

Messung irregulärer Partikel mit dem Zeitverschiebungsverfahren

Measurement of irregular particles with the time-shift technique

A. Kretschmer, N. Damaschke

Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock, arno.kretschmer@uni-rostock.de

Partikel, Messtechnik, Zeitverschiebungstechnik, Eiskristalle

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt einen neuen Aspekt des Zeitverschiebungsverfahrens und ist die Fortsetzung der letztjährigen Veröffentlichung. Vorgestellt wird das Messprinzip des Zeitverschiebungsverfahrens mit speziellem Blickpunkt auf das Prinzip zur Messung nicht-transparenter und nicht-späherischer Partikel. Der experimentelle Aufbau wird kurz erläutert. Anschließend werden erfolgreiche Messungen an Eis-/Schneepartikeln präsentiert. Diese zeigen, dass das Zeitverschiebungsverfahren, als optisches in-situ Messsystem, im Vergleich zu anderen Systemen auch in der Lage ist Partikelensembles mit irregulären Partikeln zu charakterisieren. Abschließend werden einige weiterführende Aspekte zum Zeitverschiebungsverfahren erläutert und ein Ausblick auf zukünftige Projekte mit dem Zeitverschiebungsverfahren gegeben.

Einleitung

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Messung inhomogener Partikel mittels des Zeitverschiebungsverfahrens (time-shift technique). Die Untersuchung inhomogener Partikel ist für eine Vielzahl industrieller Anwendungen von großem Interesse, wie etwa Sprühtrocknung von Lebensmittel bzw. Pulvern oder bei der Zerstäubung von mehrphasigen Lacken zur Oberflächenbeschichtung.

Für Messungen an homogenen, sphärischen und transparenten Tröpfchen existieren eine Reihe von experimentellen Aufbauten und Messsystemen. In Bezug auf das hier vorgestellte Zeitverschiebungsverfahren sind vor allem die Phasen-Doppler Technik (PD-Technik, Albrecht et al. 2003) und auch die Dual-Burst Technik (Onofri et al. 1996) als Weiterentwicklung der PD-Technik, zu nennen. Beide Techniken sind optische Zählverfahren zur in-situ Bestimmung von Partikelparametern, besitzen jedoch einige Einschränkungen.

Die Empfangsoptik muss bei der Phasen-Doppler-Messtechnik im allgemeinen in Vorwärtsstreuung angeordnet werden und erfordert somit mindestens zwei optische Zugänge. Die Nutzung der Rückwärtsstreuung würde diese Beschränkung zwar aufheben, jedoch ist PD-Technik aufgrund der Forderung der Dominanz einer Streulichtordnung nur für spezielle Brechungsindizes auf wenige Bereiche in Rückwärtsstreuung begrenzt (Damaschke et al. 2002). Eine zweite Einschränkung bezieht sich auf die Partikel. Es können nur sphärische, homogene Partikel untersucht werden. Da aber in einer Vielzahl von

Anwendungen diese Bedingungen nicht erfüllt sind, sind hier die PD Technik und die Dual-Burst Technik oft nur eingeschränkt anwendbar.

Die Zeitverschiebungstechnik wird bei den hier präsentierten Messungen in Rückstreuung betrieben. Dies bietet im Vergleich zur Phasen-Doppler Technik bei in-situ Messungen in industriellen Prozessen einen erheblichen Vorteil hinsichtlich Justage und optischer Zugänglichkeit. In den vorhergehenden Veröffentlichungen (Damaschke et al. 2002, Kretschmer et al. 2006a) wurde bereits dargestellt, wie die Zeitverschiebungstechnik für homogene, transparente und sphärische Partikel funktioniert und erfolgreiche Testmessungen wurden präsentiert.

Das grundlegende Messprinzip soll daher im Rahmen dieses Beitrags nur kurz erläutert werden und hauptsächlich auf die Signalentstehung bei irregulärer Partikeln und auf deren Messung eingegangen werden. Irregulär ist dabei sowohl als inhomogen, als auch als nicht-sphärisch zu verstehen.

Messprinzip

In Abb. 1 ist das grundlegende Prinzip des Zeitverschiebungsverfahrens gezeigt. Ein transparentes und sphärisches Partikel bewegt sich in positiver x-Richtung durch eine inhomogene Feldverteilung. Diese wird im vorliegenden Aufbau durch einen fokussierten Laserstrahl und dessen Gaußförmiges Strahlungsprofil erzeugt, wobei als Durchtrittspunkt die Strahltaile gewählt wird. Für Partikel, deren Durchmesser größer ist als die Strahltaile ist, ergeben sich bei der Beobachtung unter einem fixen Winkel verschiedene Ein- und Austrittspunkte die die unterschiedlichen Streulichtordnungen in Beobachtungsrichtung streuen. Die Feldverteilung wird nacheinander von den Eintrittspunkten in Beobachtungsrichtung abgebildet, beginnend mit der Oberflächenwelle (langer Weg), über Reflexion und Brechung zweiter Ordnung (innerer Strahl) bis zur Brechung zweiter Ordnung (äußerer Strahl) und zur Oberflächenwelle (kurzer Weg). Die Ordnungen tasten die Feldverteilung ab und es entsteht das Intensitätsbild bzw. Zeitsignal welches rechts in Abb. 1 dargestellt ist. Der Zeitversatz zwischen den einzelnen Intensitätsmaxima kann mit Hilfe der Partikelgeschwindigkeit in eine Längeninformation umgerechnet werden, die proportional zur Partikelgröße ist.

Für inhomogene oder stark irreguläre Partikel ist die Streuung nicht auf die wenigen einzelnen Streulichtordnungen mit definierten Strahlengängen beschränkt. In Abb. 2 ist

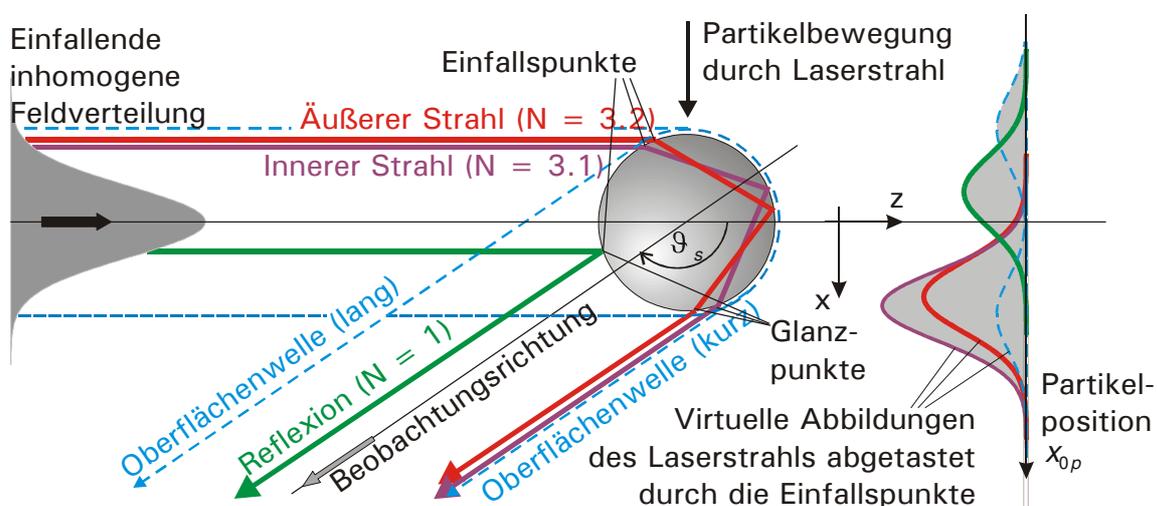


Abb. 1 Die unterschiedlichen Streulichtordnungen für ein transparentes, sphärisches Partikel bei der Beleuchtung mit einer inhomogenen Feldverteilung

schematisch die Streuung an einem stark irregulären Partikel gezeigt. Da hier die kleinskalige irreguläre Oberflächenstruktur bzw. kleine innere Inhomogenitäten den eindringenden Laserstrahl diffus streuen entstehen keine einzelnen Streulichtordnungen. Die genaue Form des Streusignals hängt von der Oberfläche und der inneren Struktur des Partikels ab.

Für ein sphärisches inhomogenes Partikel mit glatter Oberfläche, z.B. einen Milchtropfen, ist für einen einfallenden Gaußstrahl eine Überlagerung eines Gaußförmigen Signals der Reflexion mit dieser diffusen Streuung zu erwarten, da zunächst die Reflexion ungestört ist und nur die Ausbildung der höheren Streulichtordnungen im Innern des Partikels gestört wird (Damaschke et al. 2002). Bei stark unregelmäßigen Oberflächen ist keine klare Signalstruktur mehr zu erwarten.

Die Größenbestimmung bleibt aber prinzipiell möglich, da der Laserlichtschnitt vereinfacht gesehen als Lichtschranke zur Laufzeitbestimmung fungiert. Der Partikel beginnt Licht zu streuen, wenn er den Lichtschnitt erreicht und endet sobald er ihn wieder verlässt. Die so erhaltene Zeitinformation kann, ebenso wie bei transparenten und sphärischen Partikeln, mit der Geschwindigkeit dazu genutzt werden, die Partikelgröße zu bestimmen. Der Streuprozess ist allerdings nicht vollkommen identisch mit einem klassischen Lichtschrankenverfahren, da das einfallende Laserlicht durch die diffuse Streuung vom gesamten Partikel gestreut wird und nicht nur lokale Bereiche auf der Partikeloberfläche beleuchtet werden. Weiterhin bilden die Flanken des Signals das Profil, des Laserlichtschnittes ab und die Aperturfunktion verbreitert das Signal ebenfalls.

Partikelgrößen die kleiner als die Lichtschnittdicke sind, können nicht genau bestimmt werden. Diese Partikel scannen lediglich das Intensitätsprofil des Lichtschnitts und die Signallänge repräsentiert im wesentlichen die Lichtschnittdicke. Für Partikel größer als der Lichtschnitt wirkt sich dieser Effekt ebenfalls als systematischer Fehler in der gemessenen Partikelgröße aus. Dies muss im Rahmen der Auswertung berücksichtigt werden und gehört somit zur Übertragungsfunktion des Systems.

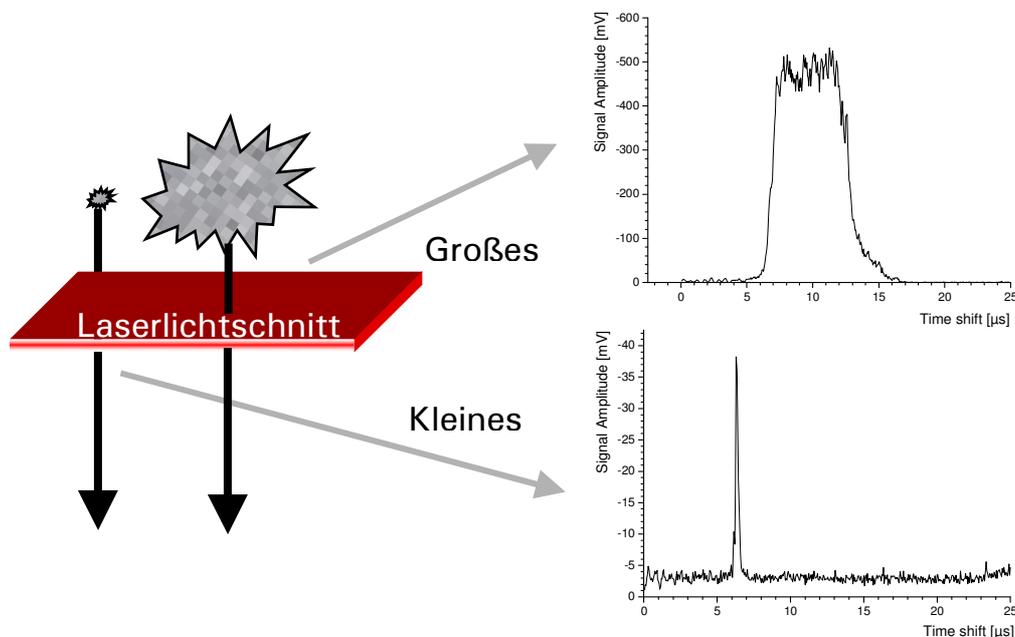


Abb. 2 Schematisches Bild für beliebige Partikel beim durchqueren des Laserlichtschnittes (links). Beispielsignale für ein großes und ein kleines Partikel (rechts).

26.4

Experimenteller Aufbau

Das verwendete Messsystem weicht nur geringfügig von dem in vorherigen Arbeiten vorgestellten Aufbau (Kretschmer et al. 2006b) ab. Er besteht im wesentlichen aus einem Laser Doppler System zur Geschwindigkeitsbestimmung und zusätzlichen Komponenten zur Realisierung des Zeitverschiebungsverfahrens. Das Laser Doppler System ist ein kommerzielles 2C Laser-Doppler System der Firma Dantec Dynamics, das mit einem Ar-Ion Laser betrieben wird und die Partikelgeschwindigkeit misst. Ein 2C System ist aufgrund der Lichtschnitteinkopplung, die unter 45° zu den Laserstrahlebenen erfolgt notwendig. Die Fokussierung aller Laserstrahlen erfolgt durch die Frontlinse der Sendeoptik mit einer Brennweite von $f=160\text{mm}$. Der zweite Teil des Aufbaus dient der Erzeugung des Laserlichtschnittes und der Detektion der Zeitverschiebungssignale der verschiedenen Streulichtordnungen. Verwendet wird hierfür ein Helium-Neon Laser mit 30mW der nach Kollimation und zylindrischer Strahlaufweitung in die LD Einheit eingekoppelt wird. Mittels der Fronlinse der Sendeoptik erfolgt die Fokussierung zur Erzeugung des Laserlichtschnittes. Bei den präsentierten Messungen betrug die Lichtschnittdicke $25\mu\text{m}$. Die Signale werden mit zwei symmetrisch zur optischen Achse angeordneten Optiken auf PMs (Photomultiplier) abgebildet und die Signale mit einer A/D-Wandlerkarte digitalisiert. Durch die Nutzung von zwei symmetrischen Detektoren eröffnet sich für sphärische Partikel auch die Möglichkeit, Partikelgrößen zu bestimmen die unterhalb der Lichtschnittdicke liegen (Albrecht et al. 1993; Borys 1996). Für Messungen an stark irregulären Partikeln entfällt dieser Vorteil, da sich keine separaten Streulichtordnungen ergeben. Eine Verwendung von zwei PM's erschien für die durchgeführten Messungen trotzdem sinnvoll, da durch der Vergleich der Signale der beiden PMs eine zusätzliche Validation vorgenommen werden konnte.

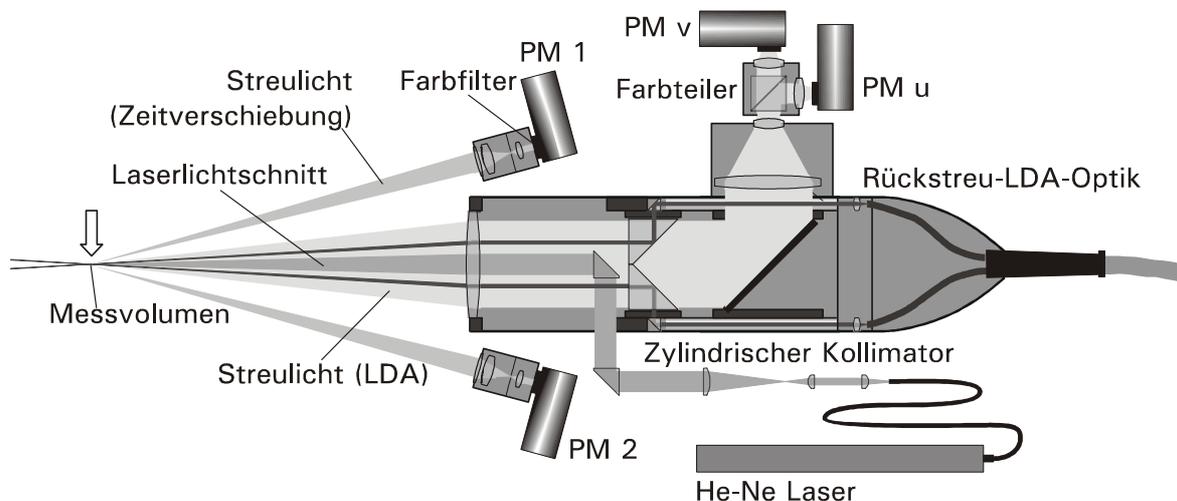


Abb. 3 Schematischer Aufbau des Zeitverschiebungsverfahrens für die Messung inhomogener Partikel.

Eiskristallmessungen

Hintergrund der durchgeführten Messungen war die Kristallisation von Eiskristallen in Klimaaggregaten nach der Ansaugung von feuchter Luft. Die hier präsentierten Messungen sind in-situ an einem Freistrahlnach dem Klimaaggregat durchgeführt worden. Bestimmt werden sollten im Rahmen der Messungen, welche Partikelarten in der Strömung vorliegen und welche Partikelgrößenverteilungen sich ergeben. Hierzu wurden zwei Konfigurationen

mit unterschiedlich starker Feuchte der angesaugten Luft und damit unterschiedlicher Eiskristallgenerierung vermessen.

Mögliche Partikel, die sich in der Strömung befinden können, sind Eiskristalle, Schnee, Wasser oder unterkühltes Wasser. Auf Grund der oben beschriebenen Unterschiede zwischen Signalen homogener sphärischer Partikel und irregulärer bzw. inhomogener Partikel, kann mittels der Zeitverschiebungssignale zwischen Wasseranteilen und Eis-/Schneeanteilen unterschieden werden. Die typische Signalform für Wassertropfen war nicht zu beobachten und es konnte davon ausgegangen werden, dass das gesamte kondensierte Wasser beim verlassen des Rohsystems gefroren war.

In Abb. 4 sind die Partikelgrößenverteilungen für die zwei verschiedenen Einstellungen des Klimaaggregats gezeigt. Für beide Experimente wurden dieselben Parameter des Messsystems verwendet. Der größte Teil der Partikeldurchmesser liegt unterhalb von $50\ \mu\text{m}$. Dies stimmt mit den visuellen Beobachtungen der Strömungen überein, die jedoch nur einen qualitativen Eindruck vermittelten. Es wurden aber auch Partikel gemessen die einen deutlich größeren Durchmesser aufwiesen. Auch dies war nach ersten Beobachtungen zu erwarten, da sich während der Versuchszeit immer wieder größere Eis-/Schneeagglomerate ablösten.

Da, wie oben beschrieben, Partikel kleiner als die Lichtschnittdicke nicht aufgelöst sondern nur detektiert werden können, müssten korrekterweise die unteren zwei Klassen zusammengefasst werden, da die Lichtschnittdicke bei $25\ \mu\text{m}$ lag. Eine quantitative Aussage über das Verhältnis von großen und kleinen Partikeln ist aber möglich.

Beim Vergleich der beiden Betriebskonfigurationen ist zu beobachten, dass für höhere Feuchte eine Verschiebung der Partikelgrößen hin zu größeren Partikeln auftritt. Dieses Ergebnis konnte erwartet werden, da die angesaugte Luft bei diesen Messungen eine größere Menge Wasser enthielt. Noch deutlicher ist dieser Unterschied zwischen beiden Betriebszuständen bei den Größenverteilungen in Abb. 5 zu erkennen. Bei diesen Messungen wurden bei denselben Betriebszuständen des Klimaaggregats die in Abb. 4 dargestellt sind, zwei weitere Messreihen mit erhöhtem Triggerlevel von 100mV durchgeführt.

Der Vergleich der beiden Betriebskonfigurationen weist dieselbe Verschiebung zu größeren Partikeln für den High-Flow Fall auf. Zusätzlich ist die Anzahl der detektierten Partikel im High-Flow Fall deutlich größer.

Zwei Aspekte bleiben einschränkend zu erwähnen. In den vorliegenden Ergebnissen ist der bereits beschriebene systematische Fehler, der aus der Lichtschnittdicke resultiert nicht korrigiert. Auf Grund der geringen Lichtschnittdicke im Vergleich zu den gemessenen Partikeldurchmessern ändert dieser Fehler nichts an der grundsätzlichen Partikelgrößenverteilung sondern erzeugt im wesentlichen eine konstante Verschiebung hin zu größeren Partikeln.

Der zweite einschränkende Aspekt betrifft den Vergleich der Abb. 4 und Abb. 5 bei gleichem Betriebszustand, also beispielsweise den beiden High-Flow Fällen jeweils rechts in den Abbildungen. Für die Konfiguration mit dem höheren Triggerlevel ist die Zahl der detektierten Partikel deutlich geringer. Dies resultiert daraus, dass kleine Partikel weniger Licht streuen als große Partikel und somit bei höherem Triggerlevel nicht detektiert werden. Dies bewirkt in der Größenverteilung zwei Effekte.

Zum einen ist das System für kleine Partikel, deren Signale die Detektionsschwelle nie erreichen blind. Deutlich wird dies am Einbruch der Verteilung für den High-Flow Fall in Abb. 5 für Partikel kleiner als $50\ \mu\text{m}$. Die in der Abbildung verbleibenden restlichen Signale mit Größen kleiner als $50\ \mu\text{m}$ könnten weiterhin durch irregulären Eiskristalle entstehen, die aufgrund von z.B. ebenen Kristallflächen nur kurzzeitig Licht in die angegebene Detektorrichtung streuen.

26.6

Zum anderen wird die Anzahl der kleinen aber noch detektierbaren Partikel unterschätzt. Zu erkennen ist dies am Rückgang der Partikelanzahl für den High-Flow Fall in Abb. 5 hin zu kleinen Partikeln im Bereich von 50µm bis 100µm. Die "wahre" Partikelgrößenverteilung, müsste hier, ähnlich wie bei der Phasen-Doppler Technik, durch Korrektur des Detektionsvolumens des Systems rekonstruiert werden (Albrecht et al. 2003).

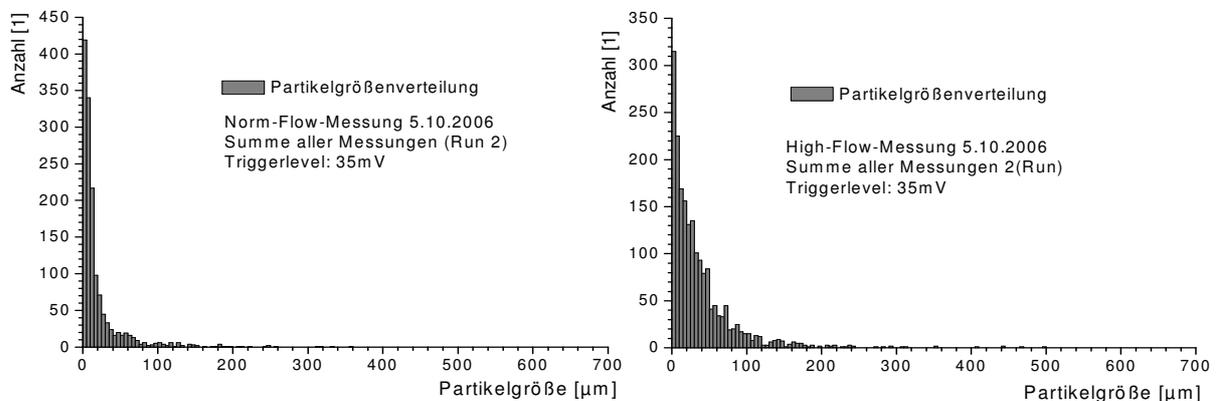


Abb. 4 Histogramm der Partikelgrößenverteilung für Norm-Flow links und High-Flow rechts. Verwendet wurde ein kleiner Triggerlevel für die Zeitverschiebungssignale von 35 mV.

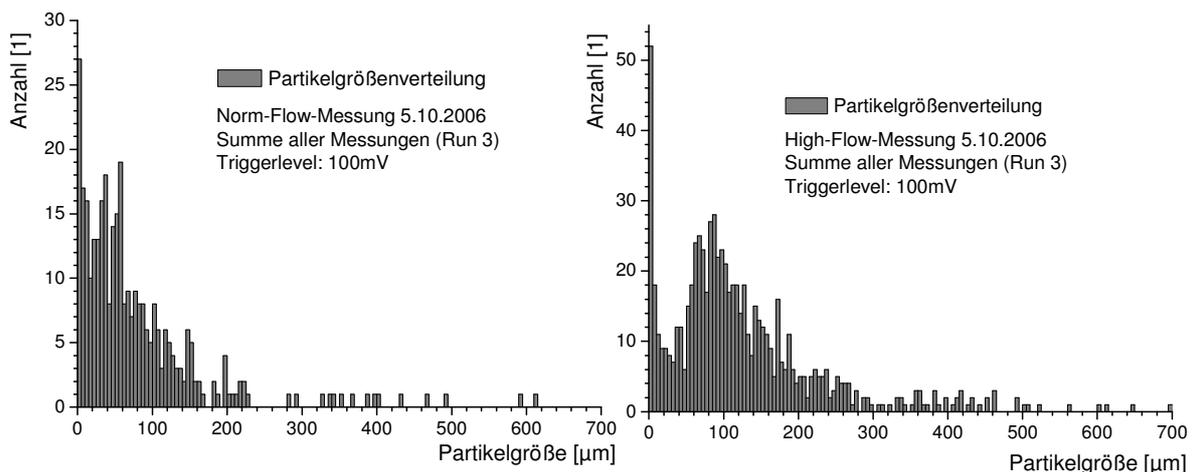


Abb. 5 Histogramm der Partikelgrößenverteilung für Norm-Flow links und High-Flow rechts. Verwendet wurde ein höherer Triggerlevel von 100 mV.

Zusammenfassung und Ausblick

Die präsentierten Ergebnisse zeigen die Anwendbarkeit für das Zeitverschiebungsverfahren zu Messung irregulärer Partikel. Für vergleichbare quantitative Messungen der Partikeldurchmesserstatistik ist, wie auch bei anderen Zählverfahren, die Detektionsvolumengröße in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser zu bestimmen. Die präsentierten Messungen sollen zukünftig unter diesem Gesichtspunkt erneut ausgewertet werden. Eine verbesserte Signal- und Datenverarbeitung soll in diesem Zusammenhang ebenfalls erstellt werden, die systematische Fehler besser berücksichtigt.

Veränderungen sollen ebenfalls am Aufbau vorgenommen werden. Der bisherige Aufbau ist aufgrund eines relativ hohen Justageaufwandes für industrielle Messungen schlecht

geeignet. Hier soll eine einfachere robuste Konstruktion erstellt werden, die sich an den Vorteilen der Rückstreuung und des monolithischen Aufbaus orientiert.

Literatur

- Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., and Tropea C. (2003) *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer-Verlag.
- Albrecht H.-E., Borys M., and Hübner K. (1993) Generalized theory for the simultaneous measurement of particle size and velocity using laser Doppler and laser two-focus methods. *Part. Part. Syst. Character.* **10**: 138-145.
- Borys M. (1996) *Analyse des Amplituden- und Phasenverhaltens von Laser-Doppler-Signalen zur Größenbestimmung sphärischer Teilchen*. Dissertation Thesis, Universität Rostock, Rostock.
- Damaschke N., Nobach H., Semidetnov N., and Tropea C. 2002. Optical particle sizing in backscatter, p. 22-01. 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.
- Kretschmer A., Damaschke N., Semidetnov N., and Tropea C. (2006a) Application of the Time-Shift Technique for Spray Measurement. p. 10-02. Proceedings of 13th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon Portugal.
- Kretschmer A., Damaschke N., Semidetnov N., and Tropea C. (2006b) Experimentelle Verifikation des Zeitverschiebungsverfahrens im Vergleich zur Phasen Doppler Technik. *In* D. Dopheide, H. Müller, V. Strunck, B. Ruck and A. Leder [eds.], Proceedings of 14. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik (GALA), Braunschweig Germany.
- Onofri F. and others (1996) Phase-Doppler Anemometry with the Dual Burst Technique for measurement of refractive index and absorption coefficient simultaneously with size and velocity. *Part. Part. Syst. Character.* **13**: 112-124.