

## **MESSUNG DER TROPFENGRÖßENVERTEILUNG IN EINEM BRENNSTOFFSPRAY MIT EINEM SCHATTENVERFAHREN**

### **MEASUREMENT OF THE DROP SIZE DISTRIBUTION IN A FUEL SPRAY WITH A SHADOW SIZING TECHNIQUE**

**Christian Pfeifer, Dietmar Kuhn**

Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kern- und Energietechnik,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Schlagworte: Schattenverfahren, Brennstoffspray, Tiefenschärfe, JPDF

Key words: Shadow sizing, fuel spray, depth of field, JPDF

#### **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wird die Tropfengrößenverteilung in einem Brennstoffspray unter Variation des Injektionsdruckes zeit- und orts aufgelöst gemessen. Die frühe Phase eines Selbstzündungsprozesses hat einen entscheidenden Einfluß auf die Verbrennung und somit auch auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffentstehung. Um ein besseres Verständnis von einem Selbstzündungsprozess zu erlangen, ist es wichtig, auch im Hinblick auf numerische Simulationen, das Brennstoffspray zu charakterisieren. Dafür werden unter anderem detaillierte Informationen über die Tropfengrößenverteilung und die Geschwindigkeit der Brennstofftropfen mit örtlicher und zeitlicher Auflösung benötigt. Um diese Informationen gewinnen zu können, kommt als Messmethode das DaVis-SizingMaster Shadow Verfahren zum Einsatz. Dadurch ist es möglich, gekoppelte Informationen über die Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit zu gewinnen. Die Daten dienen der Beurteilung des Einflusses des Spraycharakters auf die Selbstzündung des Brennstoffsprays und werden als Eingangsparameter in die numerische Simulationen einer Sprayselbstzündung einfließen.

#### **Einleitung**

Die Verbrennung von Flüssigbrennstoffen wird für viele Energiesysteme wie industrielle Brenner und im automobilen Bereich eingesetzt. Für Selbstzündungsprozesse, welche unter anderem in der dieselmotorischen Verbrennung Anwendung finden, ist die frühe Phase des Verbrennungsvorgangs von entscheidender Bedeutung hinsichtlich Schadstoffbildung und Wirkungsgrad. Als erster Schritt eines solchen instationären Verbrennungsvorgangs gilt die Sprayentwicklung. Um ein gutes Startverhalten zu erzielen, ist es notwendig, den Flüssigbrennstoff in möglichst kleine Tropfen zu zerstäuben, um damit die Oberfläche des Brennstoffes zu vergrößern (Lefebvre 1983). Es ist von hohem Interesse und war das Ziel der vorliegenden Arbeit, den Einfluss des Injektionsdrucks auf den Spraycharakter zu identifizieren. Auch im Hinblick auf die Vorgabe von quantitativen Randbedingungen bei der numerischen Simulation von Sprays, ist eine experimentelle Bestimmung gekoppelter Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsinformation mit örtlicher und zeitlicher Auflösung von großer Bedeutung.

Zur Untersuchung der Selbstzündung von gasförmigen Brennstoffeinstrahlen sowie von Brennstoffsprays in einer Hochdruck-/Hochtemperaturatmosphäre wurde die Versuchsanlage TROJA (Transient Open Jet for Auto-Ignition) errichtet. Die Anlage erlaubt optische Untersuchungen bei Kammerdrücken von bis zu 40 bar und einer Temperatur von bis zu 720 K. Als Brennstoff kommt Dimethylether (DME) zum Einsatz, welcher in eine inerte Hochdruck-

umgebung injiziert wird. Somit kann die Spraybildung ohne überlagerte chemische Reaktion untersucht werden. Durch die rechtwinklige Anordnung der optischen Zugänge unterhalb des Injektionsrohrauslasses ist bei einem Einsatz der Phase Doppler Anemometry (PDA) (Durst und Zare 1975) nur mit einer sehr geringen Signalstärke zu rechnen, sodaß zuverlässige Ergebnisse nur schwer zu erreichen sind. Ebenso wurde in Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen festgestellt, daß bei bestimmten Betriebsparametern die Tropfen keine sphärische Form haben. Diese Abweichungen in der Sphärizität können die Tropfengrößenverteilung verbreitern (Albrecht et al. 2003). Aus diesem Grund wurde ein Schatten-Verfahren eingesetzt, welches mit Mitteln der Bildverarbeitung die Tropfengrößenverteilung und die Tropfengeschwindigkeit gekoppelt misst.

## Versuchsbeschreibung und Messaufbau

Die Messungen des Sprays erfolgen an der Versuchseinrichtung *TROJA*. Die zylindrische Hochdruckkammer hat eine axiale Länge von 500 mm und einen Innendurchmesser von 102 mm (Abb. 1a). Durch vier Quarzglasscheiben, welche rechtwinklig zueinander angeordnet sind, ist die Kammer optisch zugänglich. Für reaktive Versuche, bei denen Brennstoffe durch die Kammerbedingungen zu Selbstzündung gebracht werden können, wird die Kammer mit Luft gefüllt. Für Versuche zur Untersuchung des Strömungsfeldes ohne chemische Reaktion wird die Kammer mit Stickstoff befüllt. Während des Experiments wird die Kammer kontinuierlich gespült. Dabei wird das Kammergas mit einer solch geringen Geschwindigkeit zugeführt, daß es innerhalb der Kammer nicht zur Ausbildung einer großskaligen Strömungsstruktur kommt, welche die Dynamik des Sprays beeinflusst. Mittels eines schnell schaltenden Ventils (<1ms), welches in der Mitte des Kammerdeckels befestigt ist, wird der Brennstoff in eine Vorkammer injiziert. Diese ist über einen Trichter mit dem Injektionsrohr verbunden (Abb. 1b). Das Injektionsrohr hat eine Länge von 200 mm bei einem Innendurchmesser von 2 mm und mündet auf Höhe der Fensteroberkante in die Kammer.

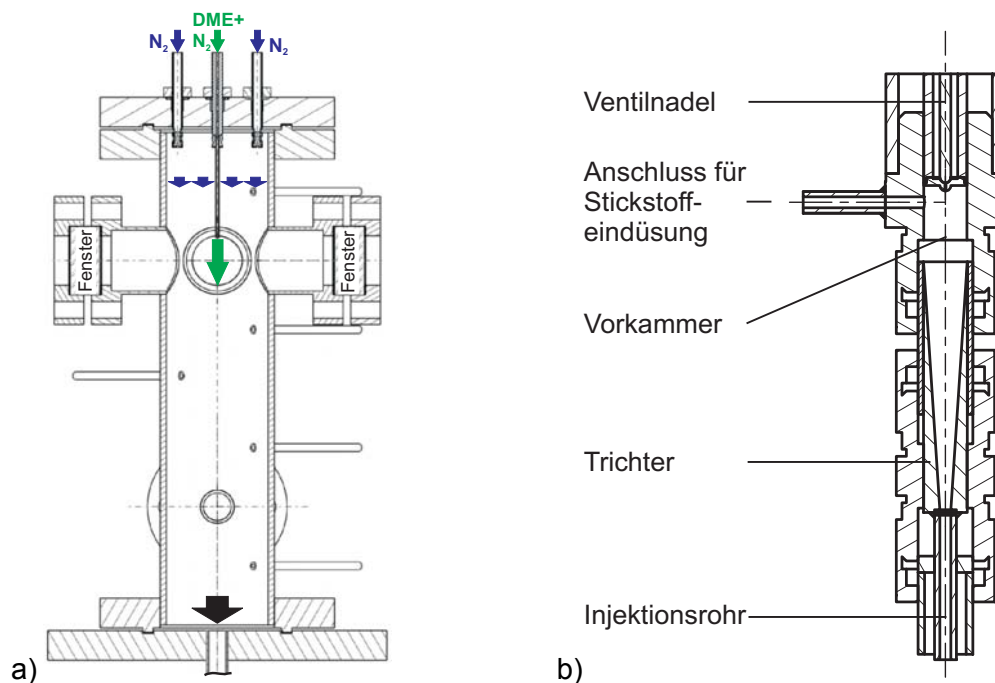


Abb. 1: Experimenteller Aufbau: a) Kammer, b) Injektionssystem.

Die Tropfengrößen- und die Tropfengeschwindigkeitsmessungen werden mit dem DaVis-SizingMaster Shadow Verfahren durchgeführt. Zur Beleuchtung kommt ein Doppelpuls-Nd:YAG-Laser zum Einsatz. Direkt an den Doppelpuls-Laser angeschlossen befindet sich ein Diffusor (Abb. 2). Seine Aufgabe ist es, die Laserstrahlen zu einer homogenen Hinter-

grundbeleuchtung aufzuweiten. Für die Versuche wird die Position des Diffusors der Position des Untersuchungsbereichs im Spray so angepasst, daß die Beleuchtung homogen und mit optimaler Lichtintensität ausgeführt wird. Gemäß einem Aufbau im Durchlichtverfahren ist die Aufnahmeeinheit auf der gegenüberliegenden Seite der Kammer angebracht. Zur Bilderfassung kommt eine Doppelbild-CCD-Kamera (FlowMaster 3S, LaVision) mit einer Auflösung von  $1280 \times 1024$  Pixel zum Einsatz. Der Kamera ist ein Fernfeldmikroskop (Questar QM1) vorgeschaltet. Dadurch ist es möglich, im Beobachtungsfenster eine hohe Tiefenschärfe zu erlangen. Der Arbeitsabstand zwischen Düsenaustritt und Fernfeldmikroskop beträgt 56 cm. Zwischen Fernfeldmikroskop und Kamera ist zur Vergrößerung der Ortsauflösung eine Vergrößerungslinse mit dem Faktor 1.5 angebracht. Das Aufnahmesystem wird auf die Ebene der Rotationsachse des Injektionsrohres scharf gestellt. Die Kalibrierung des Maßstabes erfolgt im Vorfeld mit einer Kalibrierplatte. Die Ortsauflösung der Kamera beträgt dadurch  $1.65 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ . Das Beobachtungsfeld der Kamera hat eine Breite von 2.11 mm und eine Höhe von 1.68 mm. Das Aufnahmesystem kann mittels einer Traverse horizontal in x-Richtung verschoben werden. Um das Spray in seiner axialen Ausdehnung zu untersuchen, ist das Aufnahmesystem vertikal über Mikrometerschrauben positionierbar. Als absolute Referenzposition wird die Freistrahlachse an der Injektionsrohrunterkante herangezogen. Um den instationären Injektionsvorgang untersuchen zu können, ist eine Synchronisation der Injektions- und Messeinrichtung notwendig. Als Steuereinheit fungiert der Trigger-PC, welcher die Schaltzeiten der Ventile vorgibt. Die Triggerleitung zum Injektionsventil wird mittels T-Stück ebenso zum Daten-PC geführt. Der Daten-PC löst zum Start der Injektion mit einer einstellbaren Verzögerung den Doppelpuls des Lasers und die Doppelbildaufnahme der Kamera aus. Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Einzelpulsen ist zu  $10 \mu\text{s}$  festgesetzt. Dies führt zu einem maximalen Versatz des Mittelpunktes eines Tropfens zwischen erster und zweiter Aufnahme von 20.6 Pixel.

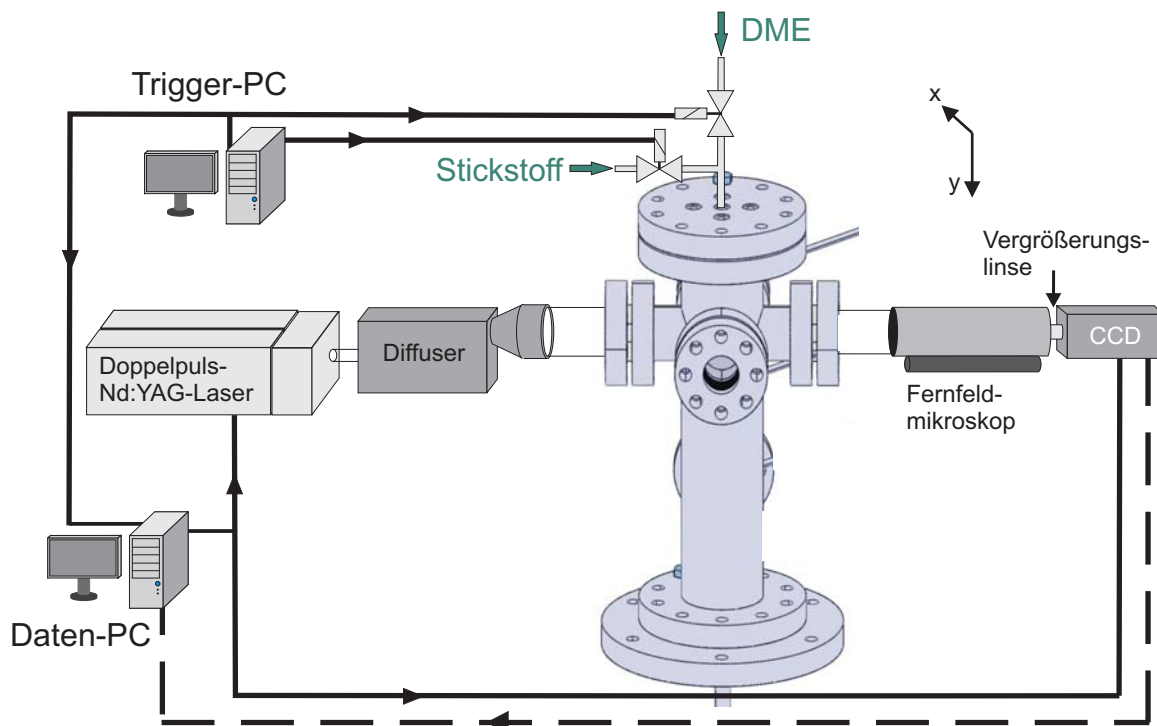


Abb. 2: Versuchsaufbau an der Messanlage TROJA

Die Auswertung der Doppelbildaufnahmen erfolgt mit dem kommerziellen Softwarepaket DaVis-SizingMaster Shadow (Version 7.2). Auf dessen Verarbeitungsalgorithmus wird in (Berg et al. 2006) und (Kapulla et al. 2008) detailliert eingegangen.

Als Brennstoff wird Dimethylether (DME) eingesetzt. Die Sprayentwicklung bei DME wird bei drei unterschiedlichen Injektionsdrücken von 60, 70 und 80 bar untersucht. Dafür wird DME mittels Hubkolbenverdichter auf den entsprechenden Druck verdichtet. Die Brennstofftemperatur beträgt vor der Eindüsung 300 K. Die Temperatur in der Kammer entspricht ebenfalls 300 K, wobei in der Kammer für alle Injektionsdrücke ein konstanter Druck von 20 bar vorherrscht. Wie in vorangegangenen Untersuchungen wird das Brennstoffspray in eine bereits etablierte Trägerströmung aus Stickstoff injiziert (Pfeifer et al. 2008). Der Stickstoff für die Trägerströmung hat jeweils denselben Hinterdruck wie das Brennstoffspray.

### Experimentelle Bestimmung der Tiefenschärfe

Der Bereich, in welchem Tropfen detektiert und vermessen werden können, ist sowohl durch den Bildbereich des Kamerachips als auch durch die Tiefenschärfe des optischen Systems begrenzt. Zur Bestimmung dieser absoluten Tiefe ist es möglich, mittels eines analytischen Ansatzes einen Betrag für die Tiefenschärfe des Fernfeldmikroskops abzuschätzen (Hornberg 2006). Hierbei würde es sich jedoch um eine idealisierte Betrachtung handeln, welche nicht das gesamte optische System mit einbezieht. Aus diesem Grund wird für das gesamte System experimentell der Bereich bestimmt, in welchem Tropfen noch scharf abgebildet werden. Zur Bestimmung der Messtiefe wurden auf eine Glasscheibe opake Kreise mit Durchmessern von 10  $\mu\text{m}$  bis 150  $\mu\text{m}$  aufgebracht. Die Glasscheibe wurde in Richtung der optischen Achse verfahren. Dabei wurden Schattenbildaufnahmen angefertigt und ausgewertet. Die Anzahl der detektierten Kreise in Abhängigkeit der Position der Glasscheibe auf der optischen Achse ist in Abb. 3 dargestellt. Die Kurven repräsentieren orts aufgelöst die Anzahl der detektierten Kreise, welche sich jeweils in einer Größenklasse befinden. Der Größenwert der Klasse bezieht sich dabei auf den Mittelwert der Größenklasse, die jeweils eine Breite von 10  $\mu\text{m}$  hat.

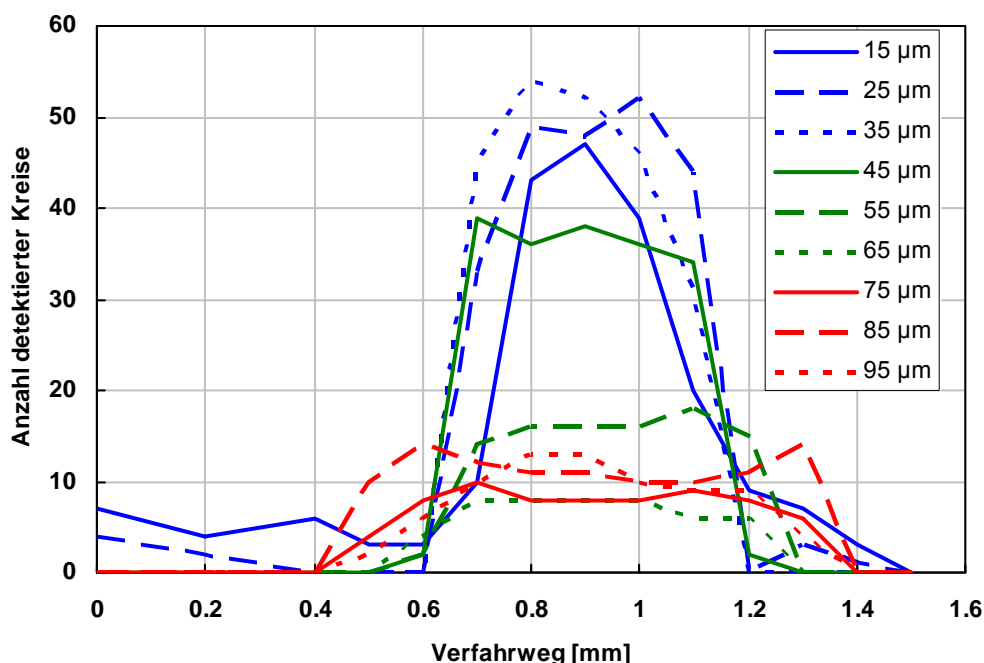


Abb. 3: Auftragung der Anzahl der detektierten Kreise über den Verfahrweg der Glasscheibe auf der optischen Achse

Es ist zu erkennen, daß die Tiefenschärfe mit zunehmendem Kreisdurchmesser größer wird, was der Beobachtung von (Kim and Kim1994) entspricht. Aus der Messung geht hervor, daß

Kreise der Größenklasse 15 µm in einer Tiefe von 0.4 mm mit einem symmetrischen Fehler von +/-0.05 mm detektiert werden können. Kreise der Größenklasse 25, 35 und 45 µm sind in einer Tiefe von 0.5 mm mit einem symmetrischen Fehler von +/-0.05 mm detektierbar. Für Kreise der Größenklasse 75, 85 und 95 µm vergrößert sich die Tiefenschärfe nochmals auf einen Wert von 0.8 mm mit einem symmetrischen Fehler von +/-0.1 mm. Da in den späteren Messungen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Tropfendurchmessern oberhalb der untersuchten Klassen gering ist, wird folglich eine Tiefenschärfe von 0.5 mm +/-0.1 mm abgeschätzt.

## Ergebnisse

Der flüssige Brennstoff wird in eine simultane Trägerströmung aus Stickstoff injiziert. Dies stellt sicher, daß der gesamte Brennstoff einer Injektion aus dem Injektionsrohr ausgeschoben wird und es zu keiner Ansammlung von Brennstoff im Injektionsrohr kommt. Untersuchungen werden bei einem Injektionsdruck von 60, 70 und 80 bar durchgeführt. Die Öffnungszeit des Injektionsventils beträgt für alle Injektionsdrücke 6 ms. Der Hinterdruck des Stickstoffes ist jeweils identisch mit dem Injektionsdruck des Brennstoffes. Bei jedem Zeitschritt werden 100 Doppelbildaufnahmen ausgewertet. In Abb. 4 ist die zeitliche Entwicklung des Sauter-Durchmessers (SMD,  $D_{32}$ ) über die Dauer der Injektion bei unterschiedlichen Injektionsdrücken am Düsenrohraustritt auf der Freistrahachse dargestellt. Der SMD ist wie folgt definiert (Lefebvre 1989):

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i^3}{\sum_{i=1}^N D_i^2}$$

Dabei definiert  $N$  die Anzahl an detektierten Tropfen und  $D$  den Tropfendurchmesser. Der SMD beschreibt das Verhältnis des Tropfenvolumens zur Tropfenoberfläche und wird zur Bewertung des Stofftransportes herangezogen. Beim Injektionsdruck von 80 bar treten die ersten Tropfen 11 ms nach Injektionsbeginn aus dem Injektionsrohr aus. Bei einem Injektionsdruck von 70 bar werden die ersten Tropfen nach 12 ms registriert. Dabei hat für beide Injektionsdrücke der SMD zu Beginn den höchsten Wert. Im weiteren Verlauf der Injektion fällt der SMD ab, wobei beim Injektionsdruck von 80 bar über einen Zeitraum von 18 ms Tropfen registriert werden. Dies ist auf den größeren Massenstrom aufgrund des höheren Druckgradienten und somit höhere Austrittsgeschwindigkeit zurückzuführen.

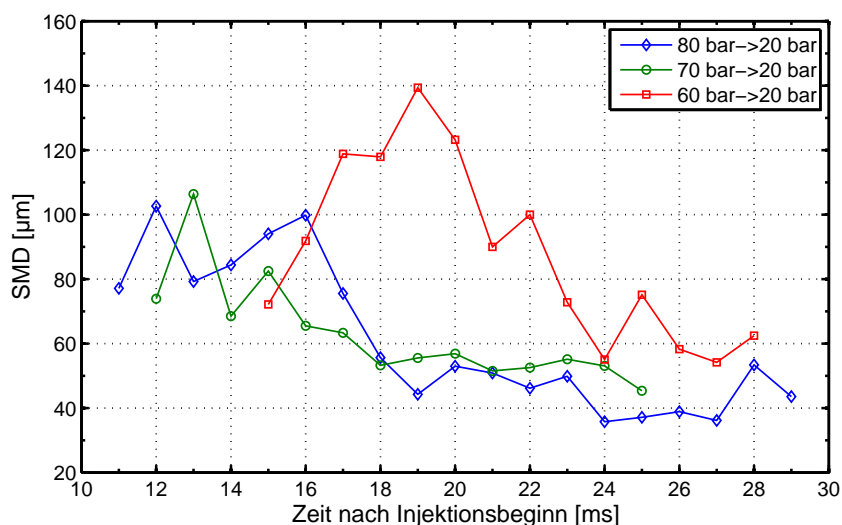


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung des Sauter-Durchmessers auf der Freistrahachse am Düsenrohraustritt bei Injektionsdrücken von 60, 70 und 80 bar.

Nach 15 ms werden die ersten Tropfen beim Injektionsdruck von 60 bar detektiert. Im Unterschied zu den beiden vorangegangenen Druckeinstellungen steigt hier der SMD im Verlauf der Injektion deutlich an und fällt ab dem Zeitpunkt 20 ms ab.

In Abb. 5 ist der zeitliche Verlauf der mittleren Geschwindigkeit auf der Freistrahlsachse am Düsenrohraustritt aufgetragen. Durch die bereits etablierte Stickstoffträgerströmung ist eine Beschleunigung der Tropfen zu Beginn der Injektion nicht detektierbar.

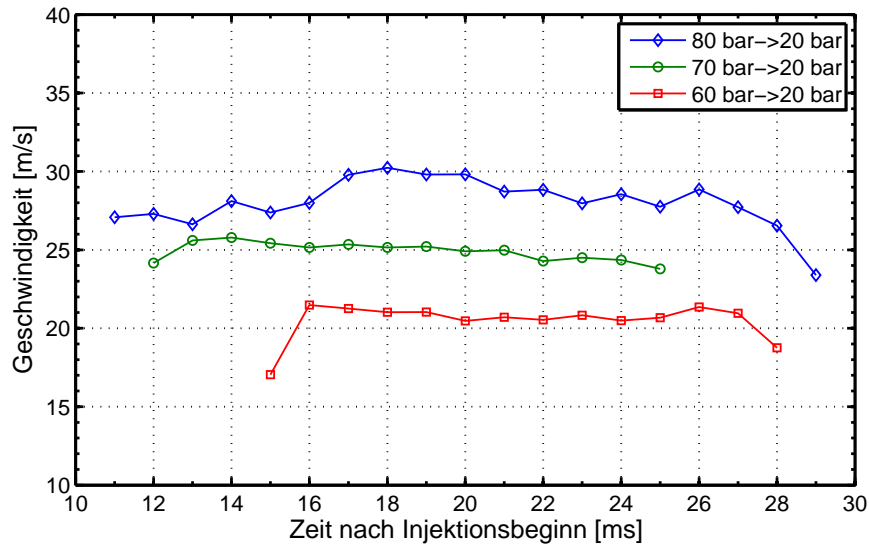


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Tropfengeschwindigkeit auf der Freistrahlsachse am Düsenrohraustritt bei Injektionsdrücken von 60, 70 und 80 bar.

Die gekoppelten Informationen aus Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit sind in ausgewählten gebundenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, *Joint Probability Density Function (JPDF)*, in Abb. 6-8 dargestellt. Aus einer solchen JPDF kann die Wahrscheinlichkeit entnommen werden, mit welcher ein Tropfen mit dem Durchmesser  $\psi$  das Meßvolumen mit der instantanen Geschwindigkeit  $v$  durchtritt. Die Wahrscheinlichkeit, womit ein Tropfen mit beliebiger Geschwindigkeit  $v$  und beliebigem Durchmesser  $\psi$  auftritt, liegt bei 1, was zur folgenden Normierungsbedingung führt (Pope 1981):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(v, \psi) dv d\psi = 1$$

Der Auswertebereich erstreckt sich hier über den gesamten Querschnitt des Düsenrohraustritts. Es ist zu erkennen, daß sich mit ansteigendem Injektionsdruck die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Tropfen großen Durchmessers verringert.

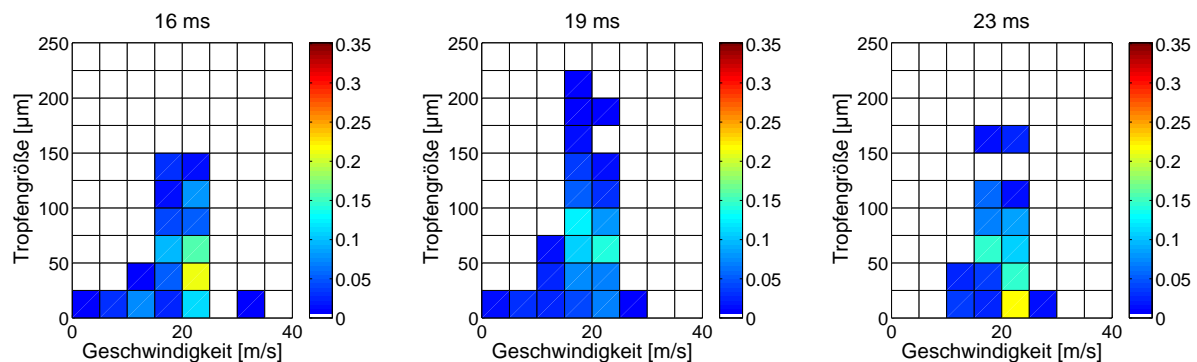


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der gekoppelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit am Düsenrohraustritt bei  $p_{inj}=60$  bar und  $p_{Kammer}=20$  bar.

Bei den Injektionsdrücken 70 bar und 80 bar ist eine Verlagerung der Bereiche hoher Auftretswahrscheinlichkeit hin zu geringeren Durchmessern erkennbar.

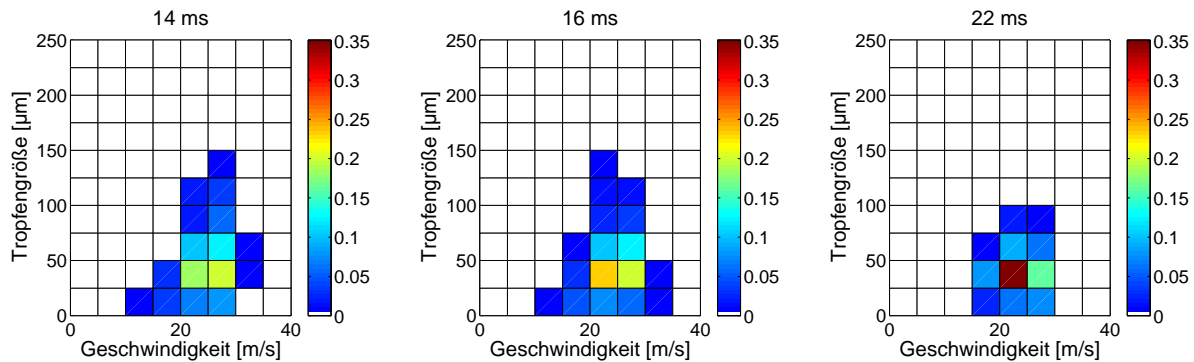


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung der gekoppelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit am Düsenrohraustritt bei  $p_{inj}=70$  bar und  $p_{Kammer}=20$  bar.

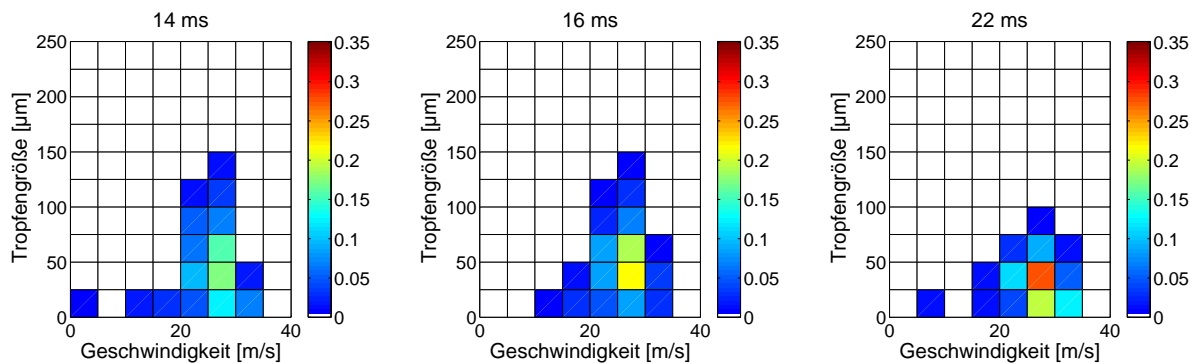


Abb. 8: Zeitliche Entwicklung der gekoppelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit am Düsenrohraustritt bei  $p_{inj}=80$  bar und  $p_{Kammer}=20$  bar.

## Schlussbemerkung

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels eines Schattenverfahrens gekoppelte Daten über die Tropfengrößenverteilung und die Tropfengeschwindigkeit bei unterschiedlichen Injektionsdrücken am Düsenrohraustritt bestimmt. Um die Tiefe des Auswertevolumens abzuschätzen, wurde eine Glasscheibe mit Kreisen unterschiedlichen Durchmessers auf der optischen Achse traversiert und für den auftretenden Tropfengrößenbereich ein Betrag der Tiefenschärfe abgeschätzt. In weiteren Arbeiten wird die Entwicklung der Tropfengrößen- und geschwindigkeitsverteilung des Sprays in seiner räumlichen Ausdehnung untersucht. Die bereits gewonnenen Daten werden dadurch erweitert und ebenso als JPFDs parametrisiert. Die gesamten Daten stehen der Beurteilung des Einflusses des Spraycharakters auf die Selbstzündung unter reaktiven Bedingungen zur Verfügung und werden zur Validierung numerischer Modelle herangezogen.

## Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 606.

## Literatur

- Albrecht, H.-E., Damaschke, N., Borys, M., Tropea, C., 2003: "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques", Springer Verlag Berlin Heidelberg
- Berg, T., Deppe, J., Michaelis, D., Voges, H., Wissel, S., 2006: "Comparison of particle size and velocity investigations in sprays carried out by means of different measurement techniques", ICLASS-2006, 27th Aug.-1.Sep., Kyoto, Japan
- Durst, F., Zare, M., 1975 "Laser doppler measurements in two-phase flows", The accuracy of flow measurements by laser Doppler methods; Proceedings of the LDA-Symposium, pp. 403–429
- Hornberg, A. H., 2006: "Handbook of machine vision", WILEY-VCH, Weinheim
- Kapulla, R., Tuchtenhagen, J., Müller, A., Dullenkopf, K., Bauer, H.-J., 2008: "Droplet sizing performance of different shadow sizing codes", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 16. Fachtagung, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V.
- Kim, K. S., Kim, S.-S., 1994: "Drop sizing and depth-of-field correction in tv imaging", Atomizat. Sprays 4, pp. 65–78
- Lefebvre, A. H., 1989: "Atomization and sprays", Hemisphere, New York
- Lefebvre, A. H., 1983: "Gas Turbine Combustion", Hemisphere Publishing Co., Washington, D.C.
- Pfeifer, C., Bruzzese, C., Kuhn, D., Fast, G., 2008: "Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes eines Sprays mit verbesserter örtlicher Auflösung", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 16. Fachtagung, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V.
- Pope, S. B., 1981: "Transport equation for the joint probability density function of velocity and scalars in turbulent flow", Physics of Fluids, 24(4), pp. 588–596