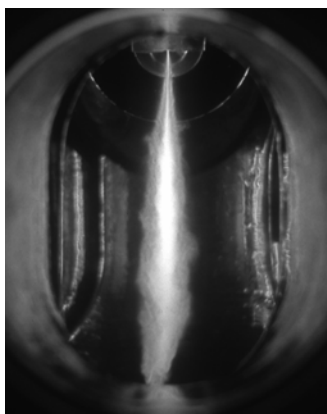
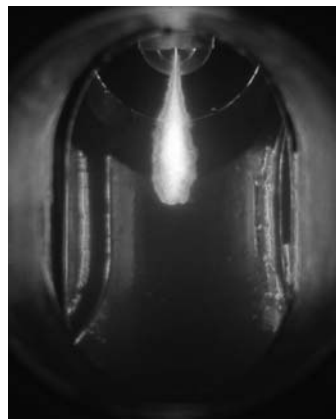
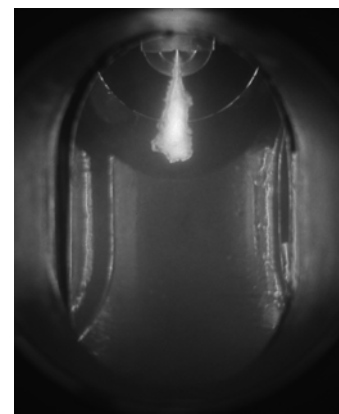


Bild 4 a)



b)



c)

Strahlentwicklung bei unterschiedlichen Dichten des Umgebungsmediums; Zeit: 2,4ms nach Ansteuerbeginn; Raildruck 1000 bar : a) 2 bar Kammerdruck b) 20 bar c) 50 bar Kammerdruck

Der Druck, die Temperatur und die Dichte zusammen mit der kinetischen Energie des Kraftstoffs sind hier die den Strahlzerfall am meiste bestimmenden Größen. Allein die Dichteunterschiede bei gleicher Temperatur haben, wie in Bild 4 zu erkennen ist, entscheidenden Einfluss auf die Strahlfrontgeschwindigkeit und den Strahlaufbruch.

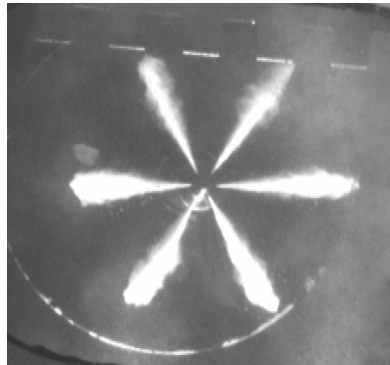


Bild 5 Kraftstoffeinspritzung mit einer Multilochdüse

5. Kenngrößen zur Beschreibung dichter Kraftstoffsprays

Wird vorausgesetzt, dass das Ziel der Untersuchungen die Generierung von Modellen für die CFD-Simulation und die Bereitstellung von Einstellgrößen und Verfahrensanweisungen zur Sprayabstimmung am Motor ist, sind grundlegende Basisgrößen zur Beschreibung des Kraftstoffsprays erforderlich. Dabei hat sich in der Praxis erwiesen, dass eine gute Beschreibung der Sprays für alle motorrelevanten Bedingungen durch die Kombination bestimmter mikroskopischer und makroskopischer Kenngrößen möglich ist.

Zur Beschreibung des makroskopischen Verhaltens werden vorwiegend die Größen Strahlkegelwinkel, Strahlfrontgeschwindigkeit, Strahllänge sowie das sich ergebende Strahlvolumen verwendet. Sie werden u.a. aus Streulichtaufnahmen gewonnen (Bild 6).

Um das Spray unter möglichst vielen Einflussparametern vergleichen zu können, wird es

geometrisch vereinfacht als Kegel mit einer Kugelkappe beschrieben.

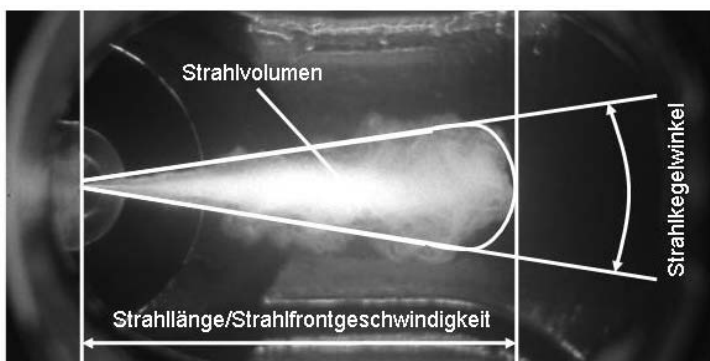


Bild 6. makroskopische Parameter zur Beschreibung von Kraftstoffspray

Im mikroskopischen Bereich sind vorwiegend Tröpfchengrößen und Tröpfchengeschwindigkeiten sowie der abgeleitet Sauterdurchmesser von Bedeutung. Ihre Erfassung kann durch PDA-Analyse oder mikroskopischer Streulichtaufnahmen erfolgen.

6. Randbedingungen zur Erfassung von Messdaten

Aus den Motorbetriebsbedingungen ergeben sich Vorgaben für die Gestaltung eines Prüfstandes. Im Motor herrschen bei Vollast Verdichtungsendrücke bis 160 bar und Verbrennungsendrücke bis 175 bar bei mittleren Gastemperaturen bei der Verbrennung von 1500K. Da diese Werte in einer Versuchskammer nicht realisierbar sind, werden Sprayuntersuchungen üblicherweise bei Dichtegleichheit durchgeführt. Als volumenspezifisch adäquater Vergleichswert ergibt sich aus der idealen Gasgleichung bei Raumtemperatur ein maximaler Kammerdruck von 60 bar.

Um auch die Phänomene der zweiten Phase des Strahlzerfalls wie die Verdunstung und beginnende chemische Reaktionen untersuchen zu können, sind Gastemperaturen von wenigstens 850K in einer Hochdruckkammer erforderlich.

7. Auswahl der Messverfahren

Untersucht werden Kraftstoffsprays in Luftumgebung. Damit ergeben sich ideale Voraussetzungen für optische Messverfahren. Die zu untersuchenden Kraftstoffe sind Dieseldieselkraftstoff, Schweröle und Kraftstoff-Wasser-Emulsionen (KWE). Diesel bietet aufgrund seiner eng tolerierten Qualitätsmerkmale definierte optischen Eigenschaften und somit ideale Bedingungen für die Untersuchung durch Streulichtaufnahmen und Laserverfahren.

Schweröle und Kraftstoff-Wasser-Emulsionen und –Dispersionen aus Diesel und Schwerölen sind ebenfalls Untersuchungsgegenstand des Projektes. Die optischen Eigenschaften dieser Stoffe sind jedoch starken Schwankungen unterworfen.

Die Absorptionskoeffizienten von Schwerölen sind von der jeweiligen chemischen Zusammensetzung abhängig und schwanken sehr stark (4). Da im schlechtesten Fall aufgrund hoher Absorption keine Lichtdurchdringung der Tröpfchen möglich ist, müssen optische Messverfahren gewählt werden, die ggf. mit reiner Reflektion auskommen.

Ähnliches gilt für KWE, hier wird der Effekt noch durch die Einlagerung von Wassertröpfchen unterschiedlicher Größe und Verteilung in den Kraftstoff verstärkt. Werden diese Substanzen zerstäubt, kann keine reproduzierbare Brechung an den KWE-Tröpfchen erwartet werden. Optisch auswertbare Messeffekte sind hier ebenfalls nur auf der Grundlage von Reflektionseffekten zu erwarten.

So wurden zur Erfassung der unter Abschnitt 5 beschriebenen Beschreibungsgrößen mikroskopische (mit einem Fernfeldmikroskop) und makroskopische Streulichtaufnahmen und die PDA-Analyse gewählt. Zur Messung der Verdampfungsrate und der Detektion beginnender Verbrennungsreaktionen sind LIF-Messungen vorgesehen.

8. Optische Anforderungen an die Messkammer

Die Hauptanforderungen werden durch die beiden Messverfahren und die im Kapitel 6 beschriebenen Randbedingungen definiert. Die Streulichtuntersuchungen werden mit einer intensivierten CCD-Kamera durchgeführt. Zur Aufnahme des Gesamtsprays erfolgt die Ausleuchtung mit Xenon-Blitzlampen. Da die Beleuchtung von vorn zu Reflektionen am Fenster und zur Verengung des optischen Zugangs führt, wurde die Beleuchtung von der Seite gewählt. Sie erfolgt synchron im Winkel von 90° beidseitig senkrecht zur Sprayachse (Bild 7). Für eine Übertragbarkeit der Messwerte auf das Verhalten an realen Großmotoren muss die beobachtbare Strahllänge den Werten an repräsentativen Großmotor entsprechen. Als Wert wurde ein Durchmesser von 130mm festgelegt. Der Injektor ist so angeordnet, dass nur ein Strahl der Mehrlochdüse freigegeben wird. Dieser beginnt am Rand des Fensters und reicht über den gesamten Fensterdurchmesser.

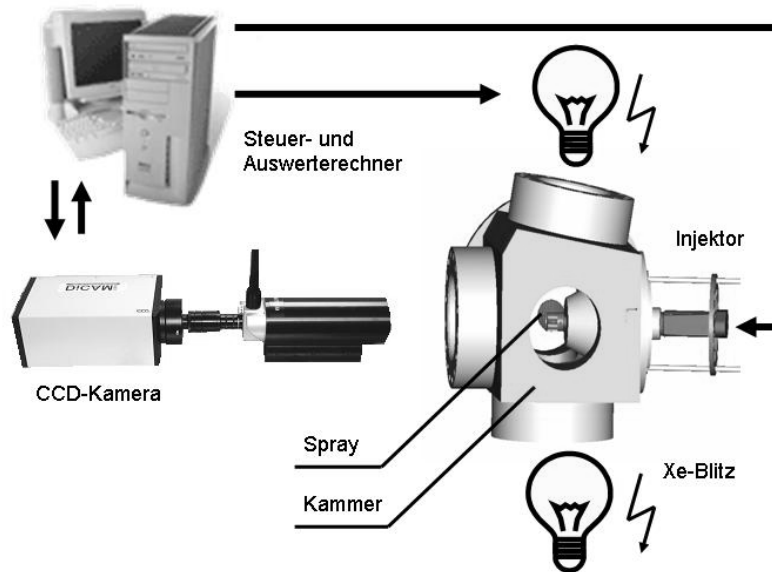


Bild 7 Messanordnung zur Durchführung von Streulichtaufnahmen

Bild 8 zeigt einen Blick durch das Kamera- und Laser-Fenster auf das zentral angeordnete Kraftstoffspray. Die Strahlachse des Sprays läuft durch das Zentrum aller Fenster, somit ist eine optimale Zugänglichkeit gewährleistet.

Die optischen Zugänge sind für Lasermessungen so zu gestalten, dass die Reflektion und Brechung möglichst geringe Auswirkungen auf den Messprozess haben. Für die Lasermessungen wird das Streulicht durch Linsen fokussiert und durch eine Blende von $30\mu\text{m}$ auf die Empfängerdetektoren gerichtet. Daher ist eine relativ genaue Ausrichtung der Messapparatur notwendig. Der Strahlversatz durch Brechungen an den Fenstern sollte daher so gering wie möglich gehalten werden. Eine Anordnung aller Fenster in senkrechtem Winkel zur Sprayachse ist somit ein wichtiges Ziel der geometrischen Kammerauslegung.



Bild 8 Laser-/Kamerafenster mit Sicht auf das Spray

9. Berechnungen zur optischen Auslegung der Kammer für PDA-Untersuchungen

Der Kammerberechnung liegen die in Tabelle 1 zusammengestellten Daten zugrunde.

wavelength	532nm
expected droplet size	5-50 μm
elevation	15°
halfe-angle of beams	1,91°
refractive index	1,458
laser power	max. 2W

Tabelle 1 Ausgangsdaten zur geometrischen Kammerauslegung

Als Grundlage für die Anordnung der Optiken wurden Streulichtrechnungen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Teilchendurchmesser und Positionierungswinkel der zwei

Detektoren berechnet, um eine optimale Anordnung der Komponenten und die Kammerauslegung zu erreichen. Wie aus den weiter oben beschriebenen Randbedingungen hervorgeht, musste ein Bereich gewählt werden, in dem sowohl Reflektion wie auch Brechung zu auswertbaren Ergebnissen führt. Die Auswertung der Tröpfchengröße erfolgt über die Phasenverschiebung, für die Erfassbarkeit ist jedoch die Lichtintensität ebenfalls von Bedeutung. In Bild 9 ist an einem repräsentativen Beispiel die Verteilung der Lichtintensität für 20µm Teilchen für die Variation des Off-Axis Winkel von 0 bis 180 Grad dargestellt. Zur Verdeutlichung wurden zur Mie-Streulichtberechnung Kurven für die reine Reflektion und die reine Brechung 1. Ordnung mit eingezeichnet. Hier ist zu erkennen, dass die Lichtintensität in weiten Bereichen etwa 2 Größenordnungen auseinander liegt. Eine intensitätsmäßige Annäherung erfolgt im Bereich von 115 Grad. Die in Bild 10 berechneten Phasengänge bei unterschiedlichen Tröpfchengrößen zeigen aber, dass bei off-axis Winkeln, die größer als 80 Grad sind, starke Phasenschwankungen auftreten. Eine eindeutige Zuordnung der Tröpfchengröße zur Phasenlage ist damit besonders für kleinere Tröpfchen nicht mehr möglich.

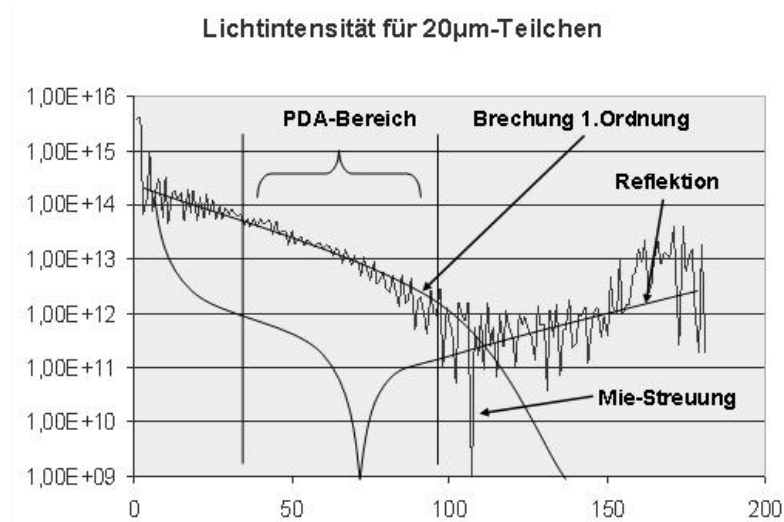


Bild 9 Berechnung der Lichtintensität für ein 20mm Teilchen für Off-Axis Winkel von 0 bis 180 Grad

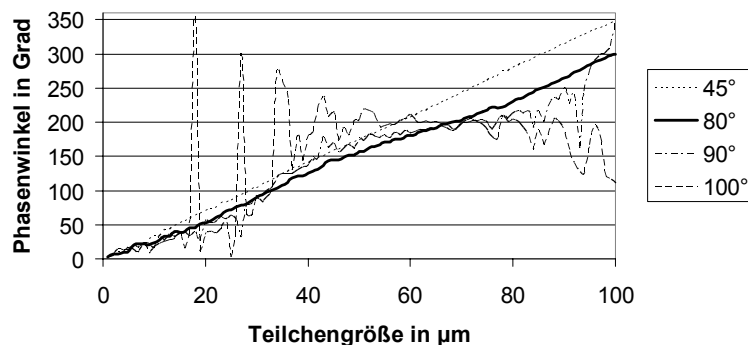


Bild 10 Variation der Phasenwinkel bei unterschiedlichen Off-Axis Winkeln

In Bild 11 ist der Bereich von 70 bis 90 Grad noch einmal feiner aufgelöst. Zu erkennen ist hier, dass ab einem off-axis Winkel von 85 Grad deutliche Abweichungen des linearen Verhältnisses von Tröpfchengröße zu Phasenlage einsetzen.

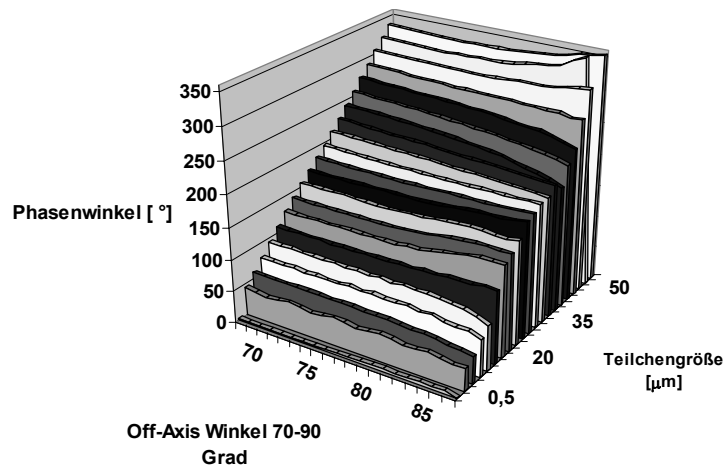


Bild 11 Phasenwinkel für Teilchen von 0,5 bis 50 μm bei off-axis Winkeln zwischen 70 und 90 Grad

Für die technische Realisierung der Kammer musste also ein Kompromiss gefunden werden, der die festigkeitstechnischen, fertigungstechnischen und optischen Anforderungen erfüllt. Aus den Mie-Streulichtrechnungen ergab sich, dass für transparente Dieseltröpfchen Winkel von 40 bis 85 Grad nutzbar sind. Der Hauptteil des Lichtes wird dabei durch Brechung geliefert. Durch die oben genannten Randbedingungen ist dies aber bei der Untersuchung von Schweröl nicht in jedem Fall sichergestellt. Da im Bereich zwischen 70 und 180 Grad nennenswerte Lichtmengen auch durch Reflektion zur Verfügung stehen, ist der Bereich auch für lichtundurchlässige Medien nutzbar. Winkel die Größer sind als 85 liefern jedoch keine verlässliche Phaseninformation mehr, die Rückschlüsse auf die Tröpfchengröße zulässt. Es bleibt ein nutzbarer Bereich von 70 bis 85 Grad. Alle Randbedingungen führen zu einem optimalen Winkel für das Kammerdesign mit einem optischen Zugang von 80 Grad für das PDA-Detektorfenster (Bild 12).

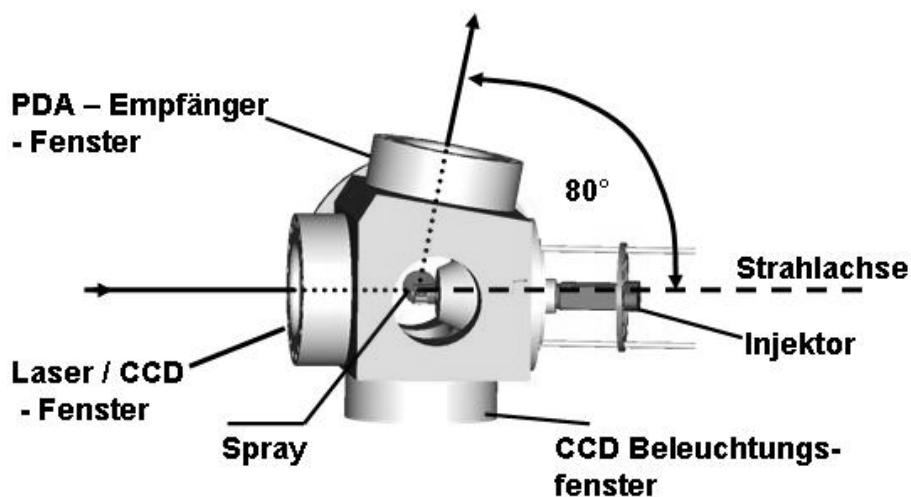


Bild 12 Hochdruckkammer mit den für Laseruntersuchungen optimierten optischen Zugängen

10. PDA-Meßaufbau

Die sich ergebende Kammerform liefert den in Bild 13 dargestellten Aufbau. Als Strahlquelle dient ein 2W Diodengepumpter Nd:Vanadium-Oxid YVO4 Laser mit 532 nm Wellenlänge.

Die Aufnahme der Messwerte erfolgt mittels Photomultiplier und einer Mehrkanal-A/D-Wandlerkarte in einem Messrechner. Aus den so ermittelten Werten lassen sich dann die Tröpfchengeschwindigkeiten und die Tröpfchengrößen errechnen.

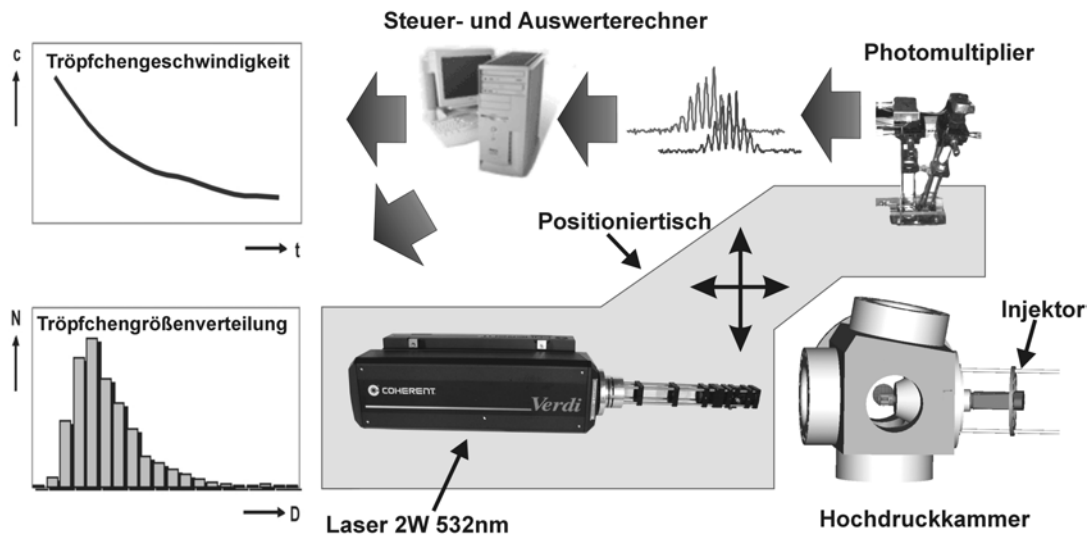


Bild 13 PDA - Messaufbau an einer Hochdruckkammer

11. Ergebnisse und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die Ergebnisse eines laufenden Projektes. Bisher wurden aufgrund des gegenwärtigen Projektstandes vorwiegend Streulichtaufnahmen durchgeführt. Dabei haben sich die Größe der Fenster und die Anordnung der Düse als optimal erwiesen. Bei der Beleuchtung durch das für PDA-Aufnahmen optimierte Fenster treten keine Einschränkungen auf. Erste PDA-Orientierungsmessungen mit Dieselmotorkraftstoff zeigen, dass der gewählte Fensterwinkel auswertbare Signale liefert. Eine Nachjustierung der optischen Anordnung für die Photomultiplier bei Veränderung des Druckes in der Kammer ist aufgrund der rechtwinkligen Anordnung der optischen Zugänge zur jeweiligen Strahlachse nur in geringem Umfang erforderlich. Messungen mit stark lichtabsorbierenden Schwerölen sollen in Kürze erfolgen. Die Ergebnisse werden nach Abschluß des BMBF-Vorhabens im Jahr 2005 veröffentlicht.

12 Quellen:

- (1) IMO 1997, International Maritime Organisation, MP/CONF. 3/35, Annex "Technical code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines", October 1997
- (2) Shore-side-electricity in Ports; Ralf Gierke, Energy und Water Utility Luebeck, EU Stakeholder Workshop of Low emission Shipping; Brussels, 4. September 2003
- (3) Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques; H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea; Springer Verlag Berlin 2003
- (4) Experimentelle Untersuchungen zur Zerstäubung von Kraftstoffen unter Dieselmotorischen Einspritzbedingungen; G. Krüger; Dissertation Rostock, 1998
- (5) Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert; Förderprogramm des BMBF; Berlin