

Phasen-Doppler-Profil-Sensor zur simultanen Bestimmung der Größe, Geschwindigkeit und Position von Tropfen

Phase Doppler profile sensor for simultaneous determination of droplet size, velocity and position

Martin Niehoff^{1,*}, Reinhold Kneer¹, Michael Dues², Adi Siswanto², Manuel Reddemann¹

¹Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

²ILA R&D GmbH, Jülich, Deutschland

Schlagworte: *Interferometrische Methoden, Strömungsmessverfahren, Profilsensorik, LDA, PDA, PDPS*

Zusammenfassung

Zur Charakterisierung von Grenzschichtströmungen mit dispergierten Tropfen werden unter anderem Informationen über deren Größe, Geschwindigkeit und exakte Position benötigt. In diesem Beitrag wird eine interferometrische Messtechnik vorgestellt, die in der Lage ist, diese drei Tropfeneigenschaften simultan zu ermitteln. Dieser Phasen-Doppler-Profil-Sensor (PDPS) kombiniert die Messprinzipien des Laser-Doppler-Profil-Sensors (LDA-PS) zur Geschwindigkeitsmessung und Positionsbestimmung innerhalb eines Messvolumens und der Phasen-Doppler-Technik zur Partikelgrößenbestimmung. Durch den Vergleich mit einer etablierten Messtechnik wird das Konzept des PDPS anhand eines kontrollierten Anwendungsfalls einer monodispersen Tropfenkette erfolgreich demonstriert. Die aktuelle PDPS Variante erzielt eine durchschnittliche relative Abweichung im Vergleich zur Referenztechnik von 1,14 % (Durchmesser), 2,18 % (Position) und 0,4 % (Geschwindigkeit). Dabei nutzt die aktuelle PDPS Variante einen herkömmlichen Phasen-Doppler-Sensor als Empfangseinheit, der das Messvolumen durch eine verbaute Lochblende beschneidet. Zukünftig besteht weiteres Optimierungspotential u.a. durch Entfernung dieser Blende.

Einleitung

Technische Tropfenströmungen, bei denen die Größe und die Geschwindigkeit eine Funktion der Position sind, finden sich in zahlreichen Anwendungen, wie u.a. im Bereich der Zerstäubungs- und Prallstrahltechnik. Eine in diesem Zusammenhang bedeutende technische Anwendung ist die Sprühkühlung von elektrischen Hochleistungskomponenten (Xu et al., 2022), bei der sich eine Grenzschicht über der zu kühlenden Oberfläche bildet. Die sich darin bewegenden Tropfen ändern ihre Charakteristik in Abhängigkeit der Distanz von der Oberfläche (Asgari & Amani, 2021; Arcoumanis & Chang, 1994).

Bislang werden diese drei o.g. Tropfenparameter üblicherweise durch den Einsatz komplementärer Messsysteme bestimmt, die sowohl auf bildgebenden als auch auf interferometrischen Verfahren basieren. So ermöglicht die Schattenwurftechnik (Hofeldt & Hanson, 1991; Bongiovanni et al., 1997), die Messung von Tropfendurchmesser und -position. Wenn zusätzlich mindestens zwei aufeinanderfolgende Bilder zur Verfügung stehen, sind Geschwindigkeitsmessungen möglich, entweder durch Verfolgung der Strukturen (Particle Tracking Velocimetry, PTV) oder durch Kreuzkorrelation von Bildbereichen (Particle Image Velocimetry, PIV).

Mit Bildaufnahmetechniken geht jedoch ein hoher Bedarf an Computerspeicher und Rechenleistung für die Bildnachbearbeitung einher (Kumara et al., 2010). Darüber hinaus muss aufgrund der Abbildung auf einen CCD-Kamerasensor mit begrenzter Pixelauflösung stets ein Kompromiss zwischen hoher räumlicher Auflösung und hohem Sichtfeld eingegangen werden.

Ein interferometrisches Verfahren, das in der Lage ist, die Geschwindigkeit und die exakte Position entlang einer Messlinie innerhalb des Messvolumens zu ermitteln und somit das Traversieren des optischen Aufbaus überflüssig macht, ist der Laser-Doppler-Velocimetry-Profil-Sensor (LDV-PS), siehe Czarske (2001, 2002). Mit dem LDV-PS kann jedoch der Tropfendurchmesser nicht ermittelt werden.

Eine etablierte Technik zur Bestimmung des Durchmessers und der Geschwindigkeit von Tropfen ist der von Durst und Zaré (1975) zuerst beobachtete Zusammenhang der Phasen-Doppler-Technik. Hierauf aufbauend wurden 1981 von Flögel (1981), sowie 1984 von Bauckhage und Flögel (1984), Saffman et al. (1984) und Bachalo und Houser (1984) Messsysteme mit der Phasen-Doppler-Technik entwickelt. Messsysteme mit der Phasen-Doppler-Technik liefern eine hohe räumliche Auflösung, eine schnelle dynamische Reaktion, und einen weiten Geschwindigkeitsmessbereich, so dass auch Umkehrströmungen erkannt werden können (Kumara et al., 2010). Eine hohe örtliche Auflösung wird erreicht, indem das Messvolumen mit einer im Phasen-Doppler-Sensor verbauten Schlitzapertur beschränkt und dadurch definiert wird. Um dennoch einen großen räumlichen Bereich zu charakterisieren, ist eine Traversierung des gesamten optischen Aufbaus unumgänglich.

Bislang werden deshalb – bei Verwendung von interferometrischen Laser-Doppler-Techniken – die Tropfeneigenschaften Größe, Geschwindigkeit und die exakte Position entlang einer Messlinie im Messvolumen mit mindestens zwei separaten Systemen bestimmt. Die Verwendung dieser separaten Systeme in einer komplementären Messung erschwert jedoch die Identifizierung möglicher physikalischer Zusammenhänge der Tropfenparameter.

Ein Messsystem, das diese drei Tropfenparameter gleichzeitig und ohne Traversierung des gesamten optischen Aufbaus bestimmen kann, wäre von großem Vorteil und hilfreich, um die Dynamik von dispergierten Grenzschichtströmungen umfassend zu charakterisieren. Aus diesem Grund wurde ein laseroptisches und damit berührungsloses Messgerät entwickelt, der Phasen-Doppler-Profil-Sensor (abgekürzt PDPS). Das Messprinzip des PDPS wird im folgenden Abschnitt vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Messtechnik mit einem etablierten bildgebenden Verfahren

Messtechnik: Phasen-Doppler-Profil-Sensor

Der Phasen-Doppler-Profil-Sensor (PDPS) kombiniert die Messprinzipien des Laser-Doppler-Profil-Sensors (LDA-PS) zur Geschwindigkeitsmessung entlang einer Messlinie (Czarske, 2001; Czarske et al., 2002) mit der Phasen-Doppler-Technik zur Partikelgrößenbestimmung (Durst und Zaré, 1975; Flögel, 1981; Bauckhage und Flögel, 1984; Saffman et al., 1984 und Bachalo und Houser, 1984).

In Abb. 1 ist der Messaufbau vom PDPS schematisch dargestellt. Wichtige Komponenten sind dabei zum einen auf der rechten Seite der Laserstrahlemittler, der bereits vom LDV-PS bekannt ist, zum anderen auf der linken Seite der Phasen-Doppler Sensor.

Beim LDV-PS werden zwei Messvolumen $MV1$ und $MV2$ mit jeweils unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und λ_2 in einer Ebene überlagert. $MV1$ mit der Wellenlänge λ_1 weist über die Messvolumenlänge divergierende Interferenzstreifenabstände¹ $\delta_1(z)$ auf, $MV2$ mit der Wellenlänge λ_2 konvergierende Interferenzstreifenabstände $\delta_2(z)$. Divergierende oder

¹ Das Interferenzstreifenmodell ist ein vereinfachtes und anschauliches Modell

konvergierende Interferenzstreifenabstände werden durch gezieltes Dejustieren der Strahltaillenposition z_{th} erzeugt. Dabei wird die Strahltaillenposition der zwei sich kreuzenden Strahlen entweder vor oder hinter den Schnittpunkt der Laserstrahlen fokussiert. Ein Tropfen, der sich mit der Geschwindigkeit v durch die Messvolumina bewegt, streut die lokale Intensität der beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 mit der Doppler-Frequenz $f_1(z)$ und $f_2(z)$. Mit Hilfe des Quotienten $q(z) = f_1(z)/f_2(z) = \delta_2(z)/\delta_1(z)$ kann die z -Position ermittelt werden. Eine notwendige Bedingung ist jedoch ein monotonen Verhalten des Quotienten $q(z)$, um Mehrdeutigkeiten bei der Positionsbestimmung zu vermeiden. Darüber hinaus kann aus dem lokalen Interferenzstreifenabstand¹ und der gemessenen Frequenz die Geschwindigkeit mit $v = f_1(v, z) \cdot \delta_1(z)$ ermittelt werden.

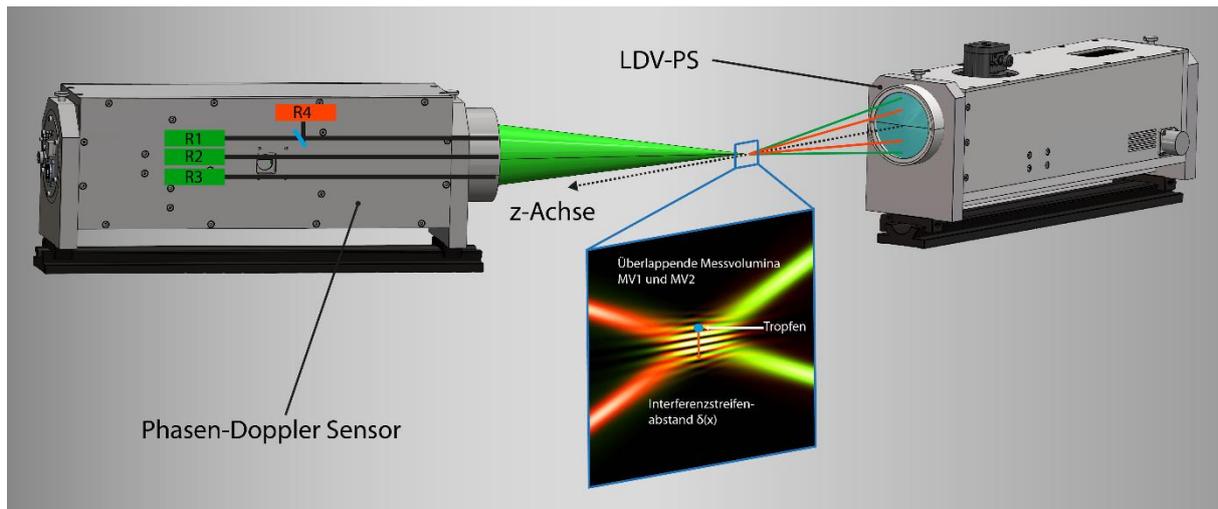


Abb. 1: Prinzip der PDPS-Technik: Es wird ein konvergierendes und divergierendes Interferenzstreifensystem erzeugt. Aus Darstellungsgründen entsprechen die dargestellten Wellenlängen nicht den tatsächlich bei den Messungen verwendeten Wellenlängen. Außerdem wurden hier sowohl das Seitenverhältnis des Messvolumens als auch der Schnittwinkel so gewählt, dass das Prinzip besser verdeutlicht wird. In dieser Abbildung liegen beide Interferenzstreifensysteme übereinander. Beim roten Licht liegen die Strahltaillen links vom Messvolumen und die Interferenzstreifenabstände konvergieren. Beim grünen Licht ist dies genau umgekehrt. Tropfen, die sich durch diese Messvolumina bewegen, streuen das Laserlicht mit der entsprechenden Wellenlänge zum Phasen-Doppler-Sensor. Im Anschluss an die Segmente R1-R4 mit unterschiedlichen Elevationswinkeln wird das gestreute Licht von Photomultipliern empfangen und die Signale entsprechend ihrer Phasendifferenz und Frequenz verarbeitet.

Für die Messung der Tropfengröße wird der LDV-PS um die konventionelle Phasen-Doppler-Technik erweitert. Bei dieser Technik wird ein Phasen-Doppler-Sensor so positioniert, dass empfangenes gestreutes Licht einer Brechungsordnung eine deutlich höhere Amplitude als andere Brechungsordnungen aufweist. Auf diese Weise ist die gemessene Phasendifferenz von einem durch das Messvolumen bewegten Tropfen zwischen zwei Detektoren proportional zum Tropfendurchmesser (siehe Abb. 1: Phasen-Doppler-Sensor auf der linken Seite). Unter Zuhilfenahme der Theorie der geometrischen Optik lässt sich folgender einfacher linearer Zusammenhang zwischen der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ und dem Tropfendurchmesser d_d herleiten: $\Delta\Phi = \beta \cdot d_d$ mit dem geometrischen Konversionsfaktor β , in den alle aufbauspezifischen Winkel und Parameter eingehen. Mehr Informationen zur Phasen-Doppler-Technik kann Albrecht et al. (2002) entnommen werden.

Der Phasen-Doppler-Sensor misst mit 3 Photomultipliern R1-R3 gestreutes Licht der Wellenlänge λ_1 und mit einem vierten Photomultiplier R4 das gestreute Licht der zweiten Wellenlänge λ_2 (siehe Abb. 1).

Experimenteller Aufbau der Vergleichsmessung

Um das Messkonzept des PDPS zu demonstrieren, werden die Größe, die Position und die Geschwindigkeit definierter Tropfen ermittelt und mit simultanen Referenzmessungen verglichen. Der Aufbau dieser Referenzmessungen ist in Abb. 2 dargestellt. Als Referenzmesstechnik wird ein Fernfeld-Highspeed Mikroskop (FHM) verwendet.

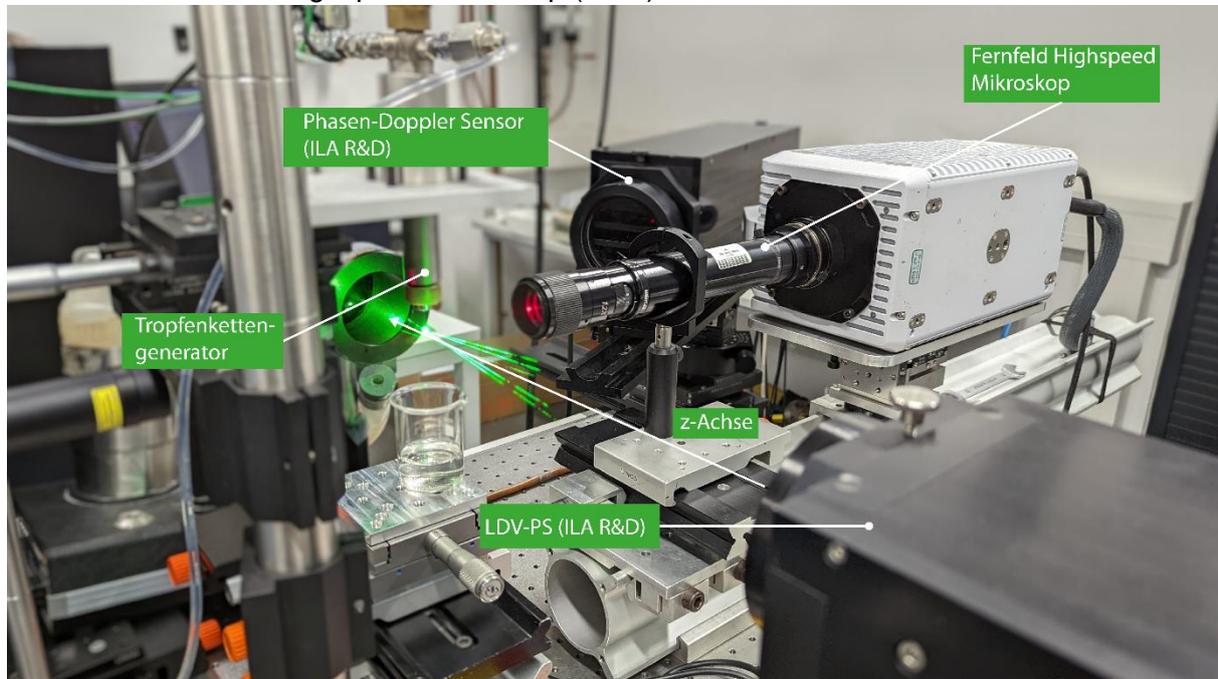


Abb. 2: Optischer Aufbau zum Vergleich des PDPS mit dem etablierten FHM. Hauptkomponenten des PDPS sind ein geeigneter Laser und ein konventioneller Phasen-Doppler-Sensor. Beide Techniken messen Tropfen, die von einem monodispersen Tropfenkettengenerator erzeugt werden.

Für eine verlässliche Messung werden Tropfen benötigt, die über eine Messzeit von 0,5 s eine stabile Tropfengröße, Position und Geschwindigkeit aufweisen. Aus diesem Grund werden monodisperse Ethanoltröpfchen mit Hilfe eines piezoelektrischen Tropfenkettengenerators erzeugt. Die Tropfenkette kann entlang der z-Achse verschoben werden.

Um unterschiedliche Tropfengrößen zu ermöglichen, kann der Pinhole-Durchmesser d_{DG} sowie die Frequenz f_{DG} des Tropfenkettengenerators entsprechend variiert werden. Bei dem Tropfenkettengenerator wird weiterhin angenommen, dass nach jeder Periode $T_{DG} = 1 / f_{DG}$ ein Tropfen abtropft und im freien Fall durch das Messvolumen des PDPS fällt.

Für die FHM Messungen wird ein Hochgeschwindigkeitskamarasystem (Photron Fastcam SA-X) mit einer Bildrate von 40 000 fps und einer Auflösung von 736 px x 256 px verwendet. Die Hochgeschwindigkeitskamera ist mit einem hochvergrößernden Navitar-Zoomobjektiv kombiniert. Die für FHM Messungen verwendete Objektebene ist definiert als die Ebene, die von den vier einfallenden Laserstrahlen des PDPS aufgespannt wird. Der Abbildungsmaßstab beträgt 700 px/mm, was einer Vergrößerung von $M = 14$ entspricht. Daraus ergibt sich ein sichtbarer Bereich auf der z-Achse von 1050 μm und eine Schärfentiefe von 50 μm . Als Lichtquelle wird die Cavitar Cavilux Smart mit niedrigem Kohärenzgrad verwendet, die nahezu monochromatische Laserpulse bei einer mittleren Wellenlänge von $\lambda = 640 \text{ nm}$ mit einer Pulsdauer von $t_{Puls} = 10 \text{ ns}$ bereitstellt.

Beim FHM hängt die Zuverlässigkeit der Geschwindigkeits-, Durchmesser- und Positionsmessungen von der Fähigkeit der Bildverarbeitung ab, den Rand des Tropfens entlang der Pixelreihen zu lokalisieren, sowie von Messfehlern der Maßstababbildung. Aufgrund der Breite der Rasterlinien des Gittertestbilds und Maßstabs von ca. 5 px ist ein potenziell fehlerhaftes Ablesen von $\pm 5 \text{ px}$ erwartbar, was zu einem Maßstabmessfehler von $\pm 0,712 \%$ bei einer

Maßstabslänge von 1000 μm führt. Bei der untersuchten Tropfengröße $d_d > 60 \mu\text{m}$ ist die relative Größe des projizierten Bildes im Verhältnis zur Pixelgröße mit einem durchschnittlichen Fehler von weniger als 0,5 % unempfindlich gegenüber Projektionen des Tropfenzentrums auf die Mitte oder den Eckpunkt eines Pixels.

Dieser Fehler schließt Unvollkommenheiten ein, die auf den Bildverarbeitungsalgorithmus zurückzuführen sind. Im Zuge dieses Bildverarbeitungsalgorithmus wird zunächst für jedes Bild ein adaptiver Schwellenwert nach Bradley & Roth (2007) berechnet, der auf dem lokalen Mittelwert der Intensität in der Umgebung des betreffenden Pixels beruht. Anschließend wird jedes Bild mit der erwähnten Schwellenwertmethode binarisiert und der Durchmesser mit der folgenden Gleichung approximiert:

$$d_d = \sqrt{4 \cdot \sum P / \pi} \cdot s^{-1}$$

mit dem Maßstab s und der Summe aller Pixel P in der gefragten Region. Folglich basiert die Tropfengrößenberechnung auf der Projektion eines dreidimensionalen Körpers in die Bildebene. Da in diesem Zusammenhang angenommen werden muss, dass die Tropfen zu jedem Zeitpunkt kugelförmig sind, können etwaige Oszillationen des Tropfens zu weiteren Fehlern führen. Das Ausmaß dieser Fehlerquelle wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

Beim PDPS werden die Signale der vier Photomultiplier mittels eines Spectrum Instrumentation *14 bit digitizers (M4i.4451-x8)* und einer Samplingrate von 500 MHz für 0,5 s pro Messung aufgenommen. Die Signale werden zunächst gespeichert und im Nachhinein ausgewertet. Durch diese lückenlose Aufnahme wird ein aussagekräftiger Vergleich mit den Referenzmessungen des FHM ermöglicht, die zeitgleich für 0,5 s durchgeführt werden. Bei einer Messzeit von 0,5 s stellt der Tropfenkettengenerator ca. 15 500 erfassbare Tropfen bereit. In Zusammenhang des PDPS ruft jeder einzelne Tropfen, der sich durch das Messvolumen bewegt, ein Burst-Signal mit einer spezifischen Phase und Doppler-Frequenz hervor. Die Phase und Frequenz dieser Bursts werden mit Hilfe der Fast Fourier Transformation ermittelt. Dieses Vorgehen wird in Nobach (2001) ausführlich beschrieben und wurde für diese Messungen in der Softwareumgebung von *Matlab* (Mathwork) implementiert. Die gespeicherten Signale werden mit einem Bandpassfilter von 30 MHz bis 50 MHz und bezüglich eines minimalen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses von 4 dB gefiltert. Weiterhin werden die Signale bezüglich eines Phasendifferenzfehlers, der bei Phasen-Doppler-Messungen mit drei Detektoren üblicherweise toleriert wird, gefiltert. In diesen PDPS-Messungen wird ein Phasendifferenzfehler von 20° toleriert, was einem absoluten Größenfehler von $\pm 3.4 \mu\text{m}$ entspricht. Weitere Informationen zum tolerierten Phasendifferenzfehler können Albrecht et al. (2002) entnommen werden.

Der vorgestellte Aufbau ermöglicht keinen Vergleich der absoluten Tropfenposition. Diese Einschränkung hat ihre Ursache im fehlenden absoluten Bezugspunkt beider Messverfahren. Aus diesem Grund kann mit diesen Messungen lediglich die Verschiebung der Tropfenkettenposition mit den jeweiligen Systemen gemessen werden. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass sowohl PDPS als auch die Referenztechnik eine übereinstimmende Verschiebung messen.

Um beide Systeme in einem gemeinsamen z-Koordinatensystem darzustellen, wird ein Offset z_0 von den gemessenen Positionen der Referenztechnik z_{FHM} subtrahiert. Der hierfür verwendete Off-set-Wert von $z_0 = 1056 \mu\text{m}$ ergibt sich aus dem Ordinatenschnittpunkt einer linearen Regression bei der die gemessenen z-Positionen vom PDPS der Referenztechnik gegenübergestellt werden.

Weiterhin hängt die mit dem PDPS erreichbare Genauigkeit der Tropfenposition, -geschwindigkeit und -größe von der Qualität der gemessenen Signale ab. Die Signalqualität kann sich verschlechtern, wenn das gestreute Licht der Tropfenkette im Phasen-Doppler-Sensor blockiert oder einzelne Glarepoints verdeckt werden. Dieser sogenannte Schlitzeffekt wird ausführlich in Albrecht et al. (2002) beschrieben. In dieser ersten Version des PDPS wird ein herkömmlicher Phasen-Doppler-Sensor mit einer eingebauten Lochblenden-Apertur verwendet.

Diese Lochblenden-Apertur verhindert, dass ungewollte Reflexionen oder Streulicht auf die Photomultiplier treffen und diese beschädigen. Allerdings fördert diese Blende das unerwünschte Auftreten des Schlitzeffekts für ausgewählte Tropfenpositionen. Um diese Problematik zu umgehen, wird der Phasen-Doppler-Sensor parallel zur z-Achse mit der Tropfenkette verschoben. In zukünftigen Arbeiten sollen Messungen ohne Lochblenden-Apertur realisiert werden und auf diese Weise mögliche negative Schlitzeffekte umgangen werden.

Ergebnisse

Im Folgenden werden Vergleichsmessungen des PDPS und der Referenzmesstechnik vorgestellt. Beide Messtechniken sollen die Tropfengröße, -geschwindigkeit und -position eines Tropfenensembles für 0,5 s messen. Hierfür wird die Tropfenkette an unterschiedliche z-Positionen verschoben, des Weiteren wird die Tropfengröße variiert, so dass 24 unterschiedliche Messungen (nachfolgend durchnummeriert von M1 bis M 24) vorliegen.

In Abb. 3 sind für einige ausgewählte Stichproben die gemessenen Positionsverteilungen des identischen Tropfenensembles sowohl für PDPS als auch FHM gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Verteilung der Referenztechnik schmalbandiger ist und die vom PDPS erfassten Positionen gaußförmig verteilt sind, was die Bildung von repräsentativen Mittelwerten im Folgenden rechtfertigt.

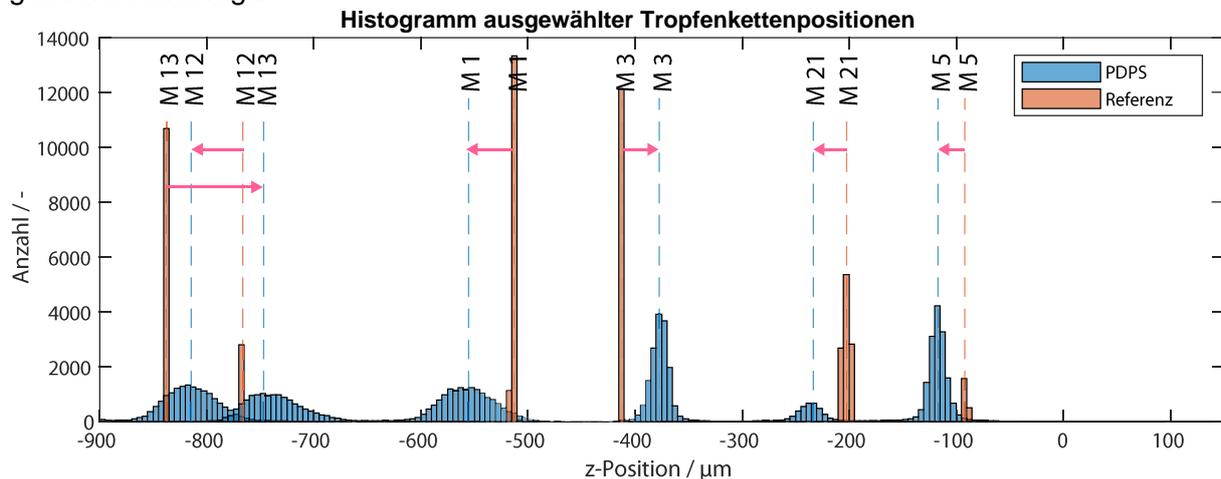


Abb. 3: Gegenüberstellung der Tropfenpositionsverteilung von dem PDPS und der FHM als Referenz von beispielhaften Messungen 1, 3, 5, 12, 13 und 21. Die gestrichelten Linien stellen die jeweiligen Mittelwerte der Verteilungen dar.

In Abbildung 4 sind die Mittelwerte der relativen Abweichungen zwischen PDPS und FHM als Funktion der mit dem PDPS gemessenen z-Position dargestellt. Die relativen Abweichungen der Position, Größe und Geschwindigkeit werden über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$\Delta_z = \frac{z_{PDPS} - (z_{FHM} - z_0)}{l_{MV}} \quad \Delta_d = \frac{d_{PDPS} - d_{FHM}}{d_{FHM}} \quad \Delta_v = \frac{v_{PDPS} - v_{FHM}}{v_{FHM}}$$

mit der Messvolumenlänge l_{MV} . Darüber hinaus wird jeweils eine mittlere absolute Abweichung der Position, Größe und Geschwindigkeit berechnet, um die aktuelle Leistungsfähigkeit des PDPS über einen zusammenfassenden Kennwert zu beschreiben. Die mittlere absolute Abweichung der Tropfenposition wird über Gleichung $|\bar{\Delta}_z| = \sum_{i=1}^{n=24} |\Delta_z| / 24$ berechnet.

In Abb. 4a wurde der Tropfenstrom offensichtlich in der linken Hälfte des PDPS-Messvolumens positioniert (Abszisse reicht von -900 µm bis 100 µm), das eine Messvolumenlänge von $l_{MV} = 2,376 \text{ mm}$ mit möglichen z-Positionen zwischen -1,2 mm und 1,176 mm hat. Im Gegensatz dazu ist der sichtbare Bereich des FHM dagegen auf 1050 µm begrenzt. Die für den Vergleich zur Verfügung stehende Länge wird somit durch das FHM und nicht durch das PDPS begrenzt.

Bei Betrachtung der Tropfenposition in Abb. 4a beträgt die mit dem PDPS gemessene mittlere relative Abweichung im Vergleich zum FHM als Referenz $|\overline{\Delta_z}| = 2,18\%$, was einer durchschnittlichen absoluten Positionsabweichung von $52 \mu\text{m}$ bei einer Messvolumenlänge von $2,376 \text{ mm}$ entspricht. Einzelne relative Positionsabweichungen, die in Abb. 4a als Punkte dargestellt sind, können bis zu $5,9 \%$ betragen.

Die vertikalen Fehlerbalken in Abb. 4a entsprechen den relativen Standardabweichungen (SD) bei der Messung der z-Position mit dem PDPS. Die mittlere relative SD beträgt $1,18 \%$, die maximal beobachtete relative SD beträgt $3,98 \%$. Die absolute SD des PDPS (mit $\bar{\sigma}_z = 28 \mu\text{m}$ im Durchschnitt, maximal $\sigma_{z,max} = 94 \mu\text{m}$) ist im Vergleich zu denen vom FHM (mit $\bar{\sigma}_z = 2 \mu\text{m}$ im Durchschnitt, maximal $\sigma_{z,max} = 9 \mu\text{m}$) erhöht.

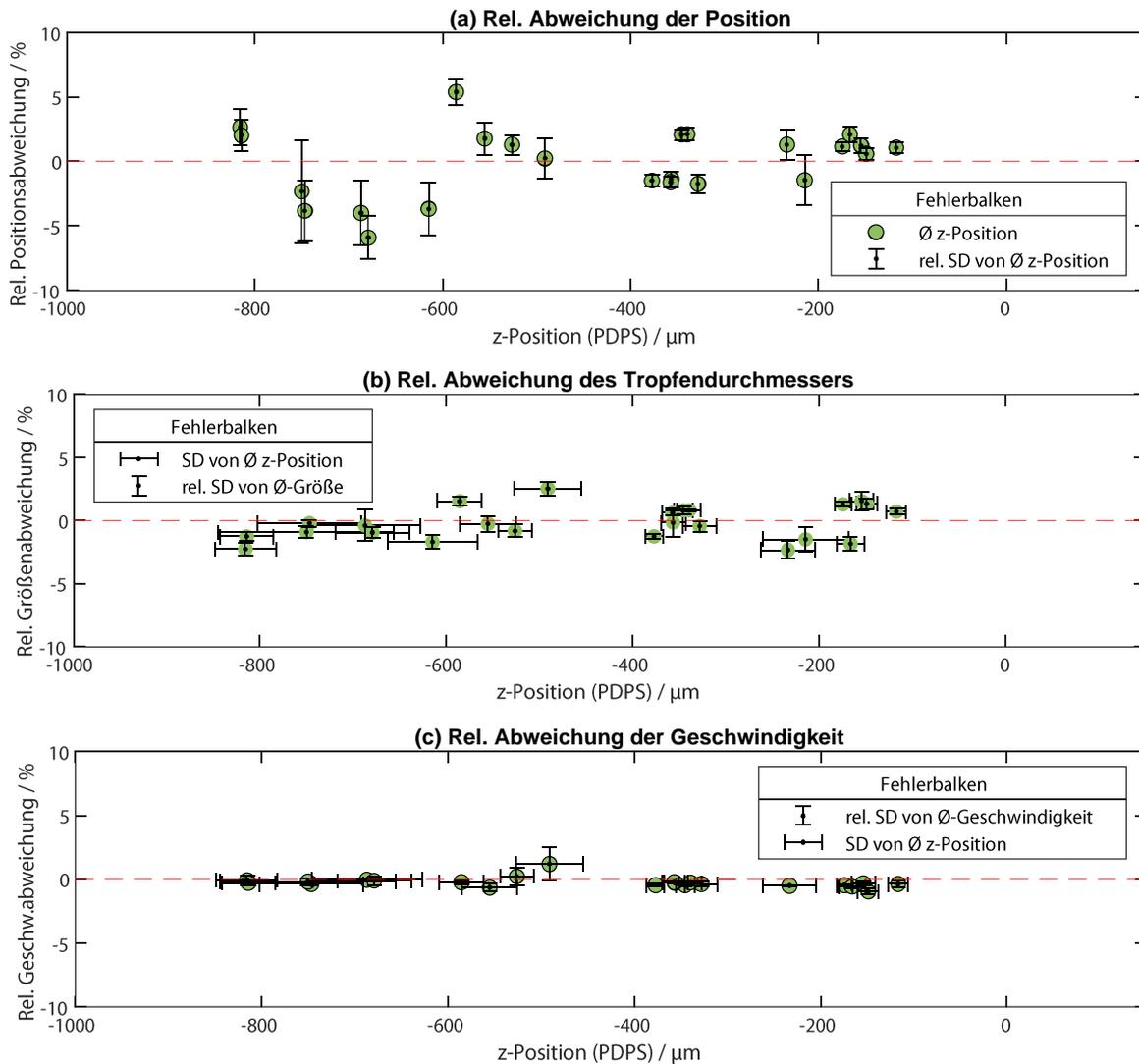


Abb. 4: Die relative Abweichung von PDPS zu FHM bei der gleichzeitigen Messung von Position (a), Größe (b) und Geschwindigkeit (c) wird in Abhängigkeit von der mit PDPS gemessenen mittleren z-Position dargestellt. Die rot gestrichelte Linie stellt die Linie der Nullabweichung dar.

Hinsichtlich der Tropfengröße beträgt die mittlere relative Abweichung von PDPS und FHM $|\overline{\Delta_d}| = 1,14 \%$, was bei Tropfen im Größenbereich von $62 \mu\text{m}$ bis $74 \mu\text{m}$ einer durchschnittlichen absoluten Größenabweichung von ca. $0,8 \mu\text{m}$ entspricht. Einzelne relative Größenabweichungen, die in Abb. 4b als Punkte dargestellt sind, können bis zu $2,53 \%$ ($\Delta d_d = 1,7 \mu\text{m}$) betragen. Bei der PDPS-Messung können systematische Fehler aufgrund von Ausrichtungsfehlern, einem vom Benutzer gewählten inkorrekten Brechungsindexwert, Phasentoleranzen

zur Filterung nicht sphärischer Tröpfchen oder einem positionsabhängigen Gaußschen Phasenfehler auftreten. Eine eindeutige positionsabhängige Überlagerung dieser Größenfehler ist in den Daten nicht zu beobachten.

Die vertikalen Standardabweichungen der mittleren Tropfendurchmesser vom PDPS und FHM in Abb. 4b liegen in der gleichen Größenordnung. Im Durchschnitt erreicht der PDPS eine SD der Durchmesserbestimmung mit $\bar{\sigma}_d = 0,35 \mu\text{m}$ oder 0,5 % bezogen auf den jeweiligen mit dem FHM gemessenen Durchmesser als Referenzwert. Da bei der Anwendung des Tropfengenerators eine reproduzierbare Tropfengröße erwartet wird, kann jede Abweichung in der Tropfengröße auf Fehler der jeweiligen Messtechnik zurückgeführt werden, die z. B. durch Bild-zu-Bild-Variationen der Beleuchtung oder durch eine senkrecht zur Objektebene schwingende Tropfenkette verursacht werden können. Ferner ist zu beachten, dass der Auswertalgorithmus der FHM Messungen Schwierigkeiten hat, die korrekte Größe von unscharfen Tropfen zu bestimmen, da der Tropfenrand ungenau lokalisiert wird. Im Falle des PDPS würden derartige Tropfen sich entweder außerhalb des Messvolumens bewegen oder das Licht des Messvolumens nur teilweise streuen, was zu fehlerhaften Tropfengrößen führen würde.

Bei der Bestimmung der Tropfengeschwindigkeit beträgt die mittlere relative Abweichung des PDPS $|\bar{\Delta}_v| = 0,4 \%$. Die Geschwindigkeit liegt im Bereich von $6,3 \text{ ms}^{-1}$ bis $9,9 \text{ ms}^{-1}$ mit einer SD im Bereich von $0,0041 \text{ ms}^{-1}$ bis $0,0964 \text{ ms}^{-1}$. Einzelne relative Abweichungen der Geschwindigkeit, die in Abb. 4c als Punkte dargestellt sind, können bis zu 1,2 % betragen.

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine umfassende Charakterisierung von dispersen Strukturen innerhalb von Strömungen sind gleichzeitige Kenntnisse über deren Größe, Geschwindigkeit und Position von Vorteil. In diesem Beitrag wird eine geeignete interferometrische Messtechnik vorgestellt, die in der Lage ist, die drei Tropfeneigenschaften simultan zu ermitteln. Diese neue Messtechnik, die Phasen-Doppler-Profil-Sensor (PDPS) genannt wird, kombiniert die Messprinzipien des Laser-Doppler-Profil-Sensors (LDA-PS) zur Geschwindigkeitsmessung entlang einer Messlinie im Messvolumen mit der Phasen-Doppler-Technik zur Partikelgrößenbestimmung. In diesem Beitrag wird durch den Vergleich mit einer etablierten Messtechnik das Konzept von PDPS anhand eines kontrollierten Anwendungsfalls einer monodispersen Tropfenkette erfolgreich demonstriert. In dem durchgeführten Vergleich wurden 24 Messungen des Tropfenstroms mit einem Durchmesserbereich von $62 \mu\text{m}$ bis $74 \mu\text{m}$ und verschiedenen Positionen durchgeführt. Im Durchschnitt beträgt die relative Abweichung der mit PDPS gemessenen Tropfendurchmesser im Vergleich zu einem Fernfeld-Highspeed Mikroskop (FHM) als Referenz 1,14 % mit einer durchschnittlichen Unsicherheit von 0,5 %. Betrachtet man die Tropfenposition, so beträgt die mittlere relative Abweichung, gemessen mit dem PDPS im Vergleich zum FHM als Referenz 2,18 % mit einer durchschnittlichen Unsicherheit von 1,18 %. Die relative Abweichung und die relative Unsicherheit werden in Bezugnahme auf die Messvolumenlänge von 2,376 mm ermittelt. Die Geschwindigkeit des Tropfenstroms wird mit einer mittleren relativen Abweichung von 0,4 % bestimmt, wobei die einzelnen relativen Geschwindigkeitsabweichungen unter 1,2 % in einem Geschwindigkeitsbereich von etwa $6,3 \text{ ms}^{-1}$ bis $9,9 \text{ ms}^{-1}$ liegen. Auch hier werden die relative Abweichung und die Unsicherheit in Bezug zu FHM Messungen referenziert.

Potential zur weiteren Erhöhung der Messgenauigkeit in der Zukunft liegt in einer Entfernung der Lochblende im Phasen-Doppler-Sensor. Der Grund hierfür liegt in der Annahme, dass die Lochblende bei einigen der durchgeführten Messungen den Schlitzeffekt verursacht oder das empfangene Streulicht und die Signalqualität stört. Darüber hinaus wird der PDPS in zukünftigen Messungen an anspruchsvolleren und praxisnahen Testfällen mit einem relevanten Bereich von Tropfengrößen und hohen Geschwindigkeitsgradienten, wie sie typischerweise in Sprühanwendungen vorkommen, angewandt.

Dankesworte

Dieses Projekt (16KN042152) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- Albrecht, H. E., Damaschke, N., Borys, M., & Tropea, C. (2002).** Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Springer Science & Business Media.
- Arcoumanis, C., & Chang, J. C. (1994).** Flow and heat transfer characteristics of impinging transient diesel sprays. SAE transactions, 1092-1116.
- Asgari, B., & Amani, E. (2021).** An improved spray-wall interaction model for Eulerian-Lagrangian simulation of liquid sprays. International Journal of Multiphase Flow, 134, 103487.
- Bachalo, W. D., & Houser, M. J. (1984).** Phase/Doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions. Optical Engineering, 23(5), 235583.
- Bauckhage, K., & Flögel, H. H. H. (1985).** Simultaneous measurement of droplet size and velocity in nozzle sprays. In 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics (pp. 18-1).
- Bauckhage, K., & Flögel, H. H. (1984, July).** Simultaneous measurement of droplet size and velocity in nozzle sprays. 2nd Intl. In Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon. Paper (Vol. 18).
- Bongiovanni, C., Chevallier, J. P., & Fabre, J. (1997).** Sizing of bubbles by incoherent imaging: defocus bias. Experiments in fluids, 23(3), 209-216.
- Bradley, D., & Roth, G. (2007).** Adaptive thresholding using the integral image. Journal of graphics tools, 12(2), 13-21.
- Czarske, J. (2001).** Laser Doppler velocity profile sensor using a chromatic coding. Measurement Science and Technology, 12(1), 52.
- Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., & Müller, H. (2002).** Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution. Measurement Science and Technology, 13(12), 1979.
- Durst, F., & Zaré, M. (1975).** Laser Doppler measurement in two-phase flows, proc. of the LDA Symp. Copenhagen, Tonsbakken, 16-18.
- Flögel, H. H. (1981).** Untersuchung von Teilchengeschwindigkeit und Teilchengröße mit einem Laser-Doppler-Anemometer. Universität Bremen, Bremen, Germany.(See p. 33).
- Hofeldt, D. L., & Hanson, R. K. (1991).** Instantaneous imaging of particle size and spatial distribution in two-phase flows. Applied optics, 30(33), 4936-4948.
- Kumara, W. A. S., Elseth, G., Halvorsen, B. M., & Melaaen, M. C. (2010).** Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil–water flow in horizontal pipe. Flow measurement and Instrumentation, 21(2), 105-117.
- Nobach, H. (2001).** Analysis of dual-burst laser Doppler signals. Measurement Science and Technology, 13(1), 33.
- Saffman, M., Buchhave, P., & Tanger, H. (1984, July).** Simultaneous measurement of size, concentration and velocity of spherical particles by a laser Doppler method. 2nd Intl. In Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Paper (Vol. 8).
- Xu, R., Wang, G., & Jiang, P. (2022).** Spray cooling on enhanced surfaces: A review of the progress and mechanisms. Journal of Electronic Packaging, 144(1).