

ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS ZUR BESTIMMUNG DER TROPFENGRÖÖE UND TROPFENPOSITION

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD TO DETERMINE THE DROPLET DIAMETER AND THE DROPLET POSITION

Christoph Schneider, Christian Pfeifer, Dietmar Kuhn

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Schlagworte: Schattenverfahren, Tropfengröße, Tropfenposition, Schärfentiefe

Key words: Shadow sizing technique, droplet size, droplet position, depth of field

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Verfahren zur Bestimmung von Tropfengröße und Tropfenposition diskutiert. Diese spielen eine entscheidende Rolle bei der Spraybildung, Vermischung und der darauffolgenden Selbstzündung. Die Verteilung der Tropfen sowie deren Größe wirken sich direkt auf die Verbrennung, und hierbei insbesondere auf den Wirkungsgrad sowie die Schadstoff- und Rußbildung, aus. Daher ist ein umfassendes Verständnis von den Selbstzündungsprozessen unerlässlich. Hierfür sind experimentelle Versuche notwendig, die eine Datengrundlage für die folgenden numerischen Simulationen liefern. Als Basis dienen Informationen über Tropfengrößenverteilungen sowie deren Lage. Bisherige Verfahren ermöglichen zumeist eine Bestimmung in zweidimensionaler Richtung. Aussagen über die dreidimensionale Lage einzelner Tropfen und somit über den Abstand von Tropfen zueinander lassen sich durch die Erweiterung des Schattenverfahrens von zwei auf drei Dimensionen gewinnen. Dies ermöglicht es, den dreidimensionalen Charakter von Strömungen sowie integrale Aussagen wie beispielsweise den Massenstrom zu untersuchen. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen geben Aufschlüsse darüber, ob sich das zu untersuchende Objekt vor der Fokusebene der Aufnahmeeinheit oder dahinter befindet. Des Weiteren ist eine grobe Abstandsbestimmung zur Fokusebene durchführbar.

Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Verbrennungsprozesse in Verbrennungsmotoren ist ein umfassendes Verständnis über die beeinflussenden Faktoren sowohl auf die Zündung als auch auf die nachfolgende Verbrennung unerlässlich. Bei der Selbstzündung, die in Dieselmotoren zur Anwendung kommt, spielt neben der Einspritzung besonders die Sprayentwicklung eine bedeutende Rolle. Hier ist die Zerstäubung von Flüssigkraftstoff als erster Teilschritt im instationären Verbrennungsprozess für den Verbrennungsablauf von entscheidender Bedeutung. Durch möglichst kleine Tropfen wird die Oberfläche des Brennstoffs im Vergleich zum Brennstoffvolumen entscheidend vergrößert (Lefebvre 1983) und somit die Verdampfung beschleunigt. Dies führt zu einer schadstoffärmeren Verbrennung. Um ein detailliertes Verständnis des Spraycharakters zu erhalten, das neben der Reduzierung der Schadstoffemissionen auch zur parallelen Verbesserung des Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren

führt, ist es notwendig, experimentelle Daten zu sammeln und numerische Modelle für Verbrennungssimulationen zu validieren.

Zur Untersuchung von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten sind derzeit Messverfahren am gängigsten, die mit Hilfe der Lichtstreuung arbeiten. Hier hat sich insbesondere die Phasen Doppler Anemometrie (PDA) (Durst und Zare 1975) (Bachalo und Houser 1984) als Standardmesstechnik etabliert. Aufgrund ihrer Notwendigkeit, eine exakte optische Anordnung zu gewährleisten, ist der Aufbau jedoch schwierig und die entstehenden Kosten sind sehr hoch. Außerdem stellt der Fakt, dass nicht-sphärische und/oder opake Partikel nicht messbar sind, eine signifikante Schwäche des Messverfahrens dar (Damaschke et al. 1998). Aus diesen Gründen wurde die entwickelte Messtechnik, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, auf Basis des Schattenverfahrens entwickelt. So wird durch Aufnahme der untersuchten Messobjekte und anschließender Bildverarbeitung die Messobjektgröße und Messposition bestimmbar gemacht.

Abhängig von der Tiefenschärfe des optischen Systems ändert sich der Bereich, in dem Objekte scharf abgebildet werden. Als Beispiel zeigt Abb. 1 eine Schattenaufnahme eines Einspritzvorgangs. Zu erkennen sind viele einzelne Tropfen unterschiedlichen Schärfegrades. Bis zu einem gewissen Maß kann eine Bildanalysesoftware die Schatten als Tropfen erkennen und ihnen eine bestimmte Größe zuordnen. Die Schärfe der abgebildeten Tropfen wirkt sich jedoch direkt auf deren Größenbestimmung aus. Bei unscharfen Tropfen ist der Übergangsbereich von Tropfen zu Hintergrund groß, während scharfe Tropfen klare Abgrenzungen zwischen Tropfen und Hintergrund und dadurch starke Intensitätsgradienten aufweisen. Sind diese Intensitätsgradienten jedoch klein, ist keine exakte Tropfengrößenbestimmung möglich. In diesem Fall kann den Tropfen kein genauer Abstand zur Fokusebene der Kamera zugeordnet werden und es lässt sich keine Aussage darüber machen, ob sich der Tropfen vor der Fokusebene oder dahinter befindet.

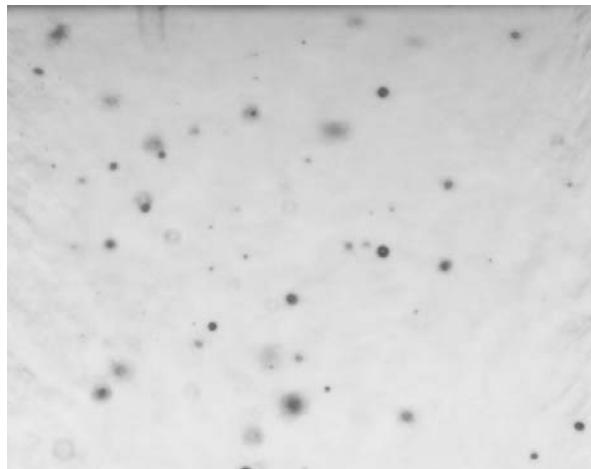


Abb. 1: Schattenaufnahme eines Einspritzvorgangs. Es sind sowohl Tropfen mit scharf abgebildeter Umrandung, als auch Tropfen außerhalb des Bereiches der Tiefenschärfe zu erkennen.

Mit dem Ziel, eine Positions- und Größenbestimmung auch für unscharf abgebildete Objekte zu ermöglichen und darauf aufbauend den Verlauf von Eindüsvorgängen hinsichtlich ihrer dreidimensionalen Lage genauer zu untersuchen, ist die Messtechnik von zwei auf drei Dimensionen erweitert worden. Durch die zusätzliche Information der Position in z-Richtung ist es möglich, genauere Aussagen über den dreidimensionalen Charakter von Strömungen zu treffen. Die gewonnenen Informationen liefern zudem eine grundlegende Basis für die Charakterisierung von Injektionsvorgängen und die Möglichkeit zur Validierung von numerischen Spraymodellen.

Versuchsbeschreibung und experimenteller Aufbau

Die Untersuchungen für die vorliegenden Experimente erfolgen an einem für diese Arbeit konzipierten Versuchsstand am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Der Aufbau des Versuches (Abb. 2) besteht aus einer Belichtungsanlage, den Messobjekten, einem Strahlteiler, der Aufnahmeeinheit sowie dem Trigger- und Aufnahme-PC. Da in der vorliegenden Arbeit ein neues Messverfahren beschrieben wird, spielen die geometrischen Abmessungen eine untergeordnete Rolle und es wird daher nicht genau darauf eingegangen.

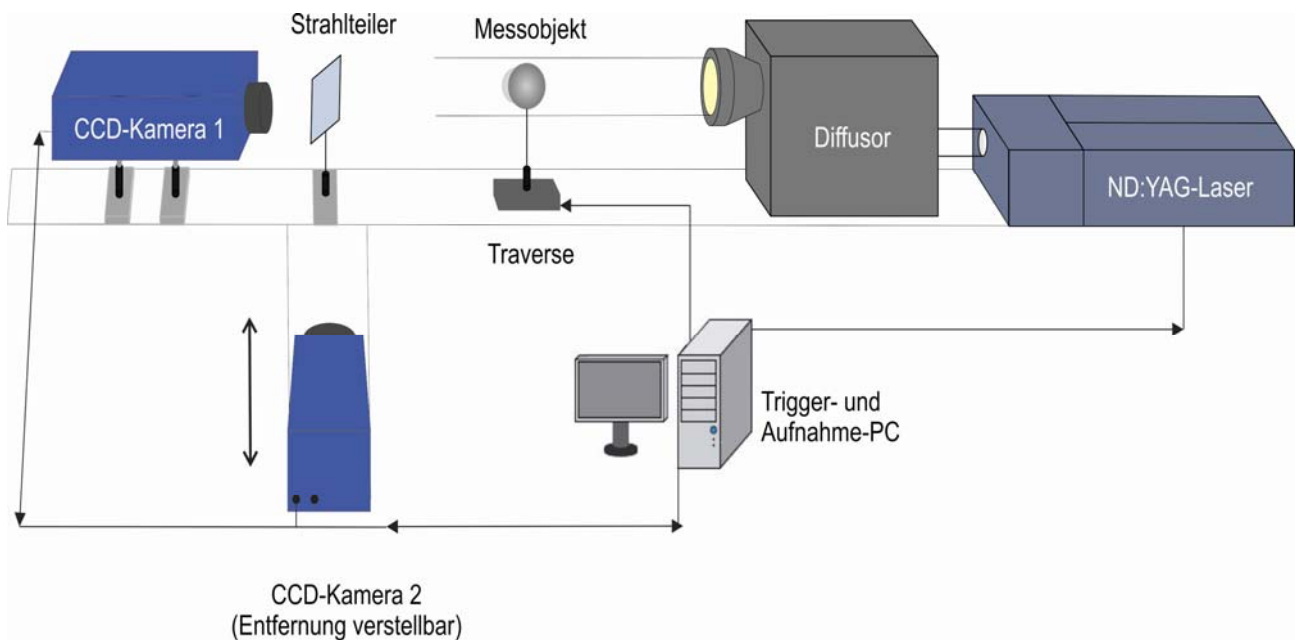


Abb. 2: Versuchsanordnung zur Messung von Objektgröße und Objektposition in dreidimensionaler Lage

Zur Beleuchtung kommt ein Nd-YAG-Puls laser zum Einsatz. Der Puls laser emittiert eine monochromatische Infrarot-Strahlung mit der Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Ein Frequenzverdoppler halbiert die Strahlung zu einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$. An den Puls laser ist ein High Efficiency Diffuser angeschlossen, der für eine homogene Ausleuchtung des Messvolumens sorgt. Während der Versuche dient die Kombination aus Laser und Diffusor als Hintergrundbeleuchtung. Die Position des Diffusors wird der Position des Untersuchungs bereichs so angepasst, dass die Beleuchtung homogen und mit optimaler Lichtintensität strahlt. Der Laser emittiert das Laserlicht in positiver x-Achsenrichtung. Nachdem das Licht vom Diffusor emittiert wird, trifft es zuerst auf das Objekt und wird hinterher über einen Strahlteiler in zwei gleichstarke Lichtstrahlen aufgeteilt. Der eine Strahlengang verläuft weiterhin in x-Achsenrichtung, während der andere mit Hilfe des Strahlteilers um einen Winkel von 90° abgelenkt wird und sich anschließend in y-Achsenrichtung erstreckt. Gemäß dem Aufbau eines Schattenverfahrens ist die Bildaufnahmeeinheit gegenüber der Belichtungsanlage befestigt. Dort werden beide Lichtstrahlen von jeweils einer Kamera aufgenommen. Kamera 1 ist mit Blick in negative x-Achsenrichtung stationär befestigt, so dass die Entfernung zwischen dem Austritt des Lichtstrahls aus dem Diffusor und der Kamera während der gesamten Messung gleich bleibt. Kamera 2 steht senkrecht zur x-Achse und ist in y-Achsenrichtung verschiebbar. Dafür ist eine Präzisionstraverse zuständig, die im Millimeterbereich manuell verstellbar ist.

Als Messobjekte dienen im Zuge der Arbeit vier Kugeln unterschiedlichen Durchmessers ($K1 = 20 \text{ mm}$, $K2 = 9,7 \text{ mm}$, $K3 = 7,9 \text{ mm}$ und $K4 = 6,2 \text{ mm}$). In Abb. 3 ist die Kugel K1 dargestellt, anhand der in der vorliegenden Arbeit das Vorgehen zur Größen und Positionsbestimmung beschrieben ist. Die Kugeln werden mit Hilfe einer linear beweglichen Traverse der Firma *ISEL* in dem Messvolumen befestigt. Durch die Linearbewegung der Traverse ist das Messobjekt in x-Achsenrichtung verschiebbar. Angetrieben wird die Traverse von einem Spindeltrieb, der sich über den Trigger-PC steuern lässt. So werden reproduzierbare Messungen gesichert.



Abb. 3: Darstellung des Messobjektes K1

Das bildgebende System des Messaufbaus besteht aus den beiden Doppelbild-CCD-Kameras (FlowMaster 3S, LaVision), den zugehörigen Objektiven, der Programmable Timing Unit (PTU) und dem Trigger-PC. Die Kameras arbeiten mit einer Auflösung von 1280×1024 Pixel, wobei jeder Pixel eine Größe von $6,7 \times 6,7 \mu\text{m}$ hat. Zudem stellen die Kameras einen Graustufenbereich von 12-bit dar. Dies entspricht 4096 unterschiedlichen Grauwerten und wird im Weiteren als Intensität bezeichnet. An beide Kameras wird das gleiche Normalobjektiv, ein Nikon AF Nikkor 50 mm 1:1,8D adaptiert. Die Blende wird bei allen Messungen auf $f/ = 1,8$ konstant gehalten, um einen geringen Bereich der Schärfentiefe bei hohem Lichteinlass zu gewährleisten. Die Brennweite des Objektivs beträgt 50 mm. Für die Synchronisation der Traverse, des Lasers und der Kameras sowie für Aufnahme und Verarbeitung der Bilder wird das Programm *DaVis-SizingMaster Shadow 7.2.1* der Firma LaVision angewendet.

Ergebnisse

Um Laserpulsschwankungen rauszufiltern, werden zu Beginn jeder Messung 30 Bilder ohne Messobjekt erstellt, die im Anschluss gemittelt zu einem Referenzbild zusammengefasst werden (Abb. 4 (a)). Folglich werden die Messobjekte in einem Bereich von -50 cm bis $+50 \text{ cm}$ in Richtung der Kamera auf der x-Achsen verfahren. Die Position 0 gibt die Fokusebene von Kamera 1 an. Der Messbereich wird in 101 Positionen eingeteilt, so dass bei jedem Zentimeter ein Rohbild des Messobjektes entsteht (Abb. 4 (b)). Zieht man das Rohbild von dem zugehörigen Referenzbild ab, entsteht das in Abb. 4 (c) zu sehende invertierte Bild. Durch die Invertierung werden Fehlerquellen durch Laserpulsschwankungen oder Rauschen minimiert. Dies ist besonders für die spätere Anwendung bei Tropfen im Mikrometerbereich wichtig.

Bedeutend für die Bestimmung von Position und Größe der Messobjekte ist nur die Bildzeile des größten Durchmessers, die in Abb. 4 (c) mit einer schwarzen Linie gekennzeichnet ist. Diese Bildzeile liefert den Intensitätsgradienten. Trägt man diese Bildzeile für jede der 101 Positionen des Messobjektes in einem Bild zusammengefasst auf, entstehen die in Abb. 5 gezeigten Gradientenbilder.

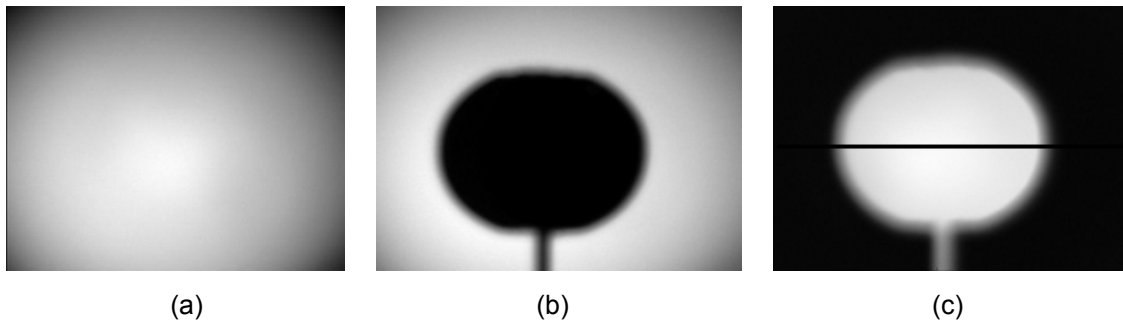


Abb. 4: Bild (a) zeigt ein typisches Referenzbild. In Bild (b) ist ein Rohbild von K1 bei einer Kamera 2-Position von +40 mm zu sehen. Die x-Achsenposition beträgt 0 mm. Bild (c) zeigt die Differenz von Referenzbild und Rohbild.

Abb. 5 (a) zeigt das Gradientenbild von K1 bei der feststehenden Kamera 1. Mit zunehmender Position erscheint die Kugel größer, was auf die Nähe des Messobjektes in Bezug auf die Kamera zurückzuführen ist. Dieser Effekt fällt bei späterer Anwendung im Bereich von Zweiphasenströmungen aufgrund der Größenordnung von Tropfen weg. Zu erkennen ist außerdem, dass bei Entfernung zur Fokusebene, die bei $x = 0$ mm liegt, der Bereich der Übergangsphase zwischen Objekt und Hintergrund zunehmend größer wird. Der Intensitätsgradient wird gleichermaßen kleiner und es entstehen die unscharfen Bereiche um den Objekt- rand.

Hingegen ist auf Bild (b) das Gradientenbild von Kamera 2 bei einer y-Position von +40 mm zu sehen. Deutlich wird daraus die Verschiebung der Fokusebene um 40 mm. Bei einer Objektposition von +50 mm ist hier der Abstand zwischen Objekt und Kamera am geringsten. Daher wird der größte Bereich des Bildausschnitts von K1 verdeckt, wobei der Unschärfe- grad in diesem Fall am größten ist.

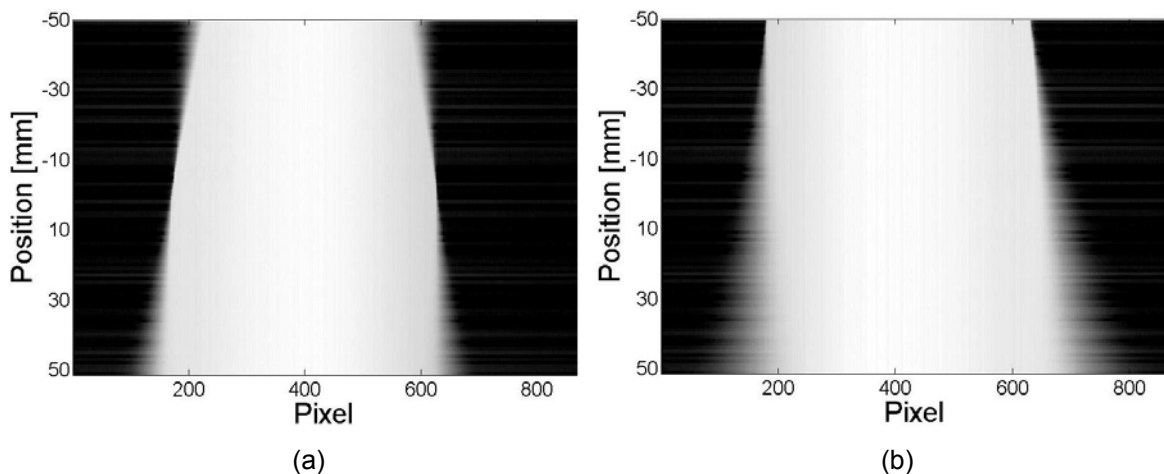


Abb. 5: Bild (a) zeigt das Gradientenbild von K1 in Abhängigkeit der Position für Kamera 1. In Bild (b) ist das Gradientenbild von Kamera 2 bei einer Kameraposition von +40 mm zu sehen.

Mit Hilfe des Intensitätsgradienten lässt sich die Größe des Messobjektes bestimmen. Hierfür wird für die gegebene Position der Intensitätsgradient über die gesamte Bildbreite aufgetragen (Abb. 6 (a)). Bei den Intensitäten von 1000 und 2000 ergeben die Schnittpunkte mit der Kurve die Punkte x_1 , x_2 , x_3 und x_4 (Abb. 6 (b)). Der Abstand von (x_4-x_1) gibt Auskunft über die Objektgröße. Hierfür muss vor den Messungen jedoch eine Kalibrierkurve erstellt werden, die alle in den Messungen vorkommenden Objektgrößen abdeckt. Abb.7 zeigt eine solche Kalibrierkurve, die von allen Messobjekten erstellt worden ist. Zu erkennen ist, dass der Ef-

fekt der größer werdenden Differenz von (x_4-x_1) mit Abnahme des Kugeldurchmessers kleiner wird. Für Größenordnungen im Bereich von Mikrometern wird diese Fehlerquelle keine Rolle mehr spielen.

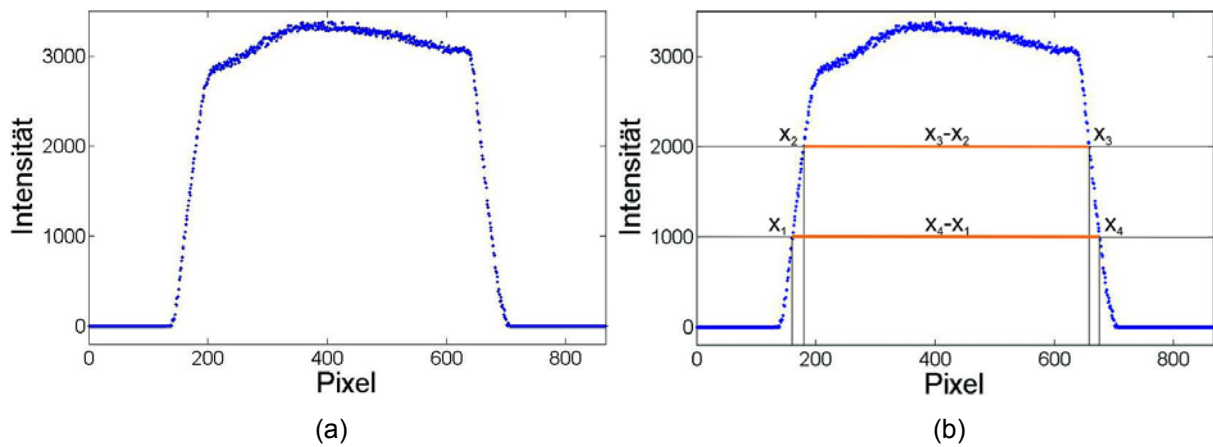


Abb. 6: Bild (a) zeigt den Intensitätsgradienten von K1 bei einer Kamera 2-Position von +40 mm. In (b) ist der Pixelabstand (x_3-x_2) bei einer Intensität von 1000 und (x_4-x_1) bei der Intensität von 2000 zu sehen. Anhand dieser Pixelabstände lässt sich die Steigung γ ermitteln.

Wird eine Messung durchgeführt, lässt sich anhand des Pixelabstandes von (x_4-x_1) der Objektdurchmesser aus der Kalibrierkurve ablesen. Liegt der gemessene Abstand zwischen zwei Kurven, befindet sich der Durchmesser des Messobjektes ebenfalls zwischen den kalibrierten Durchmessern.

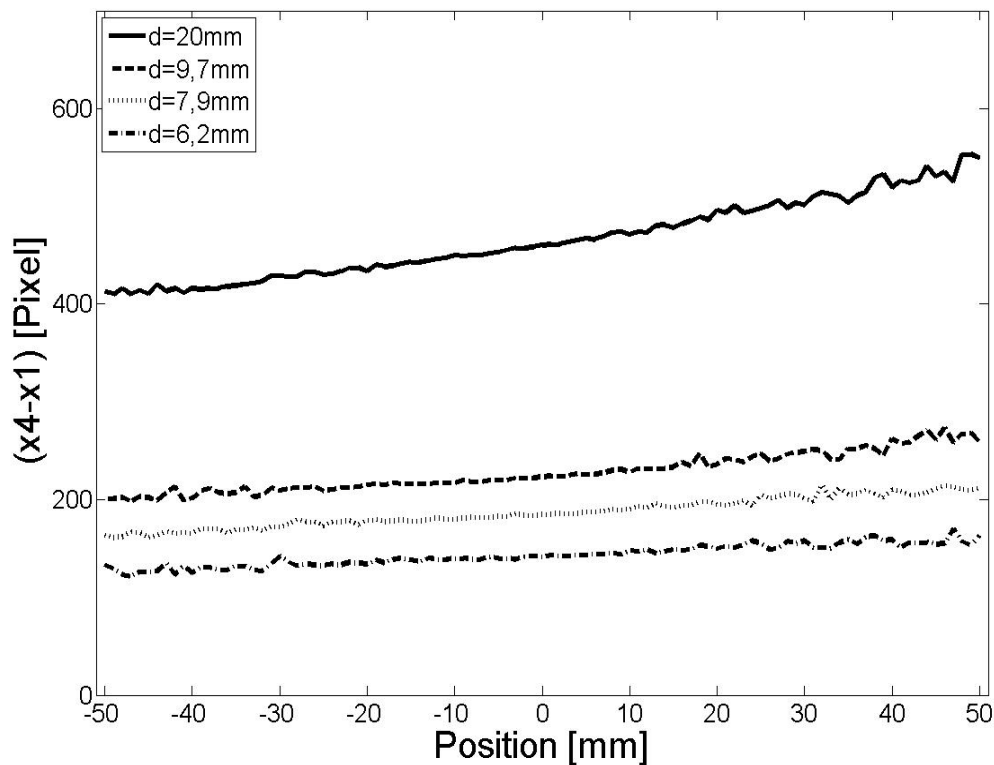


Abb. 7: Kalibrierkurve aller gemessenen Objektgrößen von Kamera 1 in Abhängigkeit von ihrer Position. Der Pixelabstand gibt die Größe des tatsächlichen Objektdurchmessers wieder.

Der Abstand des Messobjektes zur Fokusebene wird über die in (1) angegebene Differenz der Pixelabstände gebildet.

$$y = (x_4 - x_1) - (x_3 - x_2) \quad (1)$$

Hieraus lässt sich die Steigung des Intensitätsgradienten ermitteln. Abb. 8 zeigt y für alle Objektdurchmesser in Abhängigkeit der Position. Zu erkennen ist, dass die Kurven qualitativ den gleichen Verlauf haben. Dies lässt darauf schließen, dass die Steigung der Intensitätsgradienten unabhängig von der Objektgröße ist. Somit ist für den Bereich der gemessenen Objekte die Schärfentiefe unabhängig von dem Objektdurchmesser.

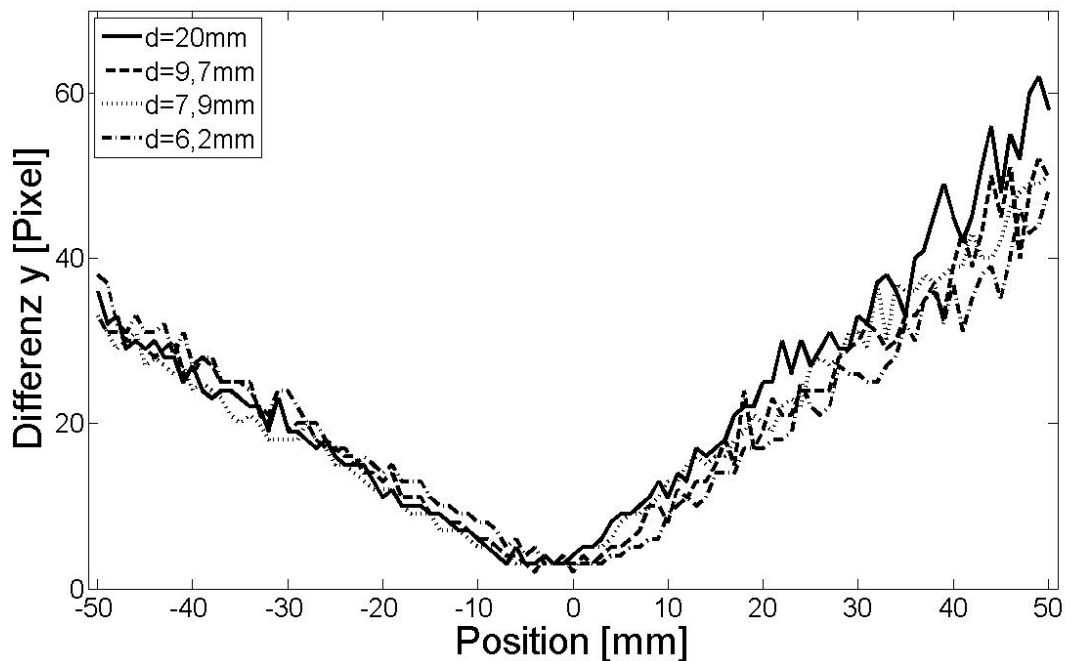


Abb. 8: Gradientenkorrelation von Kamera 1 in Abhängigkeit von der Position. Dargestellt ist $y = (x_4 - x_1) - (x_3 - x_2)$ über die Objektposition. Der Verlauf von y zeigt sich unabhängig vom Objektdurchmesser.

Es entstehen für einen gemessenen y -Wert zwei mögliche Positionen, an denen sich das Objekt befinden kann. Zur genauen Bestimmung der Position reicht die Gradientenkorrelation von Kamera 1 also nicht aus. Hierfür gibt die Gradientenkorrelation von Kamera 2 Aufschluss. Abb. 9 zeigt die schematische Darstellung beider Gradientenkorrelationen. Die gemessene Differenz y_1 von Kamera 1 schneidet die Kurve in zwei Punkten und zeigt daher die zwei möglichen Positionen p_1 und p_2 . Durch Ermittlung des Wertes y_2 von Kamera 2 entstehen zwei weitere Positionen p_3 und p_4 , an denen sich das Objekt befinden kann. Durch die Überlagerung eines Punktes der ersten Kurve p_2 mit einem Punkt der zweiten Kurve p_3 wird eine exakte Objektposition wiedergegeben. Tatsächlich jedoch entsteht ein Toleranzbereich, in dem sich das Messobjekt befindet. Das Messobjekt liegt zwischen den Punkten p_2 und p_3 .

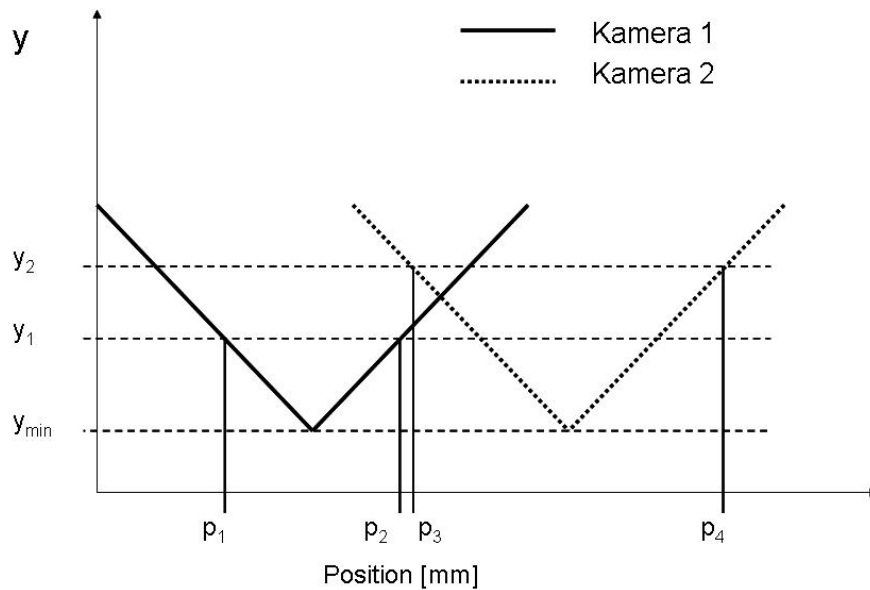


Abb. 9: Schematische Darstellung der Gradientenkorrelation beider Kameras. Dargestellt ist y über die Objektposition. Die Punkte p_2 und p_3 verdeutlichen, dass die Position des Messobjektes zwischen beiden Punkten liegt.

Schlussbemerkung

In der vorliegenden Arbeit wurden durch die Weiterentwicklung des Schattenverfahrens gekoppelte Daten über die Messobjektgröße und Messobjektposition bestimmt. Hierzu wurde das Messverfahren um eine zweite Kamera erweitert, die denselben Bildausschnitt mit einer variierbaren Entfernung zum Messobjekt aufnimmt. Im Anschluss sind Messungen von unterschiedlichen Objektgrößen bei sich variierender Position durchgeführt worden. Durch die Auftragung der Intensitäten in einem Bild über die Bildbreite kann der Pixelabstand gebildet werden, der auf die Objektgröße schließen lässt. Hierzu müssen zu Beginn Kalibrierkurven der zu erwartenden Objektgrößbereiche erstellt werden, aus denen sich dann mit Hilfe des Pixelabstandes der Durchmesser auslesen lässt. Durch die Gradientenkorrelationen beider Kameras, die ein Maß für die Steigung der Intensitätsgradienten sind, lassen sich genaue Aussagen über die Messobjektposition in dreidimensionaler Lage machen. So wird die Lage der Objekte im Verhältnis zur Fokusebene bestimmbar.

Im weiteren Schritt werden Untersuchungen im Größenbereich von Tropfen stattfinden, so dass genaue Aussagen über Tropfenabstände ermöglicht werden.

Dankesworte

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

Literatur

- Bachalo, W.D., Houser, M.J., 1984: "Development of the phase/doppler spray analyzer for liquid drop size and velocity characterizations", 20th AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference, Cincinnati, OH; United States
- Lefebvre, A. H., 1983: "Gas Turbine Combustion", Hemisphere Publishing Co., Washington, D.C.
- Damaschke, N. et al., 1998: "Response of Phase Doppler Anemometer systems to non-spherical droplets", Applied Optics, 37, pp. 1752-1761
- 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