

Phasen-Doppler-Anemometrie bei Zerstäubung von Prozessfluiden in der Sprühtrocknung

P. Menn, G. Schulte, U. Fritsching

Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik / Fachgebiet Verfahrenstechnik
Badgaster Str. 3, D – 28359 BREMEN, DEUTSCHLAND
Tel.: +49 (0) 421 / 218 - 2791, E-Mail: gs@iwt.uni-bremen.de

1. Einleitung

Die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) ist seit Jahren ein fest etabliertes Messverfahren zur Untersuchung von Mehrphasenströmungen im Hinblick auf eine simultane Bestimmung von Tropfengröße und -geschwindigkeit [1]. Probleme für diese Laser-messtechnik entstehen immer dann, wenn die Voraussetzungen zum erfolgreichen Einsatz wie z.B. eine geringe Partikelkonzentration im Bereich des Messvolumens und die optische Homogenität des zu analysierenden Fluids nicht ideal erfüllt sind [2-3]. Bei gewöhnlichen Sprühtrocknungsanwendungen sind gerade diese beiden Voraussetzungen oft nur schlecht erfüllt. Zum einen verursachen die eingesetzten Hochdruckdüsen eine sehr hohe Partikelkonzentration in der gesamten Spraystruktur, zum anderen werden in der Sprühtrocknung optisch extrem inhomogene Fluide wie Emulsionen zerstäubt. Beide Faktoren haben somit einen starken negativen Einfluss auf eine abgesicherte Anwendbarkeit der PDA-Messtechnik.

In dieser Arbeit werden experimentelle Ergebnisse vorgestellt, die sich bei der Untersuchung von industriell verwendeten Hochdruck-Hohlkegeldüsen, betrieben bei 200-220 bar mit entsprechenden Volumenströmen von $450-620 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$, ergeben. Neben Wasser als Modellfluid werden auch Sprays von industriell relevanten Prozessfluiden mit der PDA analysiert. Zudem werden weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen zur PDA an inhomogenen Fluiden durchgeführt.

2. Versuchsaufbau

Die Zerstäubungsexperimente wurden in einer speziellen Sprühkammer durchgeführt. Abb. 1 zeigt das Fließschema der gesamten Anlage.

Die zu zerstäubende Flüssigkeit wurde in einen beheizbaren Vorratsbehälter mit Rührer gefüllt. Anschließend wurde das Fluid über eine Kreiselpumpe und eine nachgeschaltete Hochdruckpumpe in die Düsenlanze gefördert und durch eine Einstoffdüse zerstäubt. Die aufgefangene Flüssigkeit wurde dann über eine zusätzliche Kreiselpumpe wieder in den Vorratsbehälter zurück gefördert. Mehrere Kontrolleinheiten wie ein Hochdruck-Massendurchflussmesser, diverse Manometer und Temperatursensoren wurden in die Fluidleitungen integriert, um den Zerstäubungsprozess zu überwachen und zu reproduzieren. Drei Sichtscheiben an den Seiten der Sprühkammer ermöglichten einen Zugang für optische Messtechniken.

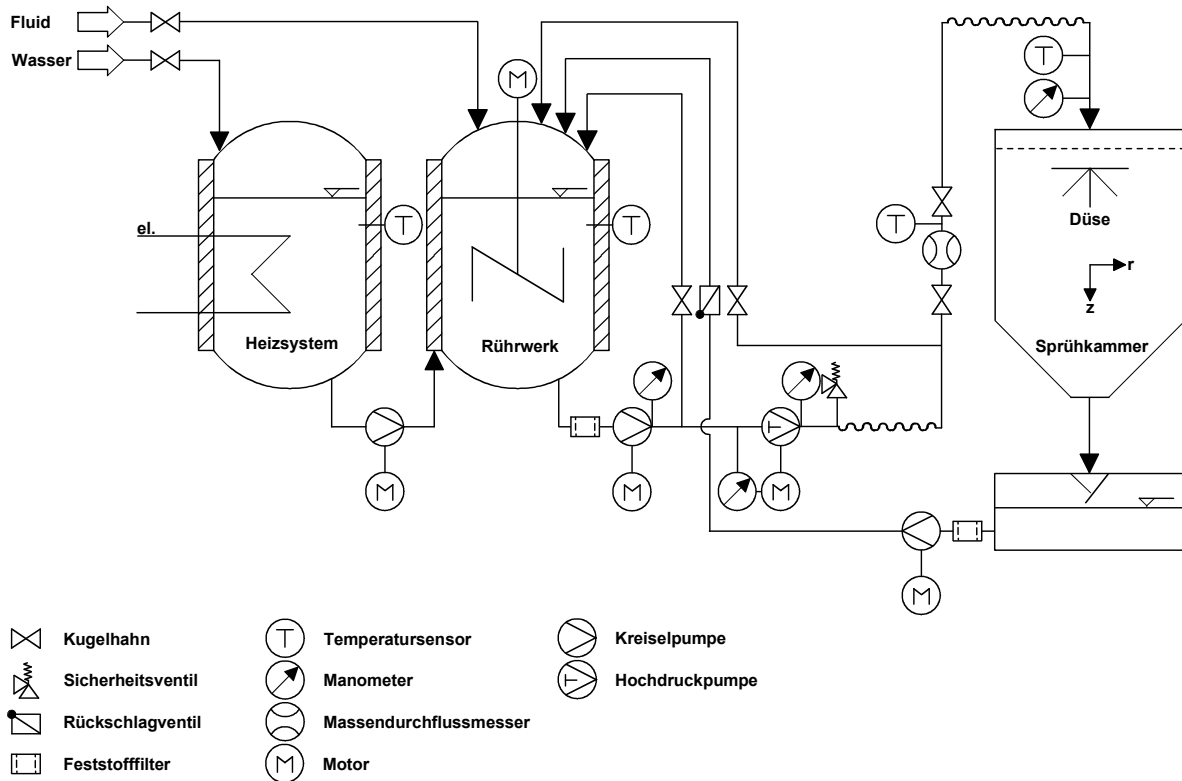


Abb. 1: Fließschema der Zerstäubungsanlage

In den hier vorgestellten Untersuchungen wurden Hohlkegeldüsen (Spraying Systems, Sprühtrocknungsdüse Typ SB) mit unterschiedlichen Wirbelkörpern und Düsenereinsätzen analysiert. Weitere Details zu den Düsenkomponenten und die zugehörigen Betriebsbedingungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Düsentyp	SB	SB	SB	SB	SB
Wirbelkörper Nr.	32	625	625	27	27
Düsenereinsatz Nr.	52	50	53	46	48
Durchmesser Düsenplatte [mm]	1.61	1.77	1.51	2.05	1.93
Betriebsruck [bar]	200	200	200	220	220
Volumenstrom [$l \cdot h^{-1}$]	618	554	448	540	494
Temperatur [$^{\circ}C$]	19	19	19	19	19

Tabelle 1: Eingesetzte Hohlkegeldüsen und Betriebsbedingungen

Für eine differenzierte Analyse der resultierenden Sprays im Hinblick auf Tropfen-größe und -geschwindigkeit wurde ein Standard-PDA-Messsystem (Phasen-Doppler-Anemometer) an die Sprühkammer adaptiert. Abb. 2. zeigt zwei Skizzen des Versuchsaufbaus mit dem adaptierten PDA-System. Der Laser und der Empfänger des PDA-Systems befanden sich auf gegenüberliegenden Seiten der Sprühkammer unter einem off-axis-Winkel von $\varphi = 28,5^{\circ}$. Die Position des Messvolumens blieb für alle Messungen unverändert im horizontalen Zentrum der Sprühkammer und unterhalb des als Blende dienenden Schlitzes eines die Laserstrahlen ummantelnden Rohrs. Die Blende hatte eine Breite von 10 mm. Die Rohrkonstruktion konnte in die Sprühkammer eingesetzt werden, um die Partikelkonzentration im Strahlengang außerhalb des Messvolumens zu reduzieren. Somit hatte die Rohrkonstruktion die Funktion ei-

nes „Spraysplitters“. Mit Hilfe von manuellen Traversiereinheiten wurde die Position der Düse vertikal und horizontal verstellbar. Hierdurch konnten auch die Positionen des PDA-Messvolumens in der Spraystruktur variiert werden.

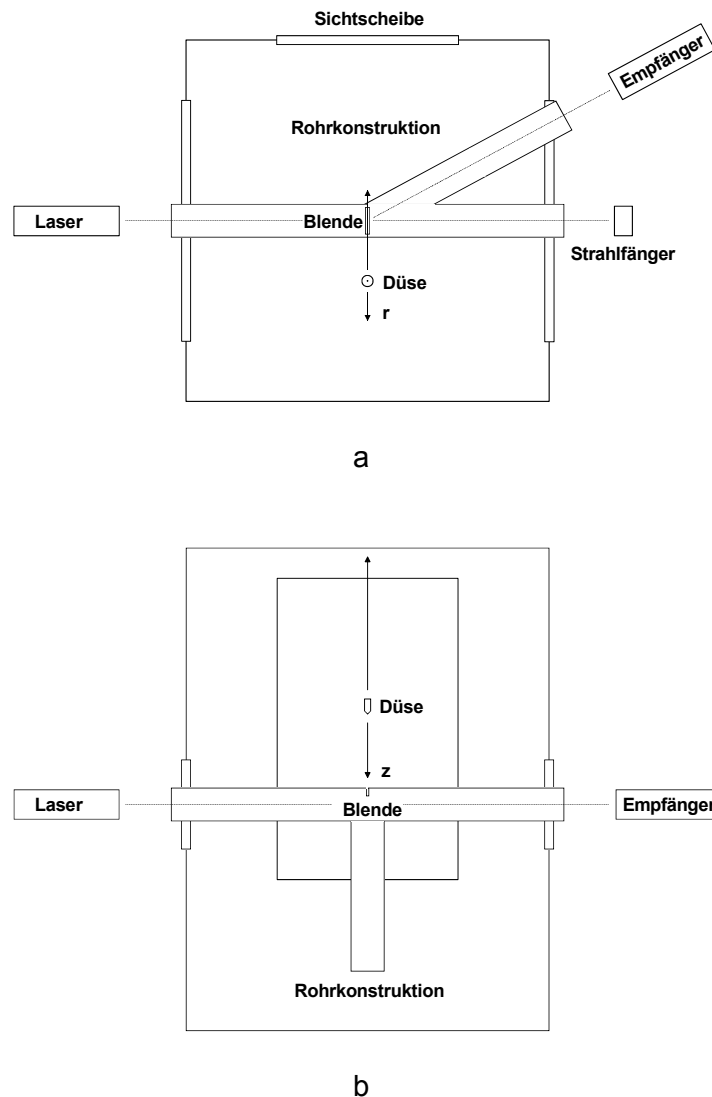


Abb. 2: Versuchsaufbau mit adaptierter PDA-Messtechnik, Draufsicht (a), Seitenansicht (b)

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Partikelkonzentration

Ein wesentliches Problem bei der Untersuchung von Sprühtrocknungsdüsen mit hohen Volumenströmen besteht in der sehr hohen Partikelkonzentration in der gesamten Spraystruktur. Ohne „Spraysplitter“ war es nicht möglich, unverfälschte PDA-Messungen an Positionen innerhalb des Sprühkegels durchzuführen [2]. Abb. 3 zeigt beispielhaft eine Messung im Zentrum des Sprays ohne dieses Hilfsmittel für eine Düsenkombination (SB 32/52, Fluid: Wasser, Druck: 200 bar, Volumenstrom: $617 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$, Dichte: $1096,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, Temperatur: $20,4^\circ \text{ C}$).

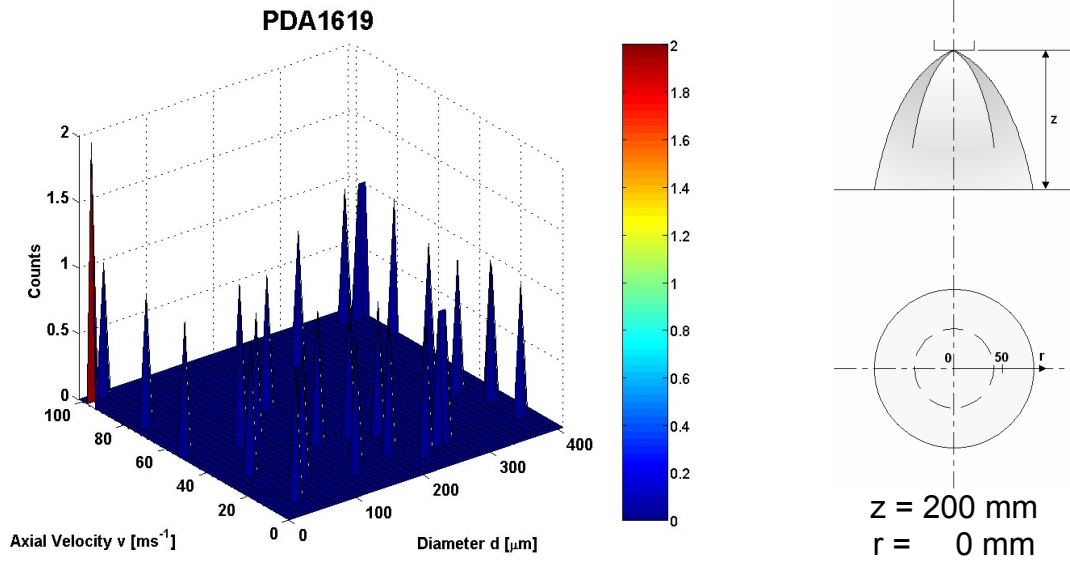


Abb. 3: PDA-Anzahlhäufigkeitsverteilung im Zentrum des Wasser-Sprays ohne „Spraysplitter“

Aus Abb. 3 geht ganz deutlich hervor, dass es sich hierbei um eine Fehlmessung handelt, die nicht weiter ausgewertet werden kann. Insgesamt sind nur 30 Doppler-Bursts als „Partikeln“ an dieser Position detektiert worden, es ergeben sich darüber hinaus völlig unrealistische „Tropfengrößen und -geschwindigkeiten“. Ursache für diese Fehlmessung sind Mehrfachstreuungseffekte durch Partikeln außerhalb des PDA-Messvolumens, sowohl zwischen Laser und Messvolumen als auch zwischen Messvolumen und Empfänger.

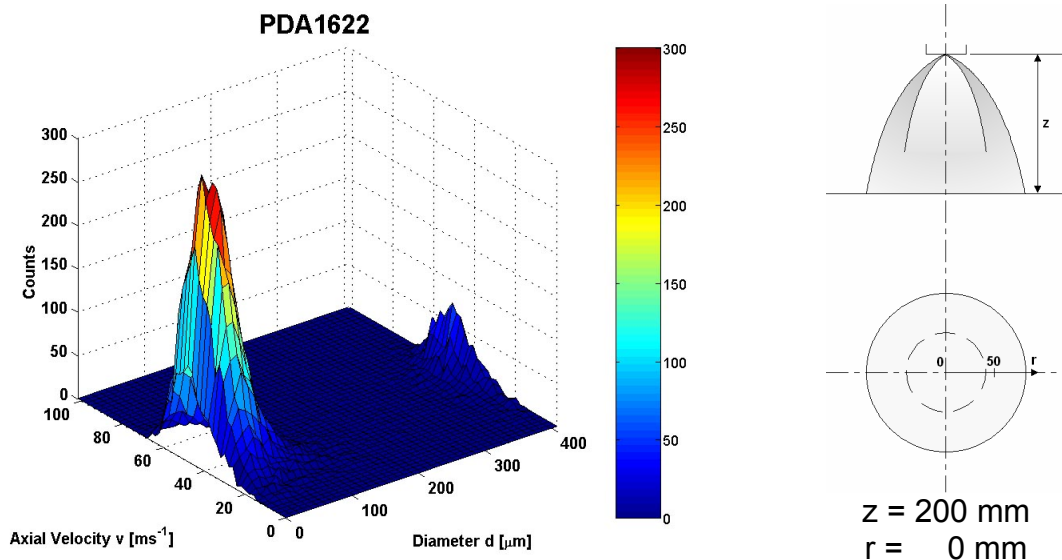


Abb. 4: PDA-Anzahlhäufigkeitsverteilung im Zentrum des Wasser-Sprays mit „Spraysplitter“

Verwendet man für die gleiche PDA-Analyse eine spezielle Rohrkonstruktion, die als „Spraysplitter“ die Funktion einer Blende in dem Spray übernimmt, kann man auch Düsen mit hohen Volumenströmen mit Hilfe der PDA untersuchen. Die Blende schneidet dabei einen kleinen Bereich von 10 mm Breite und 60 mm Länge aus dem Sprühkegel aus, ohne die Strömungsverhältnisse im Messvolumen signifikant zu stö-

ren. Abb. 4 zeigt eine PDA-Messung unter gleichen Bedingungen wie in Abb. 3 mit zusätzlich eingesetzter Rohrkonstruktion. In diesem Fall sind insgesamt 17693 Partikeln detektiert worden, und es ergibt sich eine realistische Tropfengrößen- und Geschwindigkeitsverteilung. Die Partikeln am oberen Größenmessbereich ergeben sich aufgrund mehrerer störender Effekte wie z.B. nach wie vor hohe Partikelkonzentration, gaußförmige Laser-Intensitätsverteilung, Trajectory- und Slit-Effekt, deformierte Tropfenform, usw., die sich miteinander überlagern und zu einer systematischen Streuung des Messwertes Phasendifferenz führen. Als Folge davon werden diese Partikeln in falsche Durchmesserklassen eingeordnet. Die zugehörigen Verteilungen müssen für weitere Auswertungen nachbearbeitet und korrigiert werden.

3.2. Inhomogene Medien

Das Problem der Mehrfachstreuungseffekte beschränkt sich nicht nur auf Partikeln außerhalb des Messvolumens, sondern tritt auch bei der Untersuchung inhomogener Medien, z.B. Emulsionen wie Milch, mit Hilfe der PDA auf. Abb. 5 soll diesen Sachverhalt qualitativ am Beispiel eines homogenen und eines inhomogenen Tropfens demonstrieren.

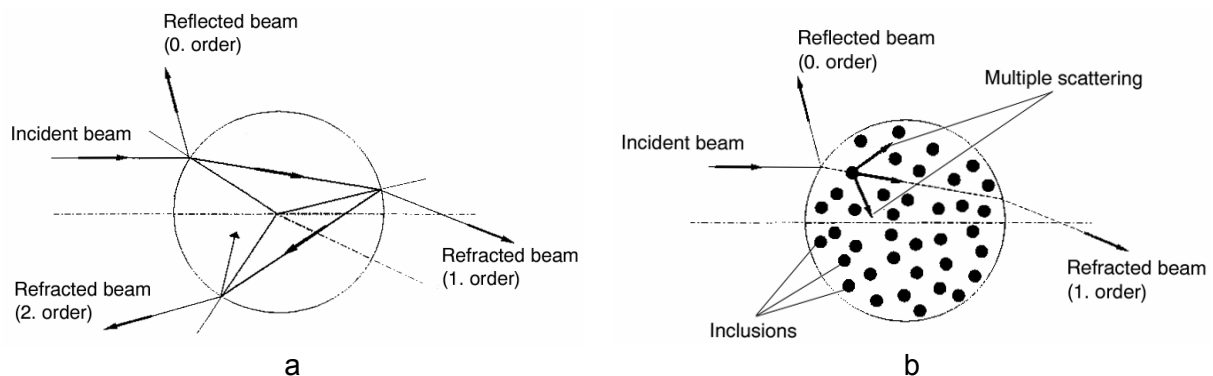


Abb. 5: Streulichtentstehung bei homogenen (a) und inhomogenen (b) Tropfen

Als Folge dieser Mehrfachstreuung innerhalb des zu vermessenden Tropfens streut der Messwert Phasendifferenz für jede Tropfengröße systematisch gaußförmig um den tatsächlichen Phasendifferenzwert. Die Phasendifferenz ist in diesem Fall zusätzlich abhängig von den Eigenschaften der Einschlüsse, wie Konzentration, Durchmesser, Form, Orientierung, Position, Brechungsindex, usw. Momentan ist man allerdings noch nicht in der Lage, die Störung dieser einzelnen Einflussfaktoren zu quantifizieren.

3.3. Sprays

Betrachtet man nun ein Prozessfluid-Spray, so überlagern sich die beiden zuvor beschriebenen Effekte. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen zwei experimentell ermittelte PDA-Anzahlhäufigkeitsverteilungen im Wasser- bzw. Prozessfluid-Spray bei ansonsten annähernd gleichen Betriebsbedingungen (SB 27/46, Druck: 220 bar, Volumenstrom: 538 / 535 l·h⁻¹, Dichte: 1102,4 / 1201,3 kg·m⁻³, Temperatur: 20,4° / 66,6 C).

Zusätzlich sind in Tabelle 2 die für die Zerstäubung relevanten Stoffwerte der beiden Fluide bei einem relativen Druck von 0 bar und die Brechungsindices aufgeführt.

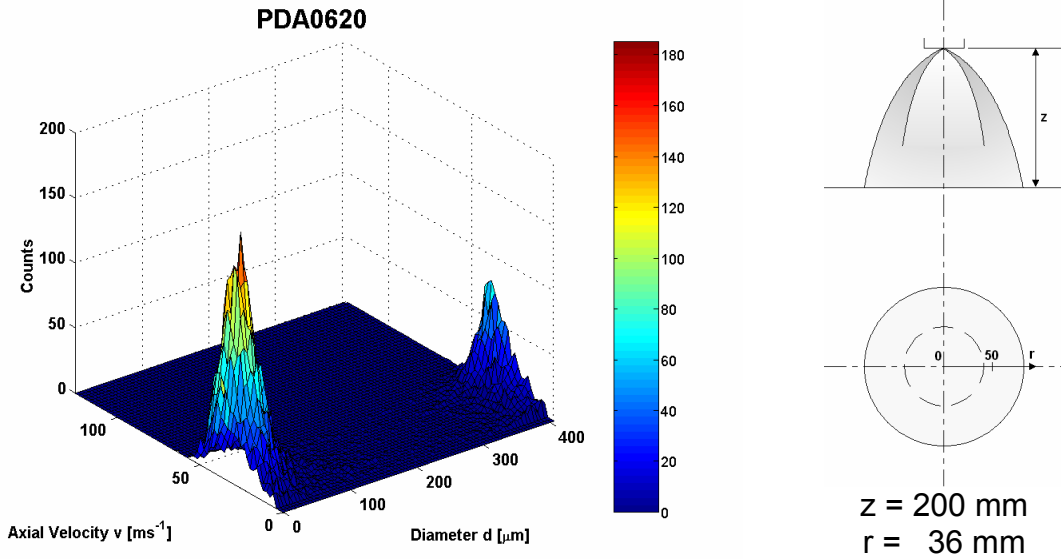


Abb. 6: PDA-Anzahlhäufigkeitsverteilung im Wasser-Spray

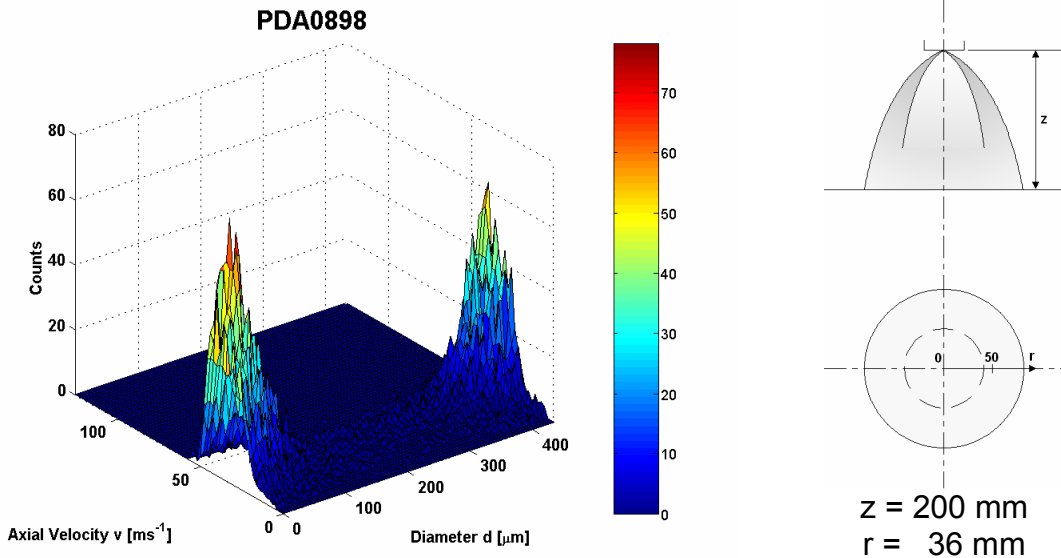


Abb. 7: PDA-Anzahlhäufigkeitsverteilung im Prozessfluid-Spray

Fluid	Wasser	Prozessfluid
Dichte [kg·m ⁻³]	998,2	1118
Oberflächenspannung [mN·m ⁻¹]	72,8	42,2
Dyn. Viskosität [mPa·s]*	1	16
Brechungsindex (λ = 632,8 nm)	1,3318	1,3924

Tabelle 2: Stoffwerte (* Schergeschwindigkeit: 1000 s⁻¹, Rotationsviskosimeter)

In Abb. 6 erkennt man wieder am oberen Rand der Durchmesserverteilung die aufgrund der in Abschnitt 3.1. beschriebenen Effekte fehlerhaft eingeordneten Partikeln.

Die gemessene Anzahlhäufigkeitsverteilung im Prozessfluid-Spray (Abb. 7) lässt sich erklären, wenn man die in Abschnitt 3.2. beschriebene Streuung der Phasendifferenz aufgrund der optischen Inhomogenität auf jede Durchmesserklasse überträgt. In diesem Fall wird, ausgehend von der Verteilung im Wasser-Spray, die Durchmesser-Verteilung noch „breiter“, natürlich auch bei den fehlerhaft eingeordneten Partikeln am oberen Rand des Größenmessbereiches. Für eine korrekte Bilanzierung der Zerstäubungsprozesse müssen beide PDA-Ergebnisse für Wasser und Prozessfluid noch nachbearbeitet werden. Hiervon ist allerdings nur die Durchmesser-Verteilung betroffen, da die Geschwindigkeitsmessung erwartungsgemäß unbeeinflusst von den optischen Inhomogenitäten bleibt [3]. Für beide Fluide ergeben sich identische Geschwindigkeitsverteilungen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In den vorgestellten Untersuchungen wurde gezeigt, wie typische Sprühtrocknungs-düsen mit hohen Volumenströmen messtechnisch mit Hilfe der PDA analysiert werden können. Mit einer speziellen Rohrkonstruktion als „Spraysplitter“ konnte die Partikelkonzentration in der Umgebung des Messvolumens so weit reduziert werden, dass realistische PDA-Ergebnisse ab einer Entfernung von mindestens 200 mm zur Düse erzielt wurden. Aufgrund mehrerer überlagerter Störeffekte ergaben sich jedoch noch fehlerhaft eingeordnete Partikeln am oberen Rand des Größenmessbereiches. Weitere Untersuchungen zur PDA an inhomogenen Fluiden zeigten, dass die Größenmessung zusätzlich systematisch gaußförmig um den tatsächlichen Durchmesser streut. Für weitere Auswertungen müssen daher die PDA-Resultate sowohl von homogenen Wasser- als auch von inhomogenen Prozessfluid-Sprays nachbearbeitet und korrigiert werden. Hierfür bietet sich ein bereits bei anderen Anwendungen erfolgreich eingesetzter Entfaltungsalgorithmus an [3-4].

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden von der Europäischen Gemeinschaft finanziert im Rahmen des Programms „Competitive and Sustainable Growth“, Forschungsprojekt EDECAD: Efficient DEsign and Control of Agglomeration in spray Drying machines, Vertragsnummer G1RD-CT-2000-00340, <http://www.edecad.com>.

Literatur

- [1] Bauckhage, K.; Flögel, H.; Fritsching, U.; Hiller, R. *Part. Part. Syst. Charac.* 5 part I 16-22, part II 66-71, 1988
- [2] Sultan, G. *PDA-Messungen in „optisch dichten“ Sprays: Störungen der Signaldetektion und deren Auswirkung auf ermittelte Verteilungen* (Aachen: Shaker), 2001
- [3] Mitschke, M. *PDA-relevante Streulichteigenschaften: Phänomene, Parameterwahl und mathematische Korrektur* (Fortschritt-Berichte VDI), 2000
- [4] Tillwick, J. *Einsatz der PDA-Messtechnik zur Charakterisierung des Sprühkompaktierprozesses bei der Zerstäubung von Metallschmelzen* (Dissertation Universität Bremen; 1999)