



PDA-Messungen an akustisch levitierten verdampfenden und inhomogenen Tropfen

PDA Measurements of Evaporating Inhomogeneous Droplets Trapped in an Acoustic Levitator

W. Weinberg, M. Mitschke, T. Wriedt, K. Bauckhage, Universität Bremen

Manuskripteingang: 31. August 1999; zur Veröffentlichung angenommen: 12. Dezember 1999

Die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) wird zur simultanen Bestimmung des Durchmessers und der Geschwindigkeit von Partikeln eingesetzt. Es wird ein PDA-Aufbau beschrieben, mit dem sich der Durchmesser räumlich fixierter Einzeltropfen als auch der Durchmesser bewegender monodisperser Tropfenketten ermitteln lässt. Die Untersuchungen erfolgten an unterschiedlichen Stoffsystemen: Wasser, Wasser-Glycerin-Gemische und Wasser-Glycerin-Gemische mit hinzugefügten Polystyrolpartikeln (optisch inhomogen). Untersucht wurde die Einflussnahme optischer Inhomogenitäten auf die Bestimmung der Tropfendurchmesser sowie die zeitliche Auflösung der Durchmesserbestimmung von verdunstenden, akustisch levitierten Wassertropfen.

Phase-Doppler-Anemometry (PDA) has been successfully applied to the simultaneous measurement of size and velocity of particles. A modified PDA is introduced to determine the size of stationary droplets levitated in an acoustic field and of moving chains of monosized droplets. Droplet sizes of different liquids like water, water-glycerin, and water-glycerin mixtures with added polystyrene particles were measured with this PDA-setup. The influence of optical inhomogeneities was investigated on the measurement of droplet diameter and the temporal decrease of the diameter of acoustic levitated droplets during evaporation.

Schlagwörter: Phasen-Doppler-Anemometrie, Levitation, Tropfenverdunstung

1 Einführung

Die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) ist ein laseroptisches Messverfahren, mit dem simultan der Durchmesser und die Geschwindigkeit sphärischer, optisch homogener Tropfen bestimmt werden kann [1; 2]. Die PDA wird u.a. zur Überwachung von Zerstäubungsprozessen sowie zur Überprüfung und Optimierung von Düsencharakteristiken eingesetzt. Es treten Schwierigkeiten auf, wenn die Partikel von den vorausgesetzten Idealbedingungen (sphärisch, homogen) abweichen. So lässt sich der Durchmesser von irregulären Partikeln kaum [3], von inhomogenen Tropfen, wie sie bei Sprühtrocknungsprozessen oder der Lackierung von Oberflächen auftreten, nur unter Integration eines Post-processings [5] und von oszillierenden Tropfen lediglich mit einer verminderten Messgenauigkeit bestimmen [6].

Um solche Partikeln dennoch für PDA-Messungen zugänglich zu machen, werden die auftretenden Phänomene zunächst durch Experimente an monodispersen Einzelparti-

keln untersucht. Im Falle von inhomogenen Tropfen werden monodisperse Tropfenkollektive bislang mit Hilfe von kontinuierlichen oder Drop-on-demand-Tropfengeneratoren erzeugt. Bei dieser Vorgehensweise unterliegt die Tropfenerzeugung jedoch einigen Einschränkungen: Flüssigkeiten höherer Viskosität ($\mu > 50$ mPas) lassen sich, wenn überhaupt, nur schwer in Einzeltropfen desintegrieren. Aufgrund der in Suspensionen und Emulsionen enthaltenen dispersen Phase können lediglich Flüssigkeiten mit niedriger Konzentration an Inhomogenitäten zertropft werden – bei höheren Konzentrationen verstopfen die Tropfengeneratoren sehr schnell. In der Regel lassen sich auch aus Suspensionen niedriger Konzentration nur Einzeltropfen mit Durchmessern größer 100 μm produzieren.

Als Alternative zu der Einzeltropfenerzeugung mittels Tropfengeneratoren bietet sich das Prinzip der Levitation an. Hierbei lassen sich Einzeltropfen unter Ausnutzung eines elektrischen (elektrodynamische Levitation) oder eines akustischen Schallfeldes (Ultraschalllevitation) freischwe-

bend positionieren. Bei der elektrodynamischen Levitation müssen die zu untersuchenden Tropfen zunächst elektrisch aufgeladen werden [3]. Dann kann die Schwerkraft mittels eines angelegten elektrischen Gleichspannungsfeldes kompensiert werden. Die örtliche Fixierung erfolgt mittels eines Wechselfeldes hoher Spannung (≈ 3 kV). Auf diese Weise lassen sich feste Partikeln oder Tropfen mit einem Durchmesser von einigen Mikrometern bis ca. $100\ \mu\text{m}$ levitieren. In einer akustischen Levitation wird der Tropfen durch ein akustisches Schallfeld entgegen der Schwerkraft örtlich fixiert. Vorteilhaft gegenüber der elektrodynamischen Levitation ist die Tatsache, dass der Tropfen hierbei nicht aufgeladen werden muss und eine Gefährdung durch hohe Spannung ausgeschlossen ist. Prinzipiell können Tropfen in einem Durchmesserbereich von $20\ \mu\text{m}$ bis ca. $2,5\ \text{mm}$ ohne größere Deformation levitiert werden [4].

Im Folgenden wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, mit dem es möglich ist, an akustisch levitierten Einzeltropfen Messungen mittels der PDA durchzuführen. Die Tropfen werden hierzu mit einem Ultraschalllevitator im Messvolumen eines modifizierten Phasen-Doppler-Anemometers freischwebend positioniert. Es werden sowohl Tropfen optisch homogener Medien (Wasser, Glycerin-Wasser-Gemische) als auch optisch inhomogener Medien untersucht. Um eine inhomogene Flüssigkeit mit definiert großen Inhomogenitäten und bekannter Konzentration dieser Inhomogenitäten zu erhalten, werden Modellflüssigkeiten aus Wasser und kleinen Polystyrolpartikeln ($450\ \text{nm}$) hergestellt.

Ziel der Untersuchungen ist es, zu ermitteln, inwieweit in künftigen Experimenten die Versuche an monodispersen Tropfenketten durch die an levitierten Einzelpartikeln ergänzt bzw. ersetzt werden können.

2 Grundlagen der Phasen-Doppler-Anemometrie

Mit der PDA lassen sich gleichzeitig die Geschwindigkeit sowie der Durchmesser von Tropfen bestimmen, die ein optisch erzeugtes Messvolumen durchqueren. In Bild 1 ist der Aufbau eines Standard-PDA's dargestellt.

Zwei Laserstrahlen werden unter einem vorgegebenen Winkel θ zum Schnitt gebracht, so dass ein elliptisches Interferenzvolumen entsteht. Die Detektoren 1/2 nehmen das Streulicht eines sich durch das Messvolumen bewegenden Tropfens auf. Sie sind unter definierten Höhenwinkeln $\psi_{1,2}$

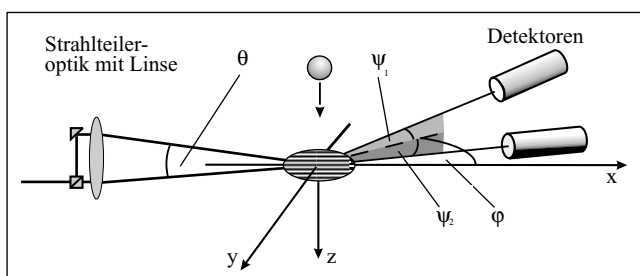


Bild 1: Standard-PDA-Aufbau.

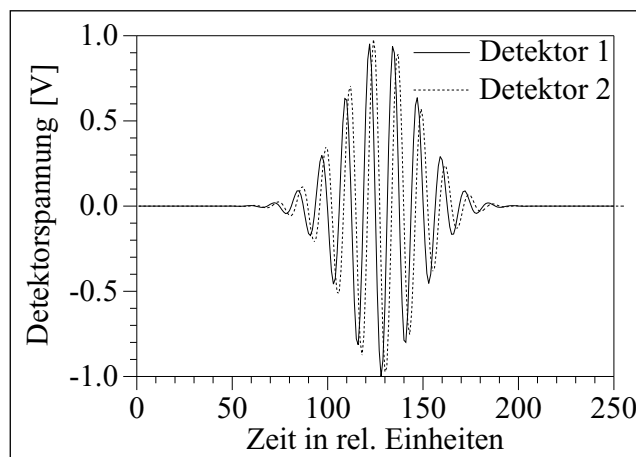


Bild 2: Doppler-Burst eines PDA.

so angeordnet, dass sie das Streulichtsignal zeitlich versetzt empfangen. Die Position der Detektoren zur optischen Achse bestimmt im Wesentlichen die Charakteristik des aufgenommenen Streulichtes des sich durch das Messvolumen bewegenden Tropfens. Hierbei kann durch geeignete Wahl des Off-axis-Winkels φ festgelegt werden, ob im detektierten Streulicht die Brechung oder die Reflexion dominiert. Ein typisches Detektorsignal, welches mit den PDA-Detektoren gemessen wird, ist in Bild 2 dargestellt.

Aus der Frequenz dieser beiden Signale erhält man zusammen mit den durch den Versuchsaufbau bestimmten Parametern die Geschwindigkeit des Tropfens am Ort des Messvolumens. Die zeitliche Differenz Δt der beiden Signale ist mit der Oberflächenkrümmung des Tropfens korreliert. Der Durchmesser des Tropfens d_T ergibt sich aus der Phasenverschiebung $\Delta\phi = \Delta t/T$ der beiden Signale, wobei T der Periodendauer einer Schwingung entspricht, vgl. Gleichung 1.

$$d_T = \frac{2}{2 \cdot G_f} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot n_c} \cdot \Delta\phi \quad (1)$$

Hierbei ist λ die Wellenlänge des Lasers, n_c der komplexe Brechungsindex des Tropfens und G_f eine Geometriefunktion, die davon abhängt, ob die detektierte Streustrahlung unter Brechung oder unter Reflexion gemessen wird.

3 Akustische Levitation

Durch den Einsatz einer akustischen Levitation besteht die Möglichkeit, schwebende Partikeln zu untersuchen. Dabei wird die auf die Probe wirkende Gravitationskraft durch ein akustisches Schallfeld kompensiert. Die für das Ultraschallfeld relevanten Größen, aus denen sich eine Gleichgewichtsbedingung aufstellen lässt, sind die Schallgeschwindigkeit sowie die Dichte des Schallmediums (in diesem Fall Luft) ρ_0 . Mit diesen Größen lässt sich die Gleichgewichtsbedingung formulieren und daraus die notwendige probenspezifische Kraft zur Aufhebung der Gravitationskraft berechnen.

$$F_{ac} = c_{w,ac} \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot \bar{v}_{max}^2 \cdot d_T^2 = \frac{\pi}{6} \cdot d_T^3 \cdot \rho_T \cdot g \quad (2)$$

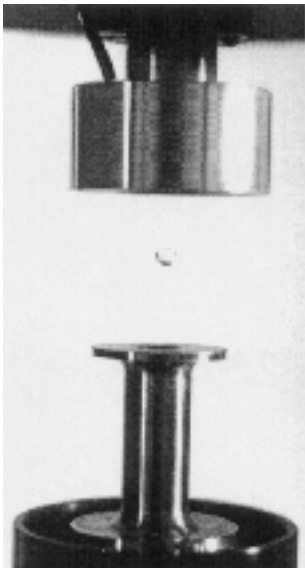


Bild 3: Akustischer Levitator der Firma DANTEC/Invent [4].

Innerhalb des akustischen Feldes werden Partikeln aufgeheizt. Diese thermischen Effekte sind abhängig von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft. Bei großen Partikeldurchmessern findet eine Aufheizung von ca. 4° statt, so dass diese Effekte für die vorgestellten Untersuchungen von vernachlässigbarer Größe sind [7; 11]. In Bild 3 ist die Probenkammer des verwendeten akustischen Levitators der Firma DANTEC/INVENT dargestellt. Der Levitator arbeitet mit einer Schallfrequenz von 58 kHz.

Die zu untersuchenden Tropfen lassen sich mit einer handelsüblichen Injektionsspritze oder einer Drahtschlinge in das akustische Feld einbringen [9]. Durch Variation der Ultraschalleistung besteht die Möglichkeit, die auf die Partikeln wirkende Kraft dem Tropfendurchmesser (-gewicht) anzupassen. Dadurch ist es möglich, Tropfen mit Durchmessern von $100\ \mu\text{m}$ bis $2\ \text{mm}$ zu levitieren. Kleinere Tropfen lassen sich auf diesem Wege nicht erzeugen. Um einen Tropfen definierten Durchmessers zu levitieren, wählt man zunächst die nach Gleichung 2 berechenbare Ultraschalleistung vor (bei einem Tropfendurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ ca. $3,8\ \text{W}$). Dann bringt man mit einer Injektionsspritze einen Tropfen in die Levitation ein, dessen Gewichtskraft die Ultraschalleistung übersteigt. Dabei zerfällt der große Tropfen in mehrere kleine Tropfen, die in dem für die weiteren Untersuchungen benötigten Größenbereich liegen. Diese Tropfen verharren infolge des Stabilitätsgleichgewichtes ortsfest etwas unterhalb der Schallknoten des Ultraschallfeldes.

4 Experimentelle Realisation

Der Durchmesser eines Tropfens kann nur dann mittels der PDA gemessen werden, wenn sich der Tropfen relativ zum Interferenzfeld bewegt. Durchquert ein Tropfen das Messvolumen, wird dessen Streulicht von den Detektoren als ein sich zeitlich änderndes Intensitätssignal aufgenommen. Verharrt der Tropfen jedoch ortsfest im Messvolumen, so ist die Aufnahme eines sich zeitlich ändernden Intensitätssignals mit einem Standard-PDA-Aufbau nicht möglich.

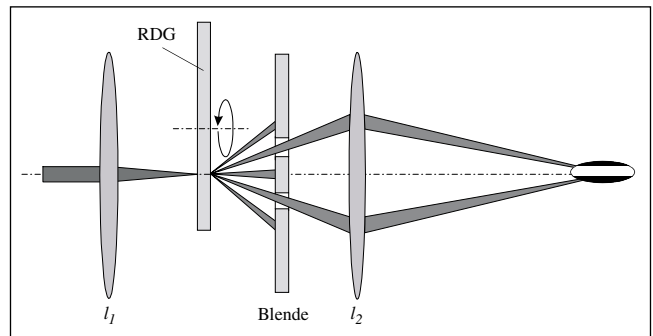


Bild 4: Modifizierter PDA-Sender.

In Bild 4 ist ein modifizierter PDA-Sender dargestellt, bei dem die Strahlteilung über ein Rotations-Diffraktionsgitter (RDG) erfolgt. Hierbei handelt es sich um ein Echelette-Gitter, das so optimiert ist, dass in der ersten Beugungsordnung maximale Intensität erzielt wird. Für die PDA-Messungen wird das RDG in gleichförmige Rotation (1800 Umdrehungen/Minute) versetzt. Die Interferenzstreifen bewegen sich dann im Messvolumen parallel zur z -Richtung mit der konstanten Geschwindigkeit $v_{\text{Int}} = 4\ \text{m/s}$. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, sowohl das Streulicht von ortsfest im Messvolumen befindlichen Tropfen als auch das Streulicht von sich durch das Messvolumen bewegenden Tropfen mit einer bei Standard-PDA-Aufbauten üblichen Detektoranordnung aufzunehmen.

Die Linse I_1 fokussiert den Laserstrahl auf das Rotationsdiffraktionsgitter. Durch die Blende werden alle Strahlen außer der 1. Ordnung ausgeblendet. Mit der Linse I_2 lassen sich der Strahlschnittwinkel und die Größe des Messvolumens variieren.

Die Strahlerzeugung erfolgt mit einer IR-Laserdiode (Wellenlänge $\lambda = 832\ \text{nm}$). Da diese Wellenlänge nicht mehr im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt, muss die Justage des Strahlenganges mit Hilfe von IR-Sensorfolien erfolgen; zur Überprüfung der Geometrie des Messvolumens wird ein Beam-Scan verwendet, mit dem sowohl die Höhe und Breite des Messvolumens als auch die Ausbildung des Interferenzmusters gemessen wird. Für die Messungen wird ein Strahlschnittwinkel von $\theta = 2,62^\circ$ eingestellt. Die PDA-Detektoren sind unter einem Off-axis-Winkel φ von 30° aufgestellt. Die Elevationswinkel betragen $\psi_{1,2} = \pm 1,43^\circ$.

5 Messwerte

Die ersten Messreihen werden an monodispersen Tropfenkollektiven durchgeführt, die mit einem Drop-on-demand-Tropfengenerator [8] erzeugt werden. Der Durchmesser der Tropfen beträgt $75\ \mu\text{m}$. Diese Messungen dienen in erster Linie der Überprüfung der einwandfreien Funktion des neuen PDA-Senders.

Bei den nachfolgenden Untersuchungen kommt der akustische Levitator zum Einsatz. Hier werden zunächst Wassertropfen unterschiedlicher Größe in den Levitator eingebracht und der Durchmesser mit der PDA bestimmt.

Als weitere Stoffsysteme werden danach Glycerin-Wasser-Gemische (Mischungsverhältnisse 1 : 5 und 1 : 1) untersucht.

In den letzten Versuchsreihen werden dem Glycerin-Wasser-Gemisch (1 : 1) zusätzlich Polystyrol-Partikeln mit einem Durchmesser von $450\ \mu\text{m}$ hinzugefügt, so dass man Modellsuspensionen mit definierten Eigenschaften erhält. Des Weiteren wird von Messreihe zu Messreihe die Konzentration der Polystyrolpartikeln von 1 % auf 2,5 % erhöht, um zu ermitteln, inwieweit das PDA-Messergebnis von der Konzentration an Inhomogenitäten beeinflusst wird. Der Einsatz solcher Modellsuspensionen ermöglicht es, die Versuche jederzeit unter gleichen Bedingungen wiederholen zu können.

5.1 Messungen an monodispersen Tropfenketten

PDA-Messungen an einer das Messvolumen durchquerenden kontinuierlichen Tropfenkette lassen sich problemlos mit einem hohen Maß an Genauigkeit durchführen. Auf Basis dieser Messungen erhält man verlässliche Referenzwerte für die maximal mögliche Messgenauigkeit des PDA-Aufbaus.

Bei jeder Messreihe werden die Durchmesser von 10 000 Tropfen mit der PDA bestimmt, um eine statistisch gesicherte Aussage über den Tropfendurchmesser machen zu können. Zeitgleich wird der Tropfendurchmesser mit Hilfe eines Mikroskopes mit CCD-Kamera und eines Bildanalysesystems ermittelt.

In Bild 5 ist ein PDA-Ergebnis dargestellt, wie es sich typischerweise bei der Vermessung des monodispersen Tropfenkollektives ergibt. Bild 5 belegt, dass mit der PDA der Tropfendurchmesser mit einer Standardabweichung (Messgenauigkeit) besser $1,5\ \mu\text{m}$ bestimmt werden kann. Diese Standardabweichung beinhaltet sowohl die Genauigkeit des PDA-Aufbaus als auch die Stabilität der Tropfenerzeugung.

5.2 Messungen an levitierten Wassertropfen

Der Tropfengenerator wird hierzu durch den Ultraschalllevitator ersetzt. Der Levitator wird so aufgestellt, dass die zu

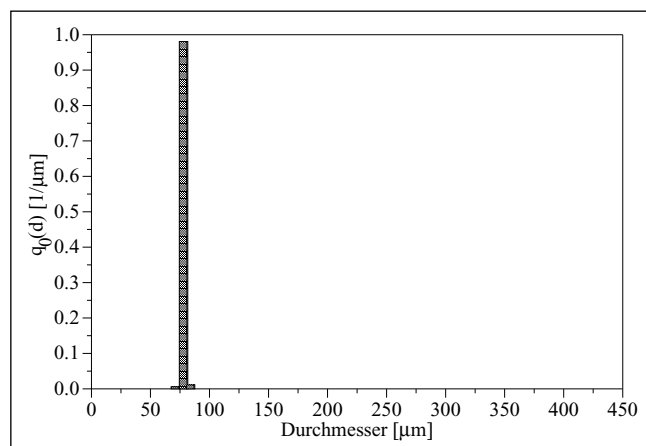


Bild 5: Durchmesserverteilung einer monodispersen Tropfenkette.

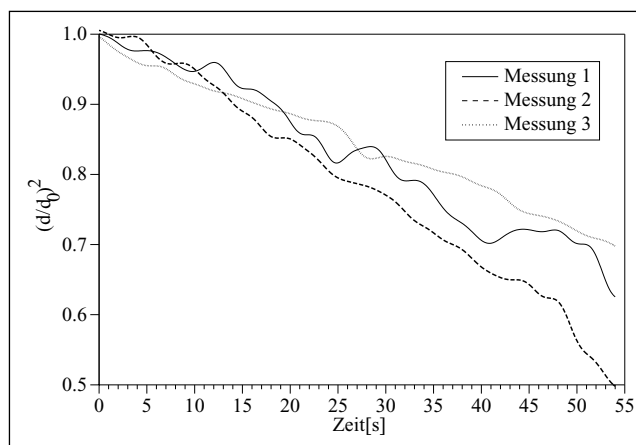


Bild 6: Zeitliche Änderung des Tropfendurchmessers.

untersuchenden Tropfen die gleiche Position bezüglich des Messvolumens einnehmen wie die Tropfen der kontinuierlichen Tropfenkette. Die Randbedingungen für die unterschiedlichen Messreihen können folglich als identisch angesehen werden.

Zeitlich längerfristige PDA-Messungen an levitierten Wassertropfen sind nicht möglich. Aufgrund der Verdunstung des Tropfens in der Probenkammer des Levitators verringert sich der Durchmesser des Tropfens während der Messung. Die Verdunstung des Wassertropfens lässt sich verdeutlichen, indem man den mit der PDA bestimmten Durchmesser in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt betrachtet, vgl. Bild 6. Jede PDA-Messung erfolgt über ein Zeitintervall von ca. 54 Sekunden. In dieser Zeit wird der Durchmesser des Tropfens bei jeder Messung insgesamt 500-mal gemessen. In Bild 6 ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Messdauer der detektierte Tropfendurchmesser d und damit der Quotient $(d/d_0)^2$ sinkt. Die Abnahme des Quotienten aus gemessenem Durchmesser und Anfangsdurchmesser des Tropfens $(d/d_0)^2$ erfolgt im beobachteten Zeitraum nahezu linear. Dieses Ergebnis korreliert mit den Ausführungen anderer Autoren [7; 9; 10]. Bild 6 dokumentiert ferner, dass die PDA eine sehr leistungsfähige Alternative zu anderen Auswerteverfahren wie der Bildanalyse oder der gravimetrischen Volumenbestimmung darstellt. Die PDA bietet zudem den Vorteil, on-line und in kurzen Zeitabständen den Tropfendurchmesser messen zu können.

5.3 Messungen an levitierten Glycerin-Wasser-Tropfen

Um den Einfluss der Verdunstung zu minimieren, wird dem Wasser in definierter Konzentration Glycerin zugefügt. In Bild 7 ist das PDA-Messergebnis eines Tropfens einer Glycerin-Wasser-Mischung (Mischungsverhältnis 1 : 5) dargestellt. Das Messergebnis basiert auf der Auswertung von 10 000 PDA-Ereignissen. Der Durchmesser des Tropfens lässt sich mit einer Standardabweichung von $3,6\ \mu\text{m}$ bestimmen. Dieser Wert liegt geringfügig über dem Vergleichswert von $1,5\ \mu\text{m}$, der auf Basis der monodispersen Tropfenkette ermittelt wurde.

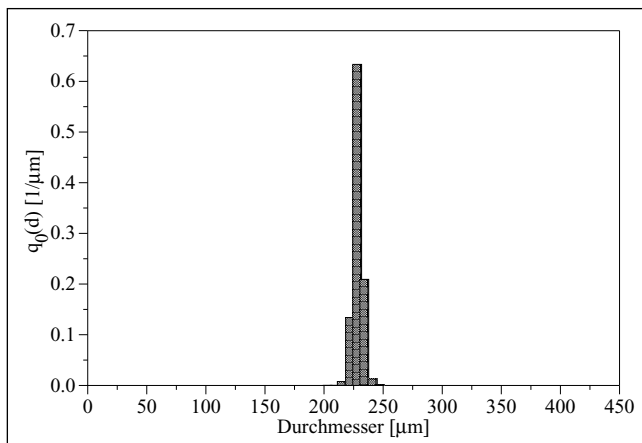


Bild 7: Durchmesserverteilung levitierter Glycerin-Wasser-Tropfen (20 %).

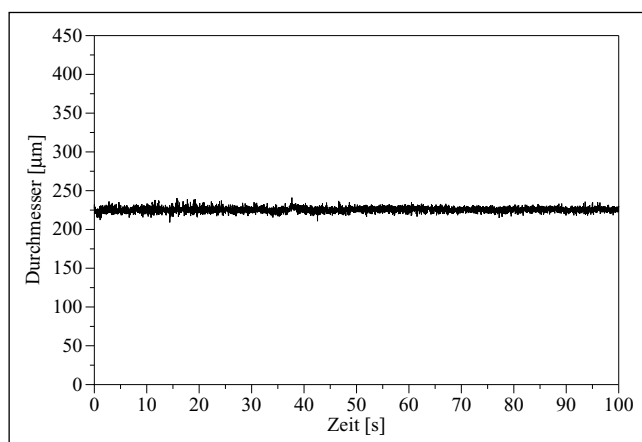


Bild 8: Zeitliche Änderung des Tropfendurchmessers bei Glycerin-Wasser (20 %).

In Bild 8 ist wiederum das Messergebnis aus Bild 7 zeitlich aufgelöst aufgetragen. Bild 8 verdeutlicht, dass die Verdunstung nahezu vollständig vermieden wird. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft des Glycerins wird der Stofftransport von Wasser in die Umgebung verhindert.

Die Stabilität der Tropfenposition innerhalb der Probenkammer des Levitators ist sehr anfällig für äußere Störungen. Solche Störungen können unerwünschte Luftströmungen, Erschütterungen o.ä. sein. Durch präventive Maßnahmen allein lassen sich die Störungen nicht immer ausschließen. Der mit der PDA detektierte Tropfendurchmesser hängt jedoch von der Position des Tropfens im Messvolumen ab. Eine Änderung der Tropfenposition durch äußere Einflüsse verringert demzufolge die Genauigkeit in der Durchmesserbestimmung. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird der Glycerinanteil für die folgenden Versuche auf 50 % erhöht. Durch die Vergrößerung der Glycerinkonzentration vergrößert sich die Dichte der Flüssigkeit und dadurch gleichfalls die Trägheit des Tropfens. Dies ermöglicht letztlich eine stabilere Positionierung des Tropfens innerhalb des Ultraschallfeldes. In Bild 9 sind Messergebnisse eines Glycerin-Wasser-Gemisches (Mischungsverhältnis 1:1) bei unterschiedlichen Tropfendurchmessern gezeigt.

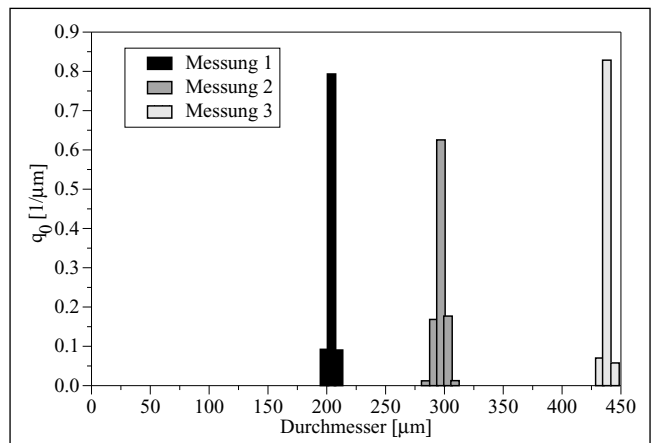


Bild 9: Durchmesserverteilung levitierter Glycerin-Wasser-Tropfen (50 %).

Im Vergleich zu den Messreihen des Glycerin-Wasser-Gemisches (Mischungsverhältnis 1:5) kann hier die Messgenauigkeit um 12 % auf 3,2 µm verbessert werden.

Die in Bild 9 dargestellten Messreihen dokumentieren, dass die Bestimmung des Durchmessers levitierter Tropfen eines optisch homogenen Mediums über ein breites Größenspektrum problemlos mit dem konzipierten PDA-Aufbau möglich ist.

5.4 Messungen levitierter optisch inhomogener Tropfen

In den Bildern 10 bis 12 sind Messungen an inhomogenen Tropfen vorgestellt. Die Tropfen bestehen aus einem Glycerin-Wasser-Gemisch (Mischungsverhältnis 1:1). Je nach Messreihe beinhaltet dieses Gemisch zusätzlich Polystyrolpartikeln in unterschiedlicher Konzentration (1 %, 2 %, 2,5 %). Der Durchmesser der verwendeten Polystyrol-Partikeln beträgt 450 nm. Aus jeder dieser Proben werden drei Tropfen mit Durchmessern um 120 µm, 280 µm und 350 µm levitiert und vermessen. Es zeigt sich, dass die großen Tropfen (350 µm) bei keiner Konzentration für PDA-Messungen zugänglich sind. Da Tropfen des homogenen Glycerin-Wasser-Gemisches, die in denselben Durchmes-

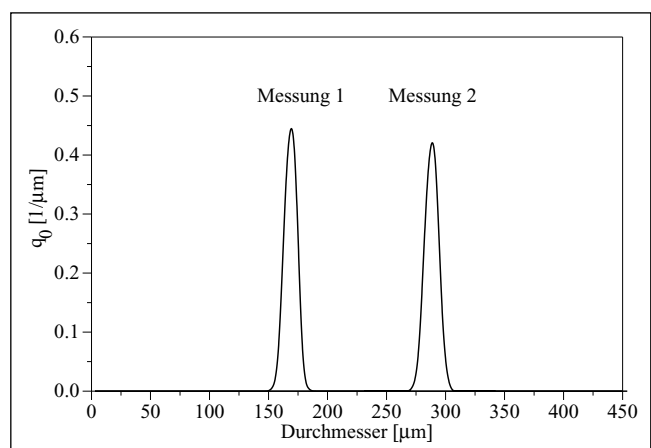


Bild 10: Glycerin-Wasser-Tropfen mit einer Polystyrolkonzentration von 1,0 %.

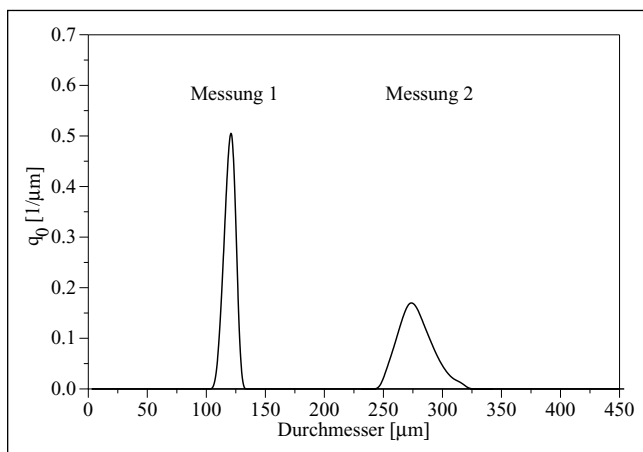


Bild 11: Glycerin-Wasser-Tropfen mit einer Polystyrolkonzentration von 2,0 %.

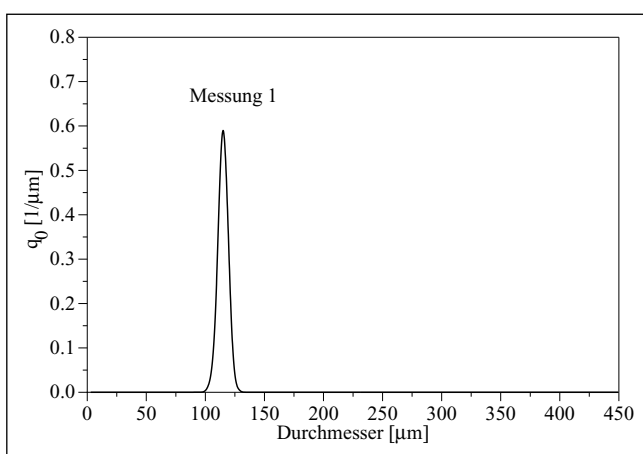


Bild 12: Glycerin-Wasser-Tropfen mit einer Polystyrolkonzentration von 2,5 %.

serbereich fallen, problemlos vermessen werden konnten, ist dieser Effekt den enthaltenen Polystyrol-Partikeln zuzurechnen. Mit steigendem Tropfendurchmesser nimmt der Weg, den das Licht innerhalb des Tropfens zurücklegt, proportional zu. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Streuprozessen an den Polystyrolpartikeln kommt, steigt ebenfalls. Letztlich führt die Summe aller Streuprozesse dazu, dass der Zusammenhang zwischen der gemessenen Phasendifferenz und dem Tropfendurchmesser nicht mehr den üblicherweise verwendeten Streutheorien folgt.

Sofern die inhomogenen Tropfen für PDA-Messungen zugänglich sind, kann weder bei einem Tropfendurchmesser von 120 µm noch bei einem Tropfendurchmesser von 280 µm ein Zusammenhang zwischen der Konzentration und der Messgenauigkeit festgestellt werden. Die Standard-

abweichung der Messergebnisse liegt bei allen Messungen zwischen 3 µm und 5 µm. Auffällig ist, dass sich bei einer Polystyrolkonzentration von 2,5 % selbst der Durchmesser eines mittelgroßen Tropfens nicht mehr mit der PDA auswerten lässt. Es muss folglich abhängig vom Tropfendurchmesser und der Konzentration der Polystyrolpartikeln ein kritischer Grenzwert existieren, bei welchem sich die optischen Eigenschaften des Tropfens spontan verschlechtern.

5.5 Vergleich mit monodispersen Tropfenketten

Abschließend sollen die an der Levitation gewonnenen Ergebnisse mit PDA-Messungen an monodispersen Tropfenketten verglichen werden. Zur Tropfenerzeugung wurde dabei ein kontinuierlicher Tropfengenerator eingesetzt, mit dem sich monodisperse Tropfen von 180 µm Durchmesser ergeben. Die Tropfenerzeugungsfrequenz lag bei 30 000 Tropfen/s. In Analogie zu den Levitatorexperimenten wurden Glycerin-Wasser-Tropfen (1 : 1) mit Polystyrolgehalten von 0 %, 1 %, 2 % und 2,5 % untersucht. Bei jeder Konzentration wurden 3 Messreihen mit je 10 000 ausgewerteten Tropfen aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die ermittelten Standardabweichungen von levitierten Einzeltropfen des optisch homogenen Glycerin-Wasser-Gemisches sind nahezu identisch mit denen von monodispersen Tropfenketten. Bei inhomogenen Tropfen weichen die Ergebnisse der levitierten Tropfen sowohl qualitativ als auch quantitativ von denen monodisperser Tropfenketten ab. Lediglich im Tropfengrößenbereich um 280 µm bestätigen beide Untersuchungsmethoden, dass mit höherer Konzentration an Polystyrolpartikeln die Standardabweichung zunimmt. Die absoluten Werte der Standardabweichungen (18 µm, 27 µm) liegen jedoch über denen der levitierten Tropfen (5 µm, 14 µm).

Die unterschiedlichen Ergebnisse sind auf die thermodynamischen Verhältnisse innerhalb der Levitation zurückzuführen. Es ist zu vermuten, dass die Strömungs- und Druckverhältnisse in den Schallknoten des Ultraschallfeldes dazu führen, dass innerhalb des Tropfens ein Bereich nahe des Zentrums entsteht, in dem sich die Polystyrolpartikeln bevorzugt anhäufen. Je länger sich der Tropfen in der Levitation befindet, desto stärker macht sich dieser Einfluss bemerkbar. Zeitgleich durchgeführte Videoaufnahmen des Tropfens belegen, dass mit zunehmendem Aufenthalt des Tropfens im Ultraschallfeld eine Entmischung innerhalb des Tropfens stattfindet. Die PDA-Messergebnisse bleiben daher nahezu unbeeinflusst von den Inhomogenitäten. Mit

Tabelle 1: Messergebnisse an monodispersen Tropfenketten und levitierten Einzeltropfen.

		0%	1%	2%	2,5%
Tropfengenerator	d_m [µm]	190	300	190	260
	σ [µm]	1	2	16	18
Levitorator	d_m [µm]	200	300	170	300
	σ [µm]	2	3	4	5



zunehmendem Tropfendurchmesser befinden sich immer weniger Volumenanteile des Tropfens im Schallknoten des Ultraschallfeldes. In diesen „Außenbereichen“ sind die Polystyrolpartikeln vermehrt regellos angeordnet, wodurch es zu einer Verschlechterung der Standardabweichung mit zunehmender Konzentration und zunehmendem Tropfendurchmesser kommt. Im Falle der Tropfen mit den größten untersuchten Durchmessern (350 μm) schließlich spielt die Ansammlung von Polystyrolpartikeln im Zentrum des Tropfens nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Lichtstreuung wird im Wesentlichen durch die in den „Außenbereichen“ befindlichen Partikeln bestimmt. Als weiteres, die PDA beeinflussendes Element kommt hinzu, dass diese relativ großen Tropfen nicht mehr stabil im Ultraschallfeld verharren, sondern geringe Schwingungen und Bewegungen ausführen. Diese Faktoren führen letztendlich dazu, dass der Tropfendurchmesser großer levitierter Tropfen eines inhomogenen Mediums nicht mehr mit der PDA zu erfassen ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist, mittels eines modifizierten PDA-Aufbaus den Durchmesser levitierter Tropfen zu bestimmen. Es lassen sich sowohl Tropfen homogener als auch inhomogener Medien verwenden.

Problematisch stellte sich bei den Experimenten die Probenvorbereitung dar. Die Tropfen von Flüssigkeiten mit niedrigem Dampfdruck verdunsten sehr schnell (vgl. Wasser), so dass keine stationären Bedingungen erreicht werden. Abhilfe kann hier geschaffen werden, indem man z.B. Glycerin dem Wasser hinzufügt. Die an Wassertropfen gewonnenen Ergebnisse demonstrieren gleichzeitig, dass unter Anwendung der PDA solche Verdunstungsvorgänge innerhalb der Levitation problemlos mit einer hohen zeitlichen Auflösung (1/10 Sekunde) erfasst und untersucht werden können.

Der Vergleich der PDA-Messungen von levitierten Einzeltropfen und Tropfenketten hat gezeigt, dass sich auf Basis von Levitationsexperimenten nur schwer Rückschlüsse auf die Verhältnisse ziehen lassen, wie sie bei Zerstäubungsvorgängen auftreten. Aufgrund der thermodynamischen Vorgänge innerhalb der Levitation existieren innerhalb des Tropfens andere Strömungsverhältnisse als bei Tropfen, welche sich mit einer definierten Geschwindigkeit durch die Luft oder ein anderes Gas bewegen. Im Hinblick auf Grundlagenuntersuchungen mit dem Ziel, die PDA-Mess-

genauigkeit bei Zerstäubungsprozessen zu verbessern, scheint daher der Einsatz von Tropfengeneratoren die bessere Alternative darzustellen.

Danksagung

Wir danken der DFG für die Förderung dieses Projektes unter der Nr. 542/25.

Literatur

- [1] *F. Durst, M. Zaré*: Laser Doppler measurements in two phase flows, Proc. LDA-Symp., Copenhagen, (1975), 403–429.
- [2] *K. Bauckhage, H.-H. Flögel*: Simultaneous measurement of droplet size and velocity in nozzle sprays, Proc. Second Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lissabon, Portugal, July 2–4, (1984).
- [3] *G. Göbel, T. Wriedt, K. Bauckhage*: Micron and Sub-Micron Aerosol Sizing with a Standard Phase-Doppler Anemometer, J. Aerosol Sci. Vol. 29, No. 9, (1998), 1063–1073.
- [4] DANTEC/INVENT, Instruction Manual for Ultrasonic Levitator, DANTEC/INVENT, Am Weichselgarten 21, 91058 Erlangen.
- [5] *M. Mitschke, T. Wriedt, K. Bauckhage*: Standard PDA for measuring the size of inhomogeneous droplets, Meas. Sci. Technol. 9, (1998), 197–209.
- [6] *P. Lehmann, E.-H. Schombacher, T. Wriedt*: Determination of Droplet Accelerations, Oscillations, and Non-Sphericities by Phase Doppler Anemometry, Proc. of 7th Intern. Conf. on Laser Anemometry-Advances and Applications, 8.9.–11.9., (1997), Karlsruhe, 671–678.
- [7] *E. G. Lierke*: Kontrollierte Massenänderung von Tropfen in einem akustischen Stehwellen-Positionierer, Forschung im Ingenieurwesen-Engineering Research, Bd. 62, Nr. 1/2, (1996), 21–31.
- [8] *H. Ulmke, T. Wriedt, H. Lohner, K. Bauckhage*: The Piezoelectric Droplet Generator – A Versatile Tool for Dispensing Applications and Calibration of Particle Sizing Instruments. Proc. of the 1st Intern. euspen Conf., Vol. 2, Shaker Verlag, Aachen 1999, 290–293.
- [9] *E. Welter, B. Neidhart*: Acoustically levitated droplets – a new tool for micro and trace analysis, Fresenius J. Anal. Chem. (1997) 357, 345–350.
- [10] *G. Brenn, O. Kastner, D. Rensink, C. Tropea*: Evaporation and Drying of Multicomponent and Multiphase Droplets in a Tube Levitator, International Conference on Liquid atomization and Spray Systems, ILASS-Europe, Toulouse (1999).
- [11] *E. Welter*: Ultraschallevitierete Tropfen – Ein neuer Ansatz für die chemische Mikroanalyse, Shaker Verlag, Marburg/Lahn 1995.

Cand. Phys. Wolfgang Weinberg, Dipl.-Ing. Mario Mitschke, Dr.-Ing. Thomas Wriedt und Prof. Dr.-Ing. Klaus Bauckhage, Universität Bremen – FB 4/Vt, Badgasteiner Str. 3, D-28359 Bremen, E-Mail: weinberg@zfn.uni-bremen.de, tria@iwt.uni-bremen.de, thw@iwt.uni-bremen.de, kb@iwt.uni-bremen.de.