

Anwendung der Mie Scattering Imaging Methode auf die Untersuchung sphärischer Feststoffpartikel mit einem Durchmesser zwischen 2,5 und 20 μm

A. Graßmann, F. Peters

Lehrstuhl für Strömungslehre, Universität Essen, 45117 Essen

1. Einleitung

Die Mie Scattering Imaging Methode ist eine bildgebende, laseroptische Meßmethode zur Bestimmung der Größe sphärischer, durchsichtiger Partikel bzw. Tröpfchen. Das Messprinzip dieser Methode besteht in der unscharfen Abbildung von mit Laserlicht beleuchteten Tröpfchen oder Partikeln. Die unscharfe Abbildung erzeugt auf dem CCD Chip einer digitalen Kamera sogenannte Aperturbilder innerhalb derer ein für die Größe charakteristisches Streifenmuster beobachtet wird. Die Auswertung dieses mit der Mie Theorie vergleichbaren Musters ergibt den Durchmesser [2], [3], [4], [5] bzw. kann zur Ermittlung des Brechungsindex verwendet werden [6].

Der Anwendungsbereich dieser Methode endete bisher bei einem minimalen Durchmesser von ca. 10 μm . Wir zeigen, dass sich die untere messbare Grenze durch die Verbesserung der optischen Komponenten und der Auswertalgorithmen auf Durchmesser bis etwa 2 μm verschieben lässt. Am Beispiel von festen Referenzpartikeln mit Größen zwischen 2,5 μm und 20 μm werden die erzielbaren Genauigkeiten ermittelt.

2. Grundlagen

Sphärische Teilchen, die mit Laserlicht beleuchtet werden, streuen das Licht in für den Durchmesser und den Brechungsindex charakteristischer Weise.

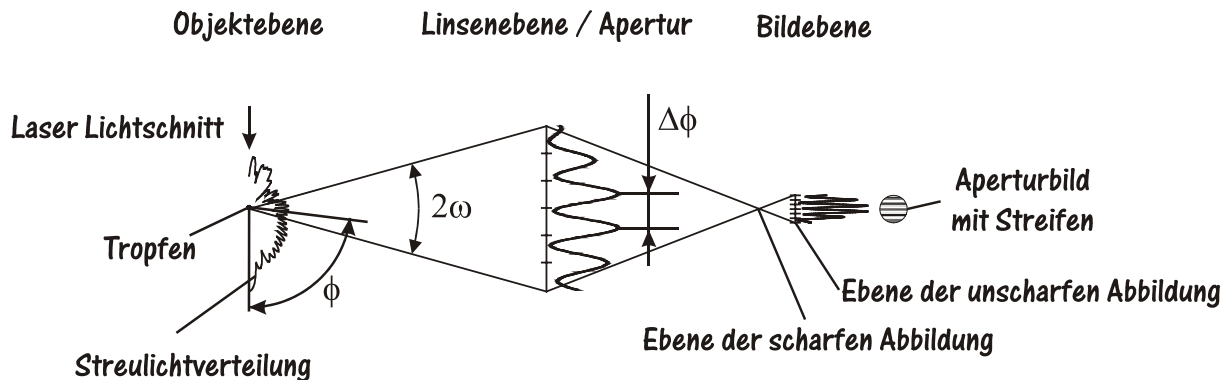


Abb. 1: Optischer Aufbau zur unscharfen Abbildung von Partikeln

Bildet man sehr kleine Partikel scharf ab, so wird alles innerhalb des Aperturwinkels 2ω auf das Objektiv treffende Licht in einen Punkt fokussiert, die Information über die Intensitätsverteilung geht dabei verloren (Abb. 1). Bildet man ein Partikel unscharf ab, so erzeugt das durch die Apertur des Objektivs gelangende Streulicht ein Aperturbild, dessen Form der Form der Aperturblende entspricht. Innerhalb dieses Aperturbildes erkennt man die alternierende Intensitätsverteilung als helle und dunkle Streifen. Der Streifenabstand wird mit kleiner werdendem Durchmesser immer größer, so dass ab einem bestimmten Durchmesser bei einem vorgegebenen Aperturwinkel nur noch ein Streifen in dem Aperturbild zu sehen ist. Der Aperturwinkel bestimmt also maßgeblich den Bereich in dem die Größenmessung durchgeführt werden kann.

In der Literatur wird der Streifenabstand häufig mit Hilfe der FFT bestimmt und zur

Berechnung des Durchmessers wird eine analytische Beziehung zwischen dem Streifenabstand und dem Durchmesser verwendet [3]. Diese Gleichung ist eine analytische Lösung aus der geometrischen Optik für das Fernfeld von Strahlen nullter und erster Ordnung [1]. Sie setzt den Durchmesser d in Beziehung zu der Wellenlänge des Lichts λ , dem Streifenabstand $\Delta\phi$, dem Beobachtungswinkel ϕ und dem Brechungsindex m .

$$d = \frac{2 \cdot \lambda}{\Delta\phi} \cdot \left[\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\sqrt{1 + m^2 - 2 \cdot m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)}} \right]^{-1} \quad (1)$$

Bei sehr kleinen Partikeldurchmessern kann festgestellt werden, dass diese Gleichung die Beziehung zwischen dem Streifenabstand und dem Durchmesser nur unpräzise beschreibt.

Durch einen direkten Vergleich des gemessenen Intensitätsprofils G mit einem nach der Mie Theorie berechneten Intensitätsprofil G_{Mie} kann diejenige Größe ermittelt werden, bei der die größte Übereinstimmung zwischen den Signalen zu finden ist. Im Gegensatz zu der FFT wird nicht nur der Streifenabstand als Maß für den Durchmesser verwendet, sondern auch die absolute Lage der Intensitätsmaxima und -minima.

Dazu ist es notwendig die Information über die Intensitätsverteilung des Streulichts von dem Pixelkoordinatensystem des CCD Chips in ein Koordinatensystem des absoluten Beobachtungswinkels ϕ zu transformieren. Zur Transformation der Pixelkoordinaten in die Koordinaten des Beobachtungswinkels ist es zunächst notwendig, die Mitte des Aperturbildes zu bestimmen. Durch die Anwendung verschiedener Winkelbeziehungen und Strahlensätze (vgl. Abb. 2) ist es möglich einen einfachen Zusammenhang zwischen einer Position in der Bildebene und dem absoluten Beobachtungswinkel ϕ herzustellen.

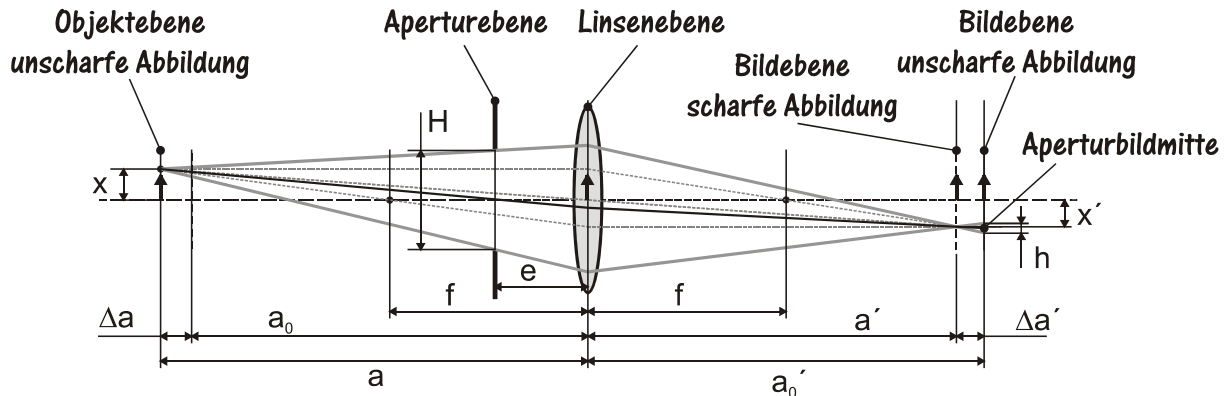


Abb. 2: Optischer Aufbau zur unscharfen Abbildung von Partikeln

Das Intensitätsprofil innerhalb des Aperturbildes kann so in ein Intensitätsprofil über dem Beobachtungswinkel umgerechnet werden. Zum korrelativen Vergleich (Korrelationsmethode) zwischen dem gemessenen und dem für verschiedene Größen berechneten Intensitätsprofil werden folgende Gleichungen verwendet [7]. Die Variable n bezeichnet den Winkel.

$$\text{Korr}_d = \frac{\delta_d}{\delta_G \cdot \delta_{\text{Mie } d}} \quad (2)$$

$$\delta_{\text{Mie } d} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{max}}} \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}-1} (G_{\text{Mie } n, d} - \bar{G}_{\text{Mie}})^2} \quad (3)$$

$$\delta_G = \sqrt{\frac{1}{n_{\max}} \sum_{n=0}^{n_{\max}-1} (G_n - \bar{G})^2} \quad (4)$$

$$\delta_d = \sqrt{\frac{1}{n_{\max}} \sum_{n=0}^{n_{\max}-1} (G_{\text{Mie } n,d} - \bar{G}_{\text{Mie}}) \cdot (G_n - \bar{G})} \quad (5)$$

Das absolute Maximum der Korrelation (Korr) repräsentiert den am besten passenden Durchmesser.

3. Experimente

Zur Untersuchung der erzielbaren Genauigkeit der Methode wurden monodisperse Feststoffpartikel mit Größen zwischen 2,55 μm und 20,5 μm (Fa. micro particles) untersucht. Die Partikel befinden sich in quaderförmigen Glasbehältern und können durch Einblasen von



Abb. 3: Aperturbilder von Feststoffpartikeln mit einem Durchmesser von ca. 12 μm mit dem Doppel Planar Objektiv unter $\phi=90^\circ$ aufgenommen.

Luft mit einer Pipette aufgewirbelt und so untersucht werden (Abb. 3).

Die Partikel werden mit einem 2W Ar Laser beleuchtet und unter Winkeln von $\phi=70^\circ$ und $\phi=90^\circ$ beobachtet. Dazu werden das Zeiss Makro Planar Objektiv mit einem Aperturwinkel von ca. $2\omega=7^\circ$ und das neuartige Doppel Planar Objektiv mit einem Aperturwinkel von ca. $2\omega=25^\circ$ verwendet. Das Doppel Planar Objektiv besteht aus zwei gleichen Zeiss Planar Objektiven, die mit der objektseitigen Linse gegeneinander gestellt werden. An beiden Objektiven wurden je eine

runde Aperturblende (d20) mit einem Durchmesser von 20 mm und eine rechteckige Aperturblende (20x10) mit einer Breite von 20 mm und einer Höhe von 10 mm angebracht. Die rechteckige Aperturblende enthält einen diagonalen Balken, der es erlaubt, die Aperturbildmitte auch dann zu ermitteln, wenn an beiden Seiten des Aperturbildes Intensitätsminima auftreten. Die Bilder wurden mit einem PIV System von LaVision bestehend aus einer FlowMaster 2 Kamera und der DaVis Software aufgenommen. Beispiele der so entstandenen Aperturbilder sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Zur Auswertung der Bilder wurden zum einen die aus der Literatur bekannte FFT basierte Auswertemethode unter Verwendung von Gleichung 1 verwendet. Zum anderen wurde unsere oben beschriebene Korrelationsmethode angewendet.

An den Aperturbildern kann bereits abgelesen werden, dass Partikel mit einem Durchmesser von 2,5 μm mit dem Makro Planar Objektiv nicht untersucht werden können, weil das Signal

48.4

zwar ein ausgeprägtes Intensitätsmaximum, jedoch kein Intensitätsminimum aufweist. Der vergrößerte Aperturwinkel des Doppel Planar Objektivs bewirkt, dass auch bei einem Durchmesser von 2,55 μm zwei Streifen beobachtet werden können. Die Ergebnisse für das Doppel Planar Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tab. 1: Aperturbilder von Feststoffpartikeln die mit dem Makro Planar Objektiv aufgenommen wurden.

Objektiv Blende, ϕ	Partikeldurchmesser (Herstellerangabe)/Brechungsindex			
	2,55 μm / m=1,68	5,25 μm / m=1,68	11,93 μm / m=1,68	20,50 μm / m=1,59
Makro Planar d20, 90°				
Makro Planar d20, 70°				
Makro Planar 20x10, 90°				

Tab. 2: Aperturbilder von Feststoffpartikeln die mit dem Doppel Planar Objektiv aufgenommen wurden.

Objektiv Blende, ϕ	Partikeldurchmesser (Herstellerangabe)			
	2,55 μm / m=1,68	5,25 μm / m=1,68	11,93 μm / m=1,68	20,50 μm / m=1,59
Doppel Planar d20, 90°				
Doppel Planar d20, 70°				
Doppel Planar 20x10, 90°				

Die besten Ergebnisse erzielt man unter einem mittleren Beobachtungswinkel von 70°, bei Verwendung einer runden Aperturblende und bei Anwendung der Korrelation als Auswertemethode. Der Brechungsindex der Partikel/Tröpfchen muss bekannt sein, bzw. in einem anderen Experiment (siehe Ausblick) bestimmt werden.

Tab. 3: Ergebnisse der Auswertung von Aperturbildern, die mit dem Doppel Planar Objektiv aufgenommen wurden.

Doppel Planar Blende - ϕ - Auswertung	Messabweichung [%] nach Partikelgröße				Durchschnittliche Messabweichung [%]
	2.55 μm	5.25 μm	11.93 μm	20.5 μm	
d20 - 90° - Korrelation	8.8	3.6	2.4	3.1	4.5
d20 - 70° - Korrelation	1.2	4.3	2	3.4	2.7
20x10 - 90° - Korrelation	9.2	2.2	3.4	8.4	5.8
d20 - 90° - FFT	14	0.8	1.1	7.2	5.8
d20 - 70° - FFT	12	0.9	6.1	3.6	5.7
20x10 - 90° - FFT	14.3	0.7	5.7	11.3	8.0

4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Mie Scattering Imaging Methode zur Bestimmung der Tröpfchen- bzw. Partikelgröße auf einen Größenbereich bis hinunter zu 2,5 μm angewendet

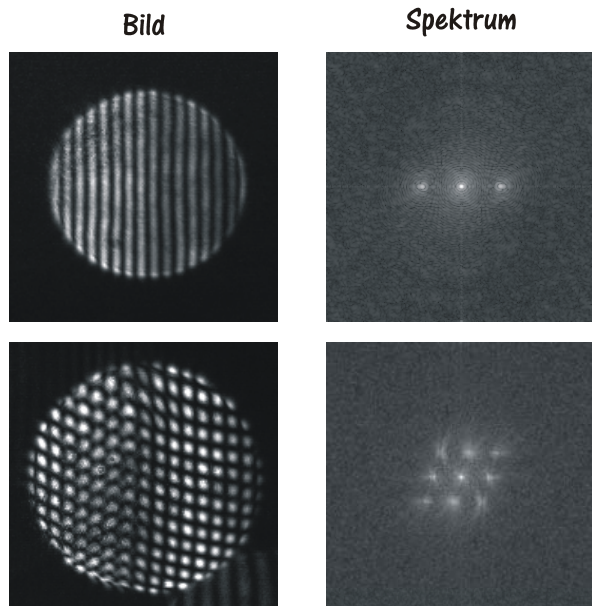


Abb. 4: Aperturbilder mit normalem Streifenmuster und mit gestörtem Streifenmuster mit Frequenzspektrum

werden kann. Die dazu zwingend erforderliche Vergrößerung des Aperturwinkels konnte mit dem sogenannten Doppel Planar Objektiv realisiert werden. Die höchste Genauigkeit bei der Auswertung konnte mit einer Korrelationsmethode erreicht werden, bei der das gemessene Intensitätsprofil mit nach der Mie Theorie berechneten Intensitätsprofilen verglichen wird.

Bei der Untersuchung der Feststoffpartikel konnten neben den erwarteten Streifenmustern (Abb. 4, oben) auch gestörte Muster (Abb. 4, unten) beobachtet werden die vermutlich das Streulicht von zusammenhängenden Partikeln zeigen. Eine systematische Untersuchung dieser gestörten Muster lässt vermutlich Schlüsse auf die Form der

Partikel bzw. die Anordnung gleichartiger Partikel als Cluster zu.

5. Ausblick

Mit dem neuartigen Doppel Planar Objektiv und der gelungenen Koordinatentransformation stehen zwei notwendige Werkzeuge zur Verfügung, die Mie Scattering Imaging Methode auch auf die Messung des Brechungsindex von Tröpfchen anzuwenden, sie also mit der Regenbogenrefraktometrie zu kombinieren [6]. Das folgende Bild (Abb. 5) zeigt Aperturbilder von Wassertröpfchen, die unter einem mittleren Beobachtungswinkel von 140° aufgenommen wurden. Die Koordinatenachsen des Beobachtungswinkels ϕ und des Polarisationswinkels ψ sind eingezeichnet. Das Intensitätsprofil bei $\psi = 90^\circ$ kann nun extrahiert und mit der Mie Theorie verglichen werden (Abb. 6). Die beste Übereinstimmung findet man bei einem Tröpfchendurchmesser von 92 μm und einem Brechungsindex von

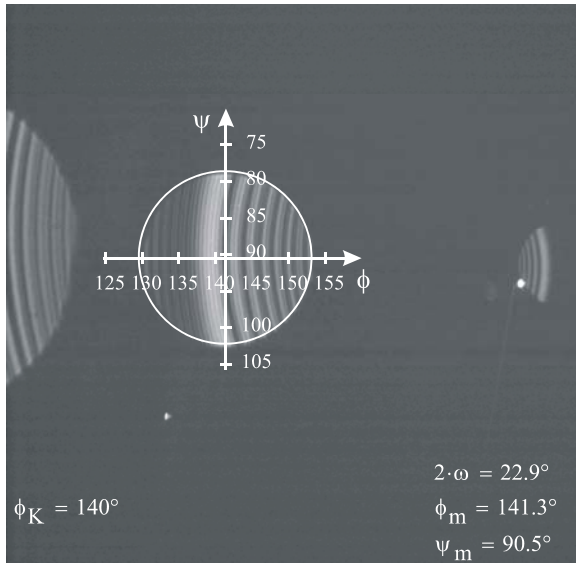


Abb. 5: Aperturbild von Wassertröpfchen, Beobachtungswinkel: 140°, Objektiv: Zeiss Doppel Planar

1,328. Der Literaturwert des Brechungsindex von Wasser beträgt bei 20°C 1,335.

Somit konnte gezeigt werden, dass die Methode im Prinzip auf die Messung des Brechungsindex von Tröpfchen angewendet werden kann. Weitere Arbeiten in dieser Richtung versprechen große Aussicht auf Erfolg.

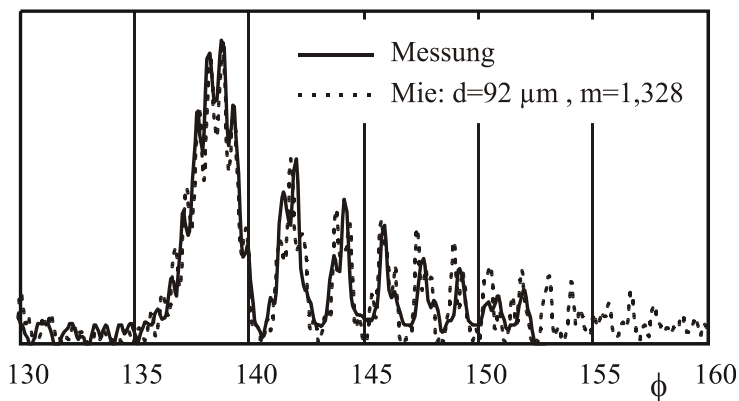


Abb. 6: Vergleich zwischen dem in Abb. 5 gemessenen und dem nach der Mie Theorie berechneten Intensitätsprofil

Acknowledgement

Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit mit der Fa. LaVision.

Literatur

- [1] **W. J. Glantschnig, S.-H. Chen.** Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation. *Appl. Opt.*, 20 (14): 2499-2509, 1981.
- [2] **A. Graßmann, F. Peters, S. Schulte.** Mie Scattering Imaging – Eine Methode zur Messung von Größe und Brechungsindex sphärischer Tröpfchen. 10. *Fachtagung GALA 2002 Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, Rostock.
- [3] **M. Maeda, Y. Akasaka, T. Kawaguchi.** Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray. *Exp. Fluids.*, 33: 125-134, 2002.
- [4] **P. Massoli, R. Calabria.** Sizing of droplets in reactive fuel by Mie scattering imaging. ILASS Europe '99, Toulouse, 1999.
- [5] **R. Ragucci, A. Cavaliere, P. Massoli.** Drop sizing by laser light scattering exploiting intensity angular oscillation in the Mie regime. *Part. Part. Syst. Charact.*, 7: 221-225, 1990.
- [6] **N. Roth.** Bestimmung des Brechungsindex in Einzeltropfen aus dem Streulicht im Bereich des Regenbogens. Dissertation. Universität Stuttgart, 1998.
- [7] **E. Schrüfer.** Signalverarbeitung. *Carl Hanser Verlag*, 1990.