# Einsatz laseroptischer Meßmethoden zur Untersuchung der dieselmotorischen Gemischbildung mit Common-Rail-Systemen

**B.** Ofner, F. Mayinger

Lehrstuhl A für Thermodynamik, Technische Universität München Boltzmannstraße 15; 85748 Garching, Tel./Fax: (089)28916215; (089)28916218 http://www.thermo-a.mw.tu-muenchen.de

#### **Kurzfassung**

Die zunehmend strengere Abgasgesetzgebung bei Dieselmotoren und der Wunsch nach niedrigerem Verbrauch bei gleichzeitiger Reduzierung der Geräuschemission stellen hohe Anforderungen an moderne Einspritzsysteme. Um das Potential solcher Systeme optimal nutzen zu können werden genaue Informationen zum Systemverhalten benötigt. Die vorliegende Arbeit zeigt Untersuchungen zur Spraybildung an einem Common-Rail-System. Mit Hilfe der Hochgeschwindigkeits-Schlierenmeßtechnik und der Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) konnten wichtige Strahlparameter, wie z.B. die Strahlgeschwindigkeit, der Spraykegelwinkel und die Eindringtiefe sowie die Größe und die Geschwindigkeit der Tröpfchen ermittelt werden.

### 1. Einleitung

Die in der Euro-3 und Euro-4-Norm vorgeschlagene, drastische Senkung der Abgasgrenzwerte für Dieselmotoren zwingt zu einer umfangreichen Optimierung der Gemischbildung und der Verbrennung bei PKW- und Nutzfahrzeugmotoren. Dies führte in den letzten Jahren zu einem erhöhten Einsatz direkteinspritzender Dieselmotoren, womit Verbrauchsreduzierungen bis zu 20 % erreicht wurden. Nicht zuletzt durch die Entwicklung flexibler Speichereinspritzsysteme (Common-Rail-Systeme) konnten weitere Verbesserungen auch in Hinblick auf die Geräuschemission erzielt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Reihen- und Verteilereinspritzpumpen wird der Einspritzdruck beim Common-Rail-System unabhängig von der Motordrehzahl erzeugt, wodurch die Druckerzeugung und der Einspritzvorgang entkoppelt sind. Durch den Hochdruckspeicher (Rail) liegt der auf bis zu 1350 bar komprimierte Kraftstoff an den Injektoren aller Zylinder an und unterliegt, durch die ständige Nachförderung der Hochdruckpumpe, nur geringen Druckschwankungen. Die Öffnung der Düsennadel wird über ein schnell schaltendes Magnetventil gesteuert. Dies ermöglicht eine freie Wahl von Einspritzdruck, Einspritzbeginn und Einspritzdauer. Wegen der hohen Flexibilität dieser Einspritzsysteme werden für eine Optimierung jedoch eine Vielzahl durch Messungen zu ermittelnde Informationen benötigt. Deshalb werden am Lehrstuhl A für Thermodynamik verschiedene laseroptische Meßmethoden eingesetzt, um z.B. das Öffnungs- und Schließverhalten des Injektors, die Strahlaufbruchlänge, die Austrittsgeschwindigkeit und die Eindringtiefe sowie den Kegelwinkel und die Tröpfchengröße zu untersuchen.

## 2. Meßtechnik und Meßergebnisse

### 2.1. Das Schlieren- / Schattenverfahren

Um den komplexen und hochtransienten Vorgang des Strahlzerfalls und der Tröpfchenbildung besser verstehen zu können, ist eine Visualisierung des gesamten Einspritzvorgangs mit hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung notwendig. Dafür sind moderne, digitale Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme besonders gut geeignet. In Verbindung mit klassischen, bildgebenden Verfahren, wie z.B. der Schlierenmethode, bieten sie neue Möglichkeiten zur Untersuchung physikalischer Vorgänge.

Mit Hilfe der Schlierenmethode können Dichteunterschiede in transparenten Medien sichtbar gemacht werden, weil parallele Lichtstrahlen aufgrund der Abhängigkeit des Brechungsindex von der Dichte an Stellen mit Dichtegradienten gebrochen werden und dabei eine Richtungsänderung erfahren. Da eine im Strahlengang positionierte Sammellinse (hier f = 300 mm) nur das ungebrochene, parallele Licht in ihren Brennpunkt fokussiert, können die gebrochenen Lichtstrahlen mit einer Blende, die genau im Brennpunkt der Sammellinse plaziert ist, ausgeblendet werden. Die Dichteinformation ist dann in den Intensitätsunterschieden des Lichts nach der Blende enthalten.

Je nach Anforderung kann durch Variation der Brennweite des Hohlspiegels und der Blendenöffnung die Empfindlichkeit soweit erhöht werden, daß sogar geringste Luftströmungen aufgrund ihrer Dichtegradienten sichtbar werden. Damit ist es möglich z.B. die Drallströmung im Brennraum eines Motors oder den verdampfenden Kraftstoff in heißer Atmosphäre sichtbar zu machen.

Die Schlierenmeßtechnik eignet sich deshalb auch zur Visualisierung der Spraybildung und Sprayausbreitung in Düsennähe. Die Stellen, an denen Kraftstoff vorhanden war, erscheinen in diesem Fall dunkel. In Abbildung 1 ist ein Versuchsaufbau für Hochgeschwindigkeits-Schlierenaufnahmen abgebildet. Als Lichtquelle dient ein Argon-Ionen-Laser. Zusammen mit einem Akusto-Optischen-Modulator (AOM) können



Hohlspiegel ( f = 1495 mm )

Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Hochgeschwindigkeits-Schlierenmeßtechnik

kurze Lichtpulse mit weniger als 100 ns Dauer und einer Wiederholfrequenz im MHz-Bereich erzeugt werden. Diese kurze Belichtungszeit ist notwendig um eine Bewegungsunschärfe zu verhindern, weil das Spray Geschwindigkeiten von mehr als 200m/s erreicht.

Die im Versuch eingesetzte digitale Hochgeschwindigkeitskamera hat eine Bildfrequenz von maximal 40500 Bildern/Sekunde und bietet den Vorteil einer automatisierten digitalen Bildverarbeitung. Die Kamera liefert vor jedem neuen Auslesevorgang des CCD-Chips ein TTL-Signal, das zur Synchronisation der Kamera mit dem AOM genutzt wird.

Zur Untersuchung des Einflusses von Druck bzw. Dichte der Umgebungsluft auf die Gemischbildung steht am Lehrstuhl A für Thermodynamik eine Hochdruckeinspritzkammer mit drei optischen Zugängen zur Verfügung.

Die Untersuchungen wurden an einer Fünfloch-Sitzlochdüse durchgeführt. Um bei den Aufnahmen senkrecht zur Düsenachse eine Überschneidung der Strahlen beim Durchleuchten des Sprays zu vermeiden wurde ein Ablenkblech angebracht (vgl. Abbildung 2). Mit Hilfe der Schlierenmeßtechnik konnte so die zeitliche Entwicklung des Kegelwinkels, der Strahlspitzengeschwindigkeit und der Sprayeindringtiefe in Abhängigkeit vom



Abbildung 2: Ablenkblech und Sichtbereich für die Aufnahmen senkrecht zur Injektorachse

Einspritzdruck (Raildruck) und der Dichte der Umgebungsluft ermittelt werden. Die ersten Messungen in der Hochdruckeinspritzkammer wurden bei Umgebungstemperatur durchgeführt. Weitere Versuche, unter motorrealistischen Bedingungen, sind in einer optisch zugänglichen, schnellen Kompressionsmaschine (Einzylinder-Einhub-Triebwerk) geplant, die am Lehrstuhl A für Thermodynamik zur Untersuchung der Verbrennung und Schadstoffentstehung entwickelt wurde.



Abbildung 3: Strahlzerfall und Spraybildung in Düsennähe. Die Zeitzählung beginnt mit dem Triggersignal für das Steuergerät; Bildfrequenz 27 000 Bilder/Sekunde

In Abbildung 3 ist der Auszug aus einer Aufnahme des Strahlzerfalls in Düsennähe zu sehen. Die Lage des Bildausschnitts ist aus Abbildung 2 zu entnehmen. Die Zeitzählung (rechts unten im Bild) beginnt mit dem Triggersignal an das Steuergerät.

In Abhängigkeit vom Raildruck tritt der Kraftstoff mit unterschiedlicher Verzögerung aus dem Spritzloch aus. Da die Nadel ihren maximalen Hub zum Zeitpunkt des Spritzbeginns noch nicht erreicht hat, kommt es zu einer Zunahme des Massenstroms und einer meßbaren Beschleunigung der Sprayspitze. Dies ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 deutlich zu erkennen. Eine Erhöhung des Raildrucks führt dabei zu einer kürzeren Öffnungszeit der Nadel und einem schnelleren Eindringen des Kraftstoffs in den Brennraum (vgl. Abbildung 4).

Aufgrund des optischen Zugangs der Versuchskammer konnte die Strahlausbreitung bei den Aufnahmen senkrecht zur Düsenachse nur bis zu einem Abstand von 10 mm vom Spritzloch verfolgt werden (vgl. Abbildung 3). In Richtung der Düsenachse waren jedoch Aufnahmen bis zum Wandkontakt mit der Kolbenmulde in einem Abstand von 15 mm vom Spritzloch möglich (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 4: Eindringtiefe der Sprayspitze im düsennahen Bereich kurz nach Einspritzbeginn in Abhängigkeit von Zeit und Raildruck

Diese haben gezeigt, daß das Spray die Brennraumwand noch während der Maximalgeschwindigkeit erreicht. Der Einfluß des Raildrucks auf die maximale Eindringgeschwindigkeit der Sprayspitze ist in Abbildung 5 dargestellt. Besonders bei hohen

Drücken und hohen Geschwindigkeiten kommt zu starken Ströes mungsverlusten, Kavitationserscheinungen und einem starken Aufplatzen und Zerfall des Strahls unmittelbar nach Einspritzbeginn. Deshalb trägt eine kontinuierliche Steigerung des Raildrucks immer weniger zu einer Erhöhung der Eindringgeschwindigkeit bei.



Abbildung 5: Einfluß des Raildrucks auf die maximale Eindringgeschwindigkeit der Sprayspitze

Ein Vergleich der Einspritzstrahlen bei unterschiedlichen Kammerdrücken ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Bilder wurden in axialer Richtung des Injektors aufgenommen.

Dazu wurde die Oberfläche der Injektoraufnahme verspiegelt. In der Mitte ist die Düse erkennbar (Ø 7mm). Der sichtbare Bereich des



Abbildung 6: Zunahme des Spraykegelwinkels bei steigendem Umgebungsdruck (gleicher Raildruck und gleiche Einspritzmenge)

Brennraums hat einen Durchmesser von 35.8 mm. Deutlich erkennbar ist ein stärkerer Zerfall des Strahls und ein größerer Spraykegelwinkel bei zunehmender Dichte der Umgebungsluft (Abbildung 6, rechts). Die höhere Dichte bewirkt einen schnelleren Impulsaustausch zwischen Spray und Umgebungsluft und führt so zu einer Reduzierung der Eindringgeschwindigkeit.

Allgemein ist eine zeitliche Abnahme des Kegelwinkels feststellbar, wobei ein höherer Einspritzdruck einen größeren Kegelwinkel zur Folge hat.

Einen typischen Verlauf des Kegelwinkels bei niedrigen Einspritzdrücken zeigt Abbildung 7. Hier ist eine Zunahme des Kegelwinkels zu Spritzbeginn erkennbar, die durch einen relativ langsamen Strahlzerfall begründet ist.



Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf des Kegelwinkels bei geringen Einspritzdrücken

#### 2.2. Phasen-Doppler-Anemometrie

Zur Bestimmung der Tröpfchengröße und der Tröpfchengeschwindigkeit wird am Lehrstuhl A für Thermodynamik ein Dual-PDA der Firma DANTEC eingesetzt. Um den optimalen Streuwinkel zu finden, wurden Streulichtberechnungen auf Basis

der Mie-Theorie sowie zahlreiche Versuche durchgeführt. Es hat sich gezeigt, daß Streuwinkel im Bereich 30°- 45° zu den besten Ergebnissen führen.

Das gleichzeitige Auftreten von Geschwindigkeiten über 200 m/s und Tröpfchengrößen unterhalb von 10  $\mu$ m, sowie ein optisch sehr dichtes Spray stellen jedoch hohe Anforderungen an PDA-Geräte und führen zu einer sehr geringen Datenrate. Erforderlich ist eine ausreichende Strahlintensität zur Durchdringung des Sprays und ein sehr kleines Meßvolumen, um die Wahrscheinlichkeit eines Aufenthalts von mehreren Tröpfchen im Meßvolumen zu verringern. Gleichzeitig muß aber die Erfaßbarkeit eines großen Geschwindigkeitsbereichs gewährleistet sein. Dies zwingt zu Kompromissen bei der Wahl der Brennweiten und des Strahlabstandes.

Deshalb wurde für die Sendeoptik eine Brennweite f = 310 mm in Kombination mit einer Strahlaufweitung (1.85-fach) bei einem Strahlabstand von 24 mm gewählt. Weitere Systemparameter sind nachfolgend beschrieben:

- Laserwellenlänge: 514,5 nm und 488nm
- Laserleistung im Meßvolumen: 460 mW
- Shift-Frequenz: 40 MHz
- Anzahl der Fringes: 12
- Abstand der Fringes: U: 6,7 μm; V: 6,3 μm
- Empfangsoptik: Brennweite f=310 mm
- Größe des Meßvolumens (Durchmesser x Länge): 0,078 mm x 2,027 mm
- Geschwindigkeitsmeßbereich: -66,5 m/s bis 240 m/s
- Größenmeßbereich: 0,46 μm- 240 μm
- Meßart: Vorwärtsstreuung, Streuwinkel 33,7°, Polarisation 0°

Die ersten Messungen haben gezeigt, daß sich Validierungsraten bis 30% im Abstand von 20 mm vom Spritzloch verwirklichen lassen. Jedoch ist die Zahl der validierten Tröpfchen mit 20-60 pro Einspritzung äußerst gering und erfordert deshalb eine Überlagerung von mindestens 30 Einspritzungen.

In Abbildung 8 ist der zeitliche Verlauf der Tropfengeschwindigkeit und die zugehörigen Histogramme der Tropfengröße bei einer Steigerung des Einspritzdrucks von 400 bar auf 700 bar dargestellt. Auch hier wurde die Zeitzählung mit dem Triggersignal für das Steuergerät begonnen.



Abbildung 8: Geschwindigkeit und Größe der Tropfen bei einer Steigerung des Raildrucks von 400 bar auf 700 bar

Das Meßvolumen befand sich in einem Abstand von 20 mm von der Düse im Zentrum des Sprays. Die Kraftstoffmenge betrug konstant 10 mg pro Einspritzung, weshalb die Einspritzdauer bei steigendem Druck verkürzt wurde.

Die gemessenen Geschwindigkeitsverläufe der Tröpfchen (vgl. Abbildung 8, linke Seite) zeigen einen deutlichen Einfluß der Steigerung des Raildrucks. Durch die größere Austrittsgeschwindigkeiten des Kraftstoffs erreicht die Sprayspitze das Meßvolumen schneller, d.h. je höher der Raildruck ist, umso früher werden die ersten Tröpfchen validiert. Aufgrund des trägen Verhaltens der Düsennadel beim Öffnen und Schließen, haben die ersten validierten Tröpfchen eine sehr geringe Geschwindigkeit. Es erfolgt ein steiler Anstieg auf die Maximalgeschwindigkeit sowie ein zügiger Abfall der Geschwindigkeit nach Beginn des Nadelschließens. Dieser Vorgang findet umso schneller statt, je höher der Einspritzdruck ist, da die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit der Düsennadel mit steigendem Raildruck zunimmt.

Die Validierungsrate sinkt mit steigendem Raildruck von 27% auf 19%. Dies deutet auf eine Zunahme nicht-sphärischer Teilchen und ein zunehmend dichteres Spray hin. Die Histogramme (Abbildung 8, rechte Seite) zeigen eine Abnahme der größeren Tröpfchen (> 5 $\mu$ m) bei steigendem Raildruck. Unabhängig vom Druck liegt der größte Peak stets unterhalb von 5 $\mu$ m.



Betrachtet man gleichzeitig die zeitliche Entwicklung von Tropfengeschwindigkeit und Tropfengröße, so zeigt sich, daß die größten Tröpfchen die höchste Geschwindigkeit besitzen. Diese treten kurz nach der Sprayspitze auf (vgl. Abbildung 9). Auch am Ende des Einspritzvorgangs ist eine Steigerung der Tropfengröße meßbar. Dies ist jedoch stark vom verwendeten Düsentyp abhängig und tritt besonders bei Sacklochdüsen auf.

Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit und der Tröpfchengröße im Meßvolumen; Raildruck: 500 bar; Ansteuerdauer 465 μs

## 3. Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebenen Versuche dienen zur grundlegenden Charakterisierung von Common-Rail-Systemen unter verschiedenen Betriebszuständen. Insbesondere wird der hochtransiente Vorgang der Spraybildung in Düsennähe bei Einspritzbeginn und Einspritzende untersucht. Dabei wird die Schlierenmeßtechnik, in Verbindung mit modernen Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen, zur Visualisierung der Kraftstoffeinspritzung eingesetzt. Die Größe und die Geschwindigkeit der Tröpfchen werden mit Hilfe der Phasen-Doppler-Anemometrie bestimmt.

Um den Einfluß der Drallströmung sowie des Drucks und der Temperatur im Brennraum auf den Strahlzerfall, die Kraftstoffverdampfung und die Mischung des Kraftstoffs mit der Luft untersuchen zu können, sind weitere Messungen unter motorrealistischen Bedingungen geplant. Dafür steht eine am Lehrstuhl A für Thermodynamik entwickelte, neuartige Einzylindermaschine zur Verfügung. Dieses Einzylinder-Einhub-Triebwerk hat fünf optische Zugänge in den Brennraum, so daß alle gängigen Meßverfahren, wie z.B. LIF, PDA, Schlieren und Raman-Spektroskopie teilweise auch parallel eingesetzt werden können.

Die beschriebenen Meßverfahren liefern wichtige Informationen, die zu einem besseren Verständnis der komplexen Vorgänge bei der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung beitragen und ermöglichen somit eine gezielte Optimierung hinsichtlich Schadstoff- und Lärmemission.

## 4. Danksagung

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsstiftung für die finanzielle Unterstützung der vorliegenden Arbeit, die in Kooperation mit den Firmen AUDI, BMW und MAN durchgeführt wird.

### 5. Literatur

- (1) **Feldmann O., Mayinger F., Gebhard P.;** Evaluation of Pulsed Laser Holograms of Flashing Sprays by Digital Image Processing and Holographic Particle Image Velocimetry; Nuclear Engineering and Design; to be published
- (2) **Hiro Horoyasu and Masataka Arai;** Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines; SAE-Paper 900475; Dept. of Mechanical Engineering; University of Hiroshima; Japan
- (3) **Hiroyuki Hiroyasu and Masataka Arai;** Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray; SAE-Paper 890464; University of Hiroshima & Madza Motor Corp.; Japan
- (4) **Hoang Xuan Quoc, Brun M.;** Study on Atomisation and Fuel Drop Size Distribution in Direct Injection Diesel Spray; SAE-Paper 940191; Ecole Centrale de Lyon
- (5) **Kamimoto T., Haruyuki Y., Kobayashi H.;** A New Technique for the Measurement of Sauter Mean Diameter of Droplets in Unsteady Dense Sprays; SAE-Paper 890316; Tokyo Institute of Technology
- (6) Kobashi K., Hishida K., Maeda M.; Measurement of Fuel Injector Spray Flow of I.C. Engine by FFT Based Phase Doppler Anemometer – An Approach to the Time Series Measurement of Size and Velocity, Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, 5<sup>th</sup> International Symposium; Lisbon; Portugal; Springer Verlag; S. 268-290, 1990
- (7) **Lefebvre Arthur H.**; Atomisation and Sprays; Combustion: An International Series; Hemisphere Publishing Corporation; 1989
- (8) Pitcher G., Wigley G., Saffmann M.; Sensitivity of Dropsize Measurements by Phase Doppler Anemometry to Refractive Index Changes in Combusting Fuel Sprays; Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, 5<sup>th</sup> International Symposium; Lisbon; Portugal; Springer Verlag; S. 227-247, 1990
- (9) Prechtl P., Dorer F., Mayinger F.; Untersuchung der Gemischbildung in einem direkteinspritzenden Wasserstoff-Schiffsdieselmotor mit Laseroptischen Meßmethoden; 4. September 1995; VDI-GET GVC "Thermodynamik - Kolloquium '95"; Halle
- (10) Prechtl P., Dorer F., Mayinger F.; Hydrogen C.I. Ship Engine: Ignition and Combustion Process Analyzed with High Speed Optical Measurement Systems; 22.
  – 26. Juni 1998; XII World Hydrogen Energy Conference; Buenos Aires; Argentinien
- (11) Saffmann M., Fraidl G., Wigley G.; Application of Phase and Laser Doppler Anemometry to the Measurement of Droplet Size and Velocity in Gasoline and Diesel Fuel Injection Systems; Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, 4<sup>th</sup> International Symposium; Lisbon; Portugal; Springer Verlag; S. 207-223, 1988
- (12) Wigley G. and Pitcher G.; The effect of fuel line pressure and injection duration on Diesel spray formation and structure; ICLASS-Konferenz Florenz 1997