

ZERSTÄUBUNG VON PROZESSFLUIDEN: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG MITTELS PDA UND MATHEMATISCHE AUFBEREITUNG DER ERGEBNISSE

Patrick Menn¹ und Günther Schulte
Fachgebiet Verfahrenstechnik, Universität Bremen

Zusammenfassung

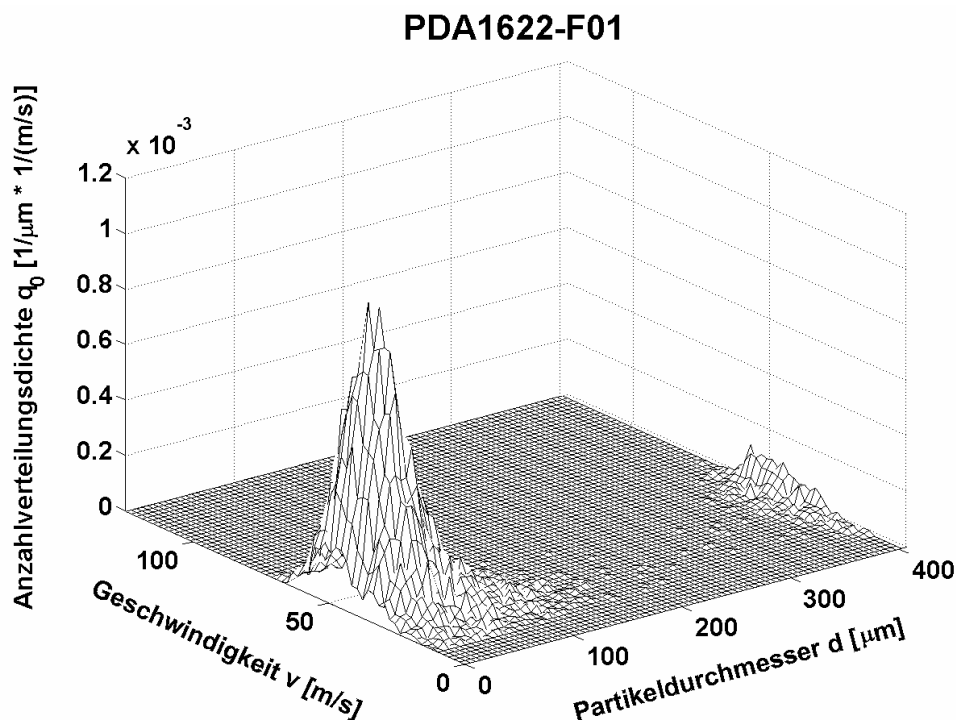
Der Einsatz von Standard-PDA-Aufbauten zur Messung in Sprays von Prozessfluiden unter anwendungsrelevanten Bedingungen führt insbesondere im Hinblick auf die ermittelten Partikeldurchmesser und alle damit korrelierten Verteilungen und Kennwerte oft zu systematisch fehlerbehafteten Ergebnissen, da sich als Folge der „schwierigen“ Messbedingungen eine signifikante Streuung der Phasendifferenz-Messwerte ergibt. Dies resultiert nicht nur in zu breiten Tropfengrößenverteilungen. Die Streuung führt auch zu negativen Phasendifferenz-Messwerten, die nicht durch die vorgegebene Phasendifferenz-Tropfengrößenkorrelation definiert sind, aber bei der internen Umrechnung als scheinbar sehr große Partikeln an die obere Grenze des PDA-Tropfengrößenmessbereichs transferiert werden. Die Ursachen für die Streuphänomene liegen in „Bias-Effekten“ hervorgerufen namentlich durch optische Inhomogenitäten der Versuchslüssigkeiten, eine hohe Partikelkonzentration in der Spraystruktur und eine hohe PDA-Systemempfindlichkeit. Die ermittelten Informationen sind in dieser fehlerbehafteten Form nicht für eine Charakterisierung der Sprays und auch nicht als Startdaten für nachfolgende Simulationsrechnungen geeignet. Daher werden Nachbearbeitungs-Algorithmen benötigt, um die fehlerhaften PDA-Messdaten zu korrigieren und den Sprayzustand korrekt zu beschreiben. Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wurden die oben genannten Störeffekte zunächst experimentell untersucht und analysiert, sowohl als Einzelphänomene getrennt voneinander als auch überlagert. Dabei zeigt sich, dass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) sich sehr gut als Parameter zur Beschreibung der Messbedingungen eignet, mit dessen Hilfe auch die Streuung der Messwerte theoretisch nachvollzogen werden kann. Die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen und der theoretischen Deutung zur Streuung der Messwerte führten zur Formulierung und Implementierung von zwei neuen Nachbearbeitungsalgorithmen für PDA-Ergebnisse, den Algorithmen EvoFit und EvoFalt, die auf einer mehrgliedrigen Evolutionsstrategie basieren. Mit ihnen wird auf der Basis der Messdaten eine schnelle und zuverlässige Anpassung der vorzugebenden parametrischen Verteilungsfunktionen an die realen Größenverteilungen erreicht. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse erscheint eine zuverlässige Charakterisierung von Sprays auch auf Grundlage biasbehafteter PDA-Messdaten sehr gut möglich.

BIAS-Effekte und Streuung von PDA-Messgrößen

Als PDA-BIAS bezeichnet man systematische Fehler bzw. systematische Messabweichungen, die sich bei der Analyse von Partikelkollektiven mit PDA-Systemen ergeben. Bekannte BIAS-Effekte sind z.B.

¹ Seit November 2004: DaimlerChrysler AG, Produktionsplanung Mercedes-Benz Pkw, Stuttgart

der „trajectory“- bzw. „Gaussian beam“- Effekt,
 der „slit“- Effekt,
 oder der Größen-BIAS [1, 2, 3, 8],
 die im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen jedoch nicht weiter betrachtet wurden, da sie für die analysierten Sprays nur eine untergeordnete Rolle spielen („trajectory“- und „slit“- Effekt) bzw. noch nicht zufriedenstellend korrigierbar sind (Größen-BIAS). Hier sollen insbesondere Effekte erläutert und bewertet werden, die bei der Analyse von Prozessfluiden mit Zwei-Detektor-PDA- Systemen zu einer Streuung der PDA-Messgrößen führen. Diese Effekte beruhen auf messphysikalischen und sprühtechnischen Stoffeigenschaften der Prozessfluide. Sie sind oft als optisch inhomogen zu betrachten und ihre Zerstäubung geht einher mit hohen Tropfenkonzentration der erzeugten Sprays [4, 7, 10]. Dieses resultiert bei PDA-Messungen in verbreitert gemessenen Anzahlverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_{0, \text{Mess}}(d)$ wie in **Abb. 1** dargestellt.



Messung: PDA1622, Düse: SB 32/52, Medium: Wasser, Druck: 200 bar, Volumenstrom: 617 l/h, Temperatur: 20,4°C, Messposition (z ; r): 200 mm ; 0 mm, d-Messbereich: 0–406,75 μm, Bursterkennung über die Signalfrequenz, Partikel pro Sekunde: 15.203

Abb. 1: 2D-Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser und der axialen Partikelgeschwindigkeiten mit Spray-Splitter

Das Diagramm zeigt den für solche Messbedingungen charakteristischen Verlauf mit fehlerhaft ermittelten sehr großen Partikeln am oberen Rand des Größenmessbereiches. Aufgrund der Streuung der gemessenen Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ kann es insbesondere für kleine Partikel vorkommen, dass negative $\Delta\Phi$ -Werte gemessenen werden, die jedoch in den gültigen Definitionsbereich von $\Delta\Phi$ zwischen $0-2\cdot\pi$ transferiert werden und nach der anschließenden Umrechnung der Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ dann als fehlerhafte Zuweisungen von Partikeldurchmessern am oberen Rand des PDA-Größenmessbereiches erscheinen. Bevor die Messwerte für eine Charakterisierung von Sprays genutzt werden können, müssen die resultierenden Messergebnisse daher nachbearbeitet werden. In den hier vorgestellten experimentellen Arbeiten wurde das Signal-zu-Rausch-Verhältnis („SNR“ = Signal-to-noise ratio)

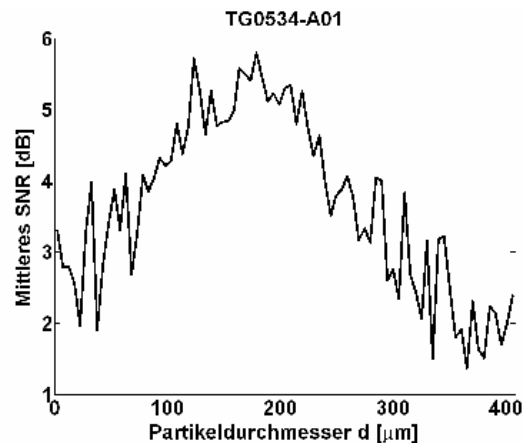
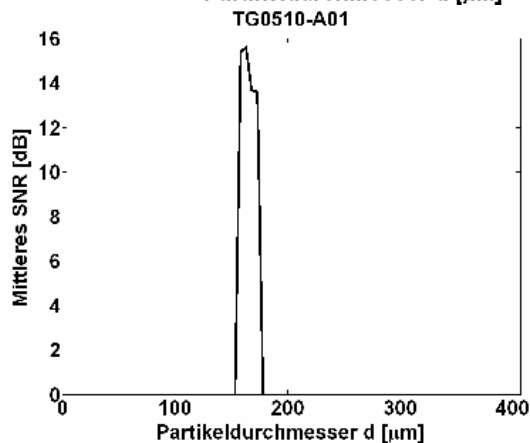
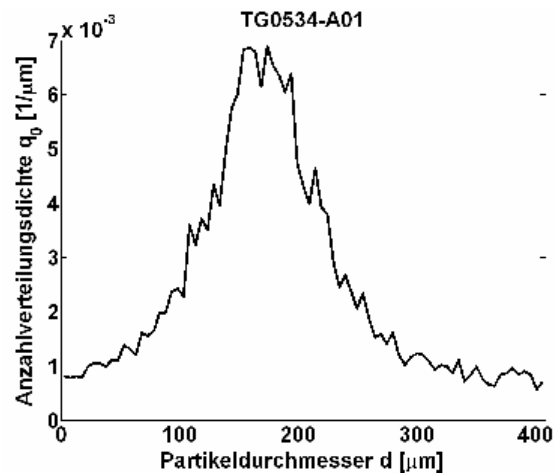
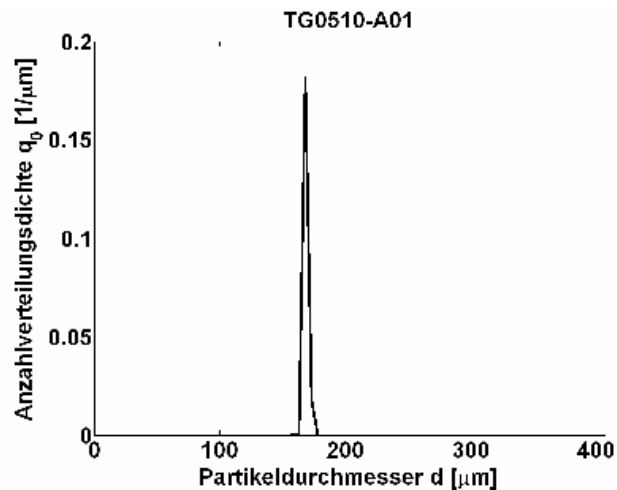
als Parameter zur Erklärung der Messwerte identifiziert. Aufbauend auf experimentell ermittelten und anschließend theoretisch formulierten Zusammenhängen zwischen dem SNR und der Streuung der Messwerte wurden dann die Nachbearbeitungs-Algorithmen *EvoFit* und *EvoFalt* entwickelt, welche derartige PDA-Ergebnisse korrigieren können.

Experimentelle Untersuchung von Störeinflüssen bei PDA-Messungen

Alle Experimente wurden an einem Zerstäubungsversuchsstand mit einem fest adaptierten PDA-System durchgeführt, der speziell für die Zerstäubung von Prozessfluiden konzipiert wurde. Dabei wurden in Modellversuchen ein Tropfengenerator und eine Flachstrahldüse und in den eigentlichen, „praxisrelevanten“, Sprühversuchen eine Sprühtrocknungs-Hochdruckdüse eingesetzt. Neben Wasser als optisch homogenem Modellfluid wurden als optisch inhomogenes Modellfluid eine Kondensmilch-Wasser-Emulsion sowie eine reale Prozessflüssigkeit der Sprühtrocknung zerstäubt.

Störeinflüsse bei der PDA-Messdatenerfassung und das Signal-Rauschverhältnis als Erkennungsparameter

Bei den vergleichenden Untersuchungen wurden zunächst Wasser als optisch homogene Versuchsflüssigkeit und Milch als optisch inhomogene Versuchsflüssigkeit verwendet. **Abb. 2 oben/links** zeigt die Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser $q_0(d)$ als Ergebnis einer PDA-Messung an monodispersen Wassertropfen. Die PDA-Messung kann aufgrund der sehr hohen Signalamplituden im Vergleich zum Rauschanteil problemlos im Zeitbereich analysiert werden. $q_0(d)$, nahezu eine Delta-Funktion, belegt eindeutig, dass es sich wie erwartet um monodisperse Tropfen mit einem Durchmesser von ca. 170 μm handelt. Die mittlere Geschwindigkeit der gemessenen Tropfen als Funktion der Durchmesserklasse d_i war konstant und lag bei einem Wert von ca. $\bar{v}(d_i) \approx 11,9$ m/s. Als Güteparameter für die Qualität der Messbedingungen dient das SNR, welches in **Abb. 2 unten/links** als mittleres SNR pro Durchmesserklasse ($\overline{\text{SNR}(d_i)}$) dargestellt ist. Es ist nahezu konstant und liegt bei einem Wert von $\overline{\text{SNR}(d_i)} \approx 15$ dB. Das ΔSNR als Differenz zwischen maximalem und minimalem $\overline{\text{SNR}(d_i)}$ beträgt ≈ 16 dB. Streulichtsignale sind hier deutlich vom Rauschen zu unterscheiden. Die Tropfengenerator-Experimente mit Milch erfolgten unter nahezu identischen Betriebsbedingungen. In **Abb. 2 oben/rechts** ist die Anzahlverteilungsdichte $q_0(d)$ als Ergebnis einer PDA-Messung an monodispersen Milchtropfen gezeigt. Auch in diesem Fall kann die PDA-Messung aufgrund der im Vergleich zum Rauschanteil noch hohen Signalamplituden zuverlässig im Zeitbereich analysiert werden. Als $q_0(d)$ ergibt sich nahezu eine Gauß-Kurve mit großer Standardabweichung über den gesamten Größenmessbereich des PDA-Systems. Aus der Referenzmessung ergibt sich jedoch, dass auch mit der Milch tatsächlich monodisperse Tropfen, Durchmesser ca. 175 μm , generiert wurden. Der Mittelwert der Gauß-Funktion von $q_0(d)$ entspricht auch ziemlich genau diesem Wert. Der tatsächliche Tropfendurchmesser wird also auch bei inhomogenen Versuchsflüssigkeiten mit der höchsten Wahrscheinlichkeit gemessen. Die Streuung der Phasendifferenz- bzw. Durchmesserwerte um den Mittelwert der Gauß-Funktion ist auf die Inhomogenitäten zurückzuführen, wie durch die Experimente gezeigt wurde. Ein weiteres Indiz für die tatsächliche Monodispersität der Milchtropfen zeigte sich im Verlauf der empirischen Regressionskurve der Geschwindigkeiten: obwohl aus $q_0(d)$ zunächst folgt, dass ein polydisperses Spray vorliegt,



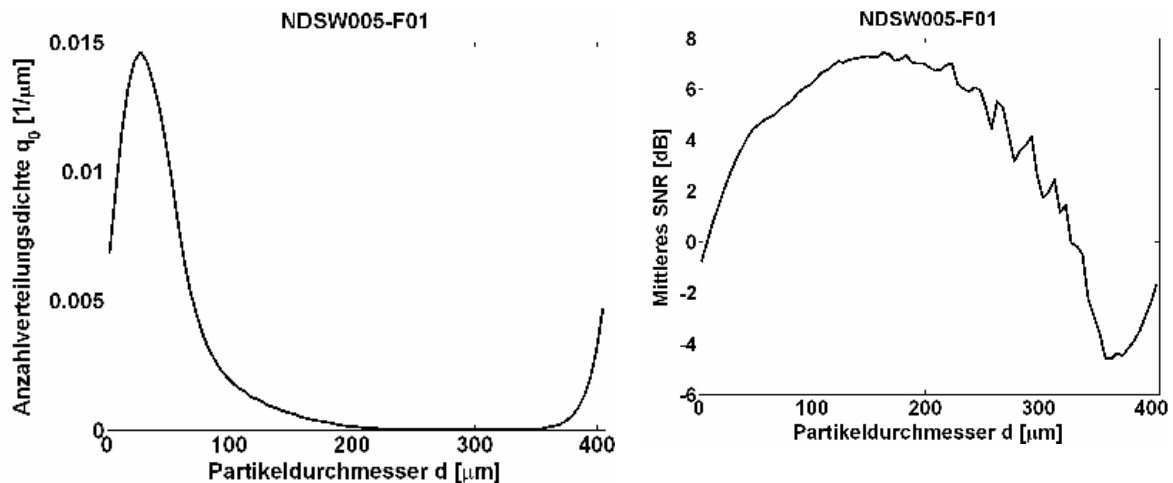
Messung: TG0510, Düse: TG, Medium: **Wasser**,
 Dominante Streulichtkomponente: Brechung 1.
 Ordnung, Druck: 1,2 bar, Volumenstrom: 0,2 l/h,
 Temperatur: 19,7°C, Messposition (z ; r): 28 mm ;
 0 mm, d-Messbereich: 0–406,75 μm, Anregungs-
 frequenz: 37,0 kHz, Anregungsamplitude: 9, Moda-
 ler Tropfendurchmesser: 168,23 μm, Bursterken-
 nung über die Signalamplitude

Messung: TG0534, Düse: TG, Medium: **Milch**,
 Dominante Streulichtkomponente: Brechung 1.
 Ordnung, Druck: 1,2 bar, Volumenstrom: 0,2 l/h,
 Temperatur: 19,7°C, Messposition (z ; r):
 28 mm; 0 mm, d-Messbereich: 0–408,34 μm,
 Anregungsfrequenz: 37,0 kHz, Anregungsampli-
 tude: 9, Modaler Tropfendurchmesser: 173,92
 μm, Bursterkennung über die Signalamplitude

Abb. 2: Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser und mittleres SNR pro Durchmesserklasse

liegt der ermittelte Mittelwert der Geschwindigkeiten für alle Durchmesserklassen bei einem Wert von $\approx 11,2$ m/s und ist damit partikelgrößenunabhängig. Zur Bewertung der Qualität der Messbedingungen wird wieder das SNR herangezogen, welches in **Abb. 2 unten/rechts** als mittleres SNR pro Durchmesserklasse $\overline{SNR}(d_i)$ abgebildet ist. Auch das $\overline{SNR}(d_i)$ zeigt einen Gauß-förmigen Verlauf, mit einem Mittelwert bei ca. 175 μm, also dem tatsächlichen Tropfendurchmesser: obwohl alle Tropfen exakt den gleichen Durchmesser besitzen, demnach also alle Tropfen die gleiche Streulichtleistung aufweisen sollten, variiert das $\overline{SNR}(d_i)$. Dieses Phänomen ist nur darauf zurückzuführen, dass zusätzliche interne Extinktionseffekte (Streuung und Absorption) durch Inhomogenitäten zu einer Abschwächung der gestreuten Lichtleistung führen und das SNR herabsetzen. Allein durch die Veränderung der optischen Eigenschaften der Versuchsflüssigkeiten verschlechtern sich also die Messbedingungen rapide. Die Ermittlung der Partikelgeschwindigkeit unterliegt auch bei inhomogenen Versuchsflüssigkeiten nur einer geringfügigen Streuung. Gegenüber dem Tropfengenerator wird die Partikelanzahldichte ρ_P in der gesamten Spraystruktur durch die Verwendung einer

Flachstrahldüse in der Regel erheblich größer. **Abb. 3 links** zeigt die Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser $q_0(d)$ als Ergebnis einer PDA-Messung an einem polydispersen Wasserspray. Anders als bei Referenzmessungen werden auch Partikel am oberen Rand des Größenmessbereiches ausgewiesen. Dies spricht dafür, dass die am oberen Rand ausgewiesenen Partikel systematisch fehlerhaft zugeordnet und tatsächlich als sehr kleine Partikel sind zu betrachten sind.



Messung: NDSW005, Düse: SS 650050, Medium: Wasser, Druck: 3 bar, Volumenstrom: 13 l/h, Temperatur: 19,7°C, Messposition (z ; r): 200 mm ; 0 m m, d-Messbereich: 0–406,75 μm, Modaler Tropfendurchmesser: 27,62 μm, Bursterkennung über die Signalfrequenz

Abb. 3: Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser und mittleres SNR pro Durchmesserklasse

Diese Interpretation wird zusätzlich durch den Verlauf von $\overline{SNR}(d_i)$ in **Abb. 3 rechts** bestätigt. Unter der Annahme, dass die am oberen Rand des Größenmessbereiches ausgewiesenen Partikel realiter sehr kleine Partikel sind, zeigt das $\overline{SNR}(d_i)$ einen deutlich partikelgrößenabhängigen Verlauf: steigend mit zunehmendem Partikeldurchmesser. Dies ist physikalisch auch zu erwarten aufgrund der Proportionalität zwischen Partikeldurchmesser d und Streulichtintensität I , welche wiederum über die Signalleistung P_S in das SNR eingeht. Bei Verwendung einer Hochdruckdüse erhöht sich, verglichen mit der Niederdruckdüse, noch einmal die Partikelanzahldichte im Sprühbereich erheblich. Generell kann man feststellen, dass aufgrund der Überlagerung der Störeinflüsse durch Inhomogenitäten der Prozessfluide, der Partikelanzahldichte in der gesamten Spraystruktur und der PDA-Systemempfindlichkeit bei der Untersuchung polydisperser Sprühtrocknungssprays (sehr) *schlechte PDA-Messbedingungen* vorliegen.

Theoretische Deutung

Auf der Grundlage der Resultate aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen erfolgte eine theoretische Deutung für die Entstehung der teilweise fehlerhaften Messergebnisse. Dabei spielt die Streuung der Messwerte eine entscheidende Rolle. Aus der Statistik ist bekannt, dass ein Messwert, z.B. Z_{Mess} , bei mehrfach wiederholter Messung Gauß-förmig (mit einer Standardabweichung σ_Z) um einen Mittelwert, den tatsächlichen Wert Z_{Tat} , schwankt.

$$Z_{\text{Mess}} = Z_{\text{Tat}} \pm \sigma_Z$$

Grafisch ist dieser Zusammenhang in **Abb. 4** dargestellt. Die Verteilung des tatsächlichen Wertes wird hier in Form einer Delta-Funktion vereinfacht als endliche Linie dargestellt.

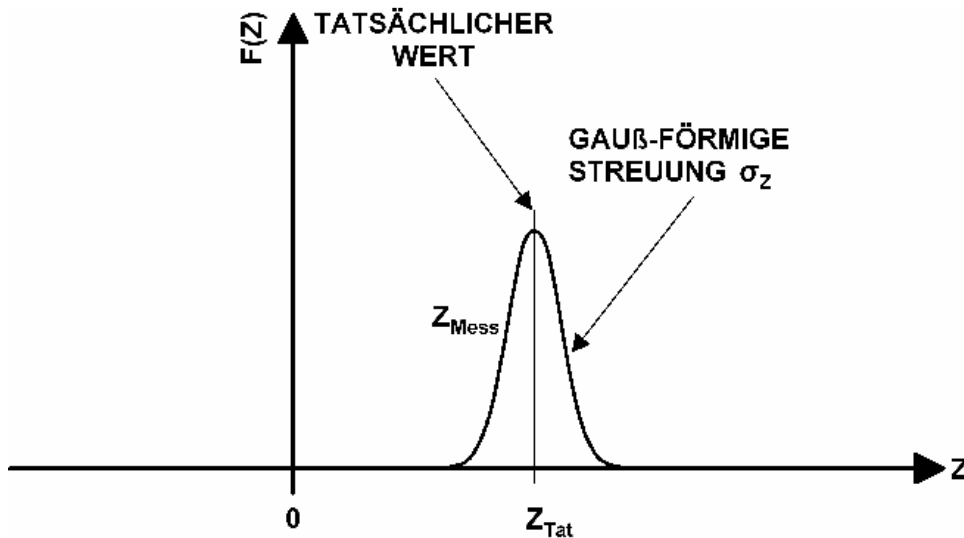


Abb. 4: Gauß-förmige Streuung um einen Mittelwert z_{Tat}

Bei der Sprayanalyse mit einem Standard-PDA-System und zwei Detektoren streuen die Messwerte Phasendifferenz $\Delta\Phi$ bzw. Durchmesser d und Doppler-Frequenz f_D bzw. Geschwindigkeit v_z jeweils Gauß-förmig um einen Mittelwert $\Delta\Phi_{Tat}$ bzw. f_{Tat}

$$\Delta\Phi_{Mess} = \Delta\Phi_{Tat} \pm \sigma_{\Delta\Phi}$$

und

$$f_{Mess} = f_{Tat} \pm \sigma_f = f_D \pm \sigma_f,$$

wobei

$$f_{Tat} = f_D.$$

Diese Streuung ist ausschließlich auf den Einfluss des SNR auf die Genauigkeit der DSTFT (**D**iscrete **S**hort **T**ime **F**ourier **T**ransform) zurückzuführen. Das SNR kann also als Güteparameter für die Qualität der Messbedingungen bzw. die Empfindlichkeit des PDA-Systems angesehen werden. Je niedriger dabei das SNR ist, desto größer ist die Streuung der Messwerte

$$\sigma_{\Delta\Phi} = \sigma_{\Delta\Phi}(\text{SNR}),$$

$$\sigma_f = \sigma_f(\text{SNR}).$$

Theoretisch kann die Genauigkeit der DSTFT in Abhängigkeit vom SNR durch die untere Cramér-Rao-Grenze („CRLB“ = Cramér-Rao Lower Bound) beschrieben werden. Es gilt für ein PDA-System mit zwei Detektoren bei bandpassgefilterten Signalen konstanter Amplitude für die Standardabweichung der Frequenz

$$\sigma_f \geq \left| \sqrt{\frac{6 \cdot f_{AF}^2}{N \cdot (N^2 - 1) \cdot \text{SNR}}} \right| = \left| \frac{f_{AF}}{\sqrt{\text{SNR}}} \cdot \sqrt{\frac{6}{N \cdot (N^2 - 1)}} \right| \text{ [Hz]},$$

und für die Standardabweichung der Phasendifferenz der beiden Signale

$$\sigma_{\Delta\Phi} \geq \left| \sqrt{\frac{2}{N \cdot \text{SNR}}} \cdot \left(\frac{360}{2 \cdot \pi} \right) \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{\text{SNR}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \left(\frac{360}{2 \cdot \pi} \right) \right| [^\circ]$$

f_{AF} Abtastfrequenz [Hz],

N Anzahl der Abtastpunkte im DSTFT-Fenster [ATP],

SNR Signal-zu-Rausch-Verhältnis [-].

Setzt man die konkreten Werte für f_{AF} , N und SNR in die Ungleichungen ein und rechnet sie in den Durchmesser- bzw. Geschwindigkeitsbereich um, so wird anhand dieser Werte offensichtlich, dass die Standardabweichung in der Frequenz- bzw. Geschwindigkeitsbestimmung auch bei einem niedrigen SNR keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit hat, wohingegen die Bestimmung der Phasendifferenz bzw. des Durchmessers bei einem niedrigen SNR teilweise sehr ungenau werden kann. Für ein SNR von Null resultiert schon eine absolute Standardabweichung von $8,09 \mu\text{m}$, gleichbedeutend mit einer prozentualen Ungenauigkeit von $\pm 1\%$. Betrachtet man den Messwert Phasendifferenz $\Delta\Phi$, so ergeben sich für die verschiedenen Messbedingungen unterschiedliche Signal-zu-Rausch-Verhältnisse SNR und demzufolge auch unterschiedliche Standardabweichungen $\sigma_{\Delta\Phi}$ für den gemessenen Wert $\Delta\Phi_{\text{Mess}}$. Eine systematische Betrachtung des Einflusses des SNR auf die Streuung der Phasendifferenz bei zunehmender Partikelanzahldichte und zunehmender optischer Inhomogenität der Versuchsflüssigkeit unter Berücksichtigung der Qualität der Messbedingungen verdeutlicht die Zusammenhänge. Wird ein reales Sprühtrocknungsspray einer hochkonzentrierten optisch inhomogenen Emulsion bei gleichzeitig sehr hoher Partikelanzahldichte in der Spraystruktur analysiert, liegen sehr schlechte Messbedingungen vor. Sowohl das SNR als auch die Standardabweichung der Phasendifferenz $\sigma_{\Delta\Phi}$ werden dann hauptsächlich von dem Partikeldurchmesser d , der Extinktion ϵ , sowie der Partikelanzahldichte ρ_P abhängen

$$SNR = SNR(d, \epsilon, \rho_P) \text{ [dB]},$$

$$\sigma_{\Delta\Phi} = \sigma_{\Delta\Phi}(d, \epsilon, \rho_P) \text{ [}^\circ\text{]}.$$

Ein exakter funktionaler Zusammenhang zwischen $\sigma_{\Delta\Phi}$ und d , ϵ , ρ_P kann hier nicht quantitativ formuliert werden. Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse kann man von einer Standardabweichung der Phasendifferenz $\sigma_{\Delta\Phi}$ ausgehen, die unabhängig vom Partikeldurchmesser d ist, also $\sigma_{\Delta\Phi} = \text{Const.}$

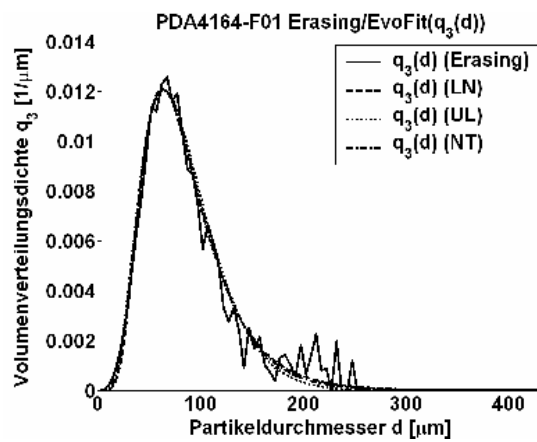
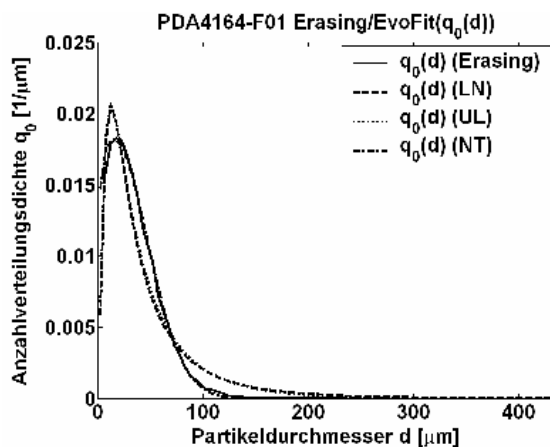
Konzept zur Nachbearbeitung von PDA-Messdaten auf der Basis der Modellexperimente

In der Literatur findet man fast ausschließlich Ergebnisse aus PDA-Messungen auch an Prozessfluiden, die keine offensichtlich fehlerhaft ermittelten sehr großen Partikeldurchmesser aufweisen und/oder selten un stetige bzw. diskontinuierliche Verteilungen ohne explizite Hinweise auf eine Nachbearbeitung der Daten. Solche PDA-Resultate sind jedoch stets differenziert zu werten, weil den resultierenden Messdaten entweder niedrige Akzeptanzraten zugrundeliegen können und häufig nicht klar ist, welche Akzeptanzkriterien zuvor in die Signalverarbeitung eingeflossen sind, bzw. wie sich diese Kriterien auf die Beschreibung der Partikelverteilung auswirken. Leider werden speziell gewählte Auswertekriterien in der Literatur nur selten mit angegeben. In jedem Fall sollte in eigenen Experimenten die Entstehung der resultierenden Ergebnisse vom Experimentator hinterfragt und in die Interpretation der Daten mit einbezogen werden. Werden a priori auch negative Phasendifferenzen zugelassen, wie sie typischerweise bei einem Zwei-Detektor-Standard-PDA-System auftreten können, kommt es in der Mehrzahl der Fälle zu Bias-behafteten Verteilungsdichten $q_0(d)$ bzw. $q_3(d)$ (und Kennwerten) die der Nachbearbeitung bedürfen. Vor der weiteren Auswertung müssen daher spezielle Nachbearbeitungs-Algorithmen eingesetzt werden, denn erst die aufbereiteten PDA-Ergebnisse sind für eine zuverlässige Charakterisierung der Sprays geeignet [9, 11]. Auch die in dieser Arbeit experimentell an Sprays ermittelten PDA-Messdaten - es werden die Ergebnisse der Messungen im Sprühkegel einer Hochdruck-Hohlkegeldüse beim Betrieb mit Wasser bzw. Prozessflüssigkeiten verwendet - sind aufgrund signifikanter Partikelanzahlen am oberen Rand des Größenmessbereiches zunächst nicht für eine Charakterisierung des Sprayzustandes geeignet. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden als Basis zur Aufbereitung der PDA-Daten die beiden Methoden Erasing und Entfaltung ausgewählt und qualitativ weiterentwickelt [6]. Dabei werden spezielle variable Parameter für die

Beschreibung von parametrischen Verteilungsfunktionen und für die Beschreibung der Standardabweichung σT (bei EvoFit) verwendet.

Nachbearbeitungsalgorithmus: *EvoFit*

Als qualitative Erweiterung zum *Erasing* werden die aus dem *Erasing* resultierenden Anzahl- bzw. Volumenverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_0(d)$ bzw. $q_3(d)$ in einem nachfolgenden Schritt durch parametrische Verteilungsfunktionen auf Grundlage einer für diesen Zweck entwickelten mehrgliedrigen Evolutionsstrategie angenähert (Algorithmus: *EvoFit*($q_0(d)$) für $q_0(d)$ bzw. *EvoFit*($q_3(d)$) für $q_3(d)$). Auf der Basis der approximierten Verteilungsdichten $q_0(d)$ und $q_3(d)$ können die zugehörigen charakteristischen Kennwerte sehr einfach ermittelt werden, sodass ein erheblich geringerer Aufwand für eine umfassende Beschreibung von Sprayzuständen resultiert.



Messung: PDA4164, Näherungsfunktionen: LN, UL, NT,
 $d_{\text{cut-off}} = 250 \mu\text{m}$, $d_{\text{max,UL}} = d_{\text{max,PDA}} = 435,37 \mu\text{m}$

Abb. 5: Anzahlverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_0(d)$ nach *Erasing* bzw. *EvoFit*($q_0(d)$) für unterschiedliche Verteilungsfunktionen

Abb. 6: Volumenverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_3(d)$ nach *Erasing* bzw. *EvoFit*($q_3(d)$) für unterschiedliche Verteilungsfunktionen

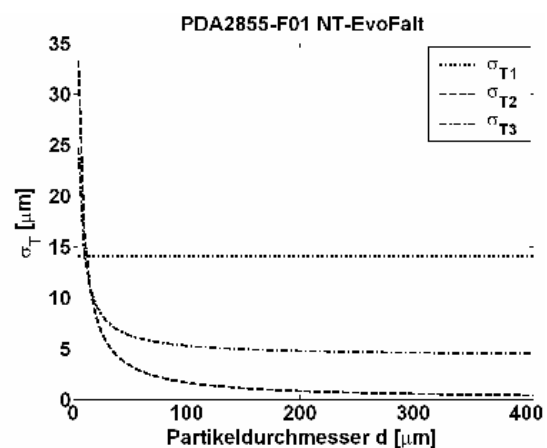
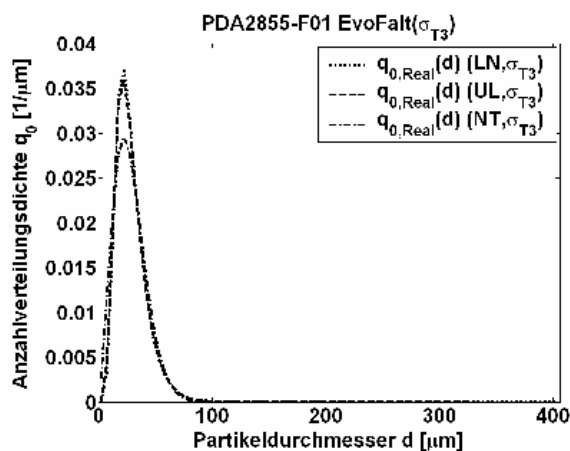
Alle eingesetzten parametrischen Verteilungsfunktionen (LN, UL, NT) sind für eine Beschreibung sowohl der Anzahl- $q_0(d)$ als auch der Volumenverteilungsdichten $q_3(d)$ des Partikeldurchmessers geeignet. Als maximaler Partikeldurchmesser bei der UL-Verteilung erweist sich für die betrachteten PDA-Messdaten ein $d_{\text{max,UL}} = d_{\text{max,PDA}}$ als sinnvoll, da definitiv keine größeren Partikel mit dem PDA-Messsystem mehr erfasst werden können. Die dreiparametrische NT-Verteilung hat durch einen zusätzlichen Verteilungsparameter gegenüber der LN- und der UL-Verteilung einen weiteren Freiheitsgrad und somit eine erhöhte Flexibilität bei der Anpassung an die Messdaten nach *Erasing*. Daher ist zu erwarten, dass die NT-Verteilung von allen Funktionen systematisch die beste Annäherung liefert. In **Abb. 5** sind die Anzahlverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_0(d)$ nach den Algorithmen *Erasing* (mit $d_{\text{cut-off}} = 250 \mu\text{m}$) und *EvoFit*($q_0(d)$) am Beispiel der Messung PDA4164 zu sehen. Nach dem *Erasing* ergibt sich der erwartete Verlauf in $q_0(d)$: Eine näherungsweise monomodale Verteilung, die keine sehr großen Partikel am oberen Rand des Größenmessbereiches mehr enthält, und eine von Null abweichende Anzahldichte in der ersten Durchmesserklasse. Die angenäherten parametrischen Funktionen (LN, UL, NT) zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messdaten nach *Erasing*. Dies ist zunächst ein Beleg dafür, dass die ausgewählten Verteilungsfunktionen prinzipiell gut geeignet sind, um derartige polydisperse Par-

tikelkollektive zu beschreiben. In **Abb. 6** sind die Volumenverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_3(d)$ nach *Erasing* und $EvoFit(q_3(d))$ am Beispiel der Messung PDA4164 abgebildet. Nach Anwendung des Algorithmus $EvoFit(q_3(d))$ zeigen die angenäherten mathematischen Funktionen bei der Volumenverteilungsdichte der Partikeldurchmesser $q_3(d)$ eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messdaten nach *Erasing*. Wie erwartet, wird $q_3(d)$ nach *Erasing* bei kleinen Partikeln sehr gut und für größere Partikel in Form eines glättenden Durchschnitts angenähert.

Nachbearbeitungsalgorithmus: *EvoFalt*

Beim Nachbearbeitungs-Algorithmus *EvoFalt* wird eine *Entfaltung* der gemessenen, also fehlerhaften, PDA-Messdaten für die Anzahlverteilungen der Partikeldurchmesser $q_{0,Mess}(d)$ durchgeführt, ebenfalls auf Grundlage der mehrgliedrigen Evolutionsstrategie. Hier wird die Streuung der Messwerte berücksichtigt und mathematisch korrigiert. Für die resultierende realistische Anzahlverteilungsdichte der Partikeldurchmesser $q_{0,Real}(d)$ werden bei *EvoFalt* ebenfalls die parametrischen Verteilungsfunktionen LN, UL und NT angesetzt. Auch hier gilt, dass mit diesen Funktionen sehr einfach und bequem die charakteristischen Kennwerte und auch die abgeleiteten Verteilungen (z.B. von $q_3(d)$ von $q_0(d)$) ermittelt werden können. Für die Standardabweichung σ_T der Gauß-förmigen Streufunktionen werden die im Rahmen dieser Arbeit erstmals theoretisch formulierten Beziehungen zwischen der Streuung der Phasendifferenz-Messwerte $\sigma_{\Delta\Phi}$ und den Messbedingungen, verifiziert durch das Signal-Rauschverhältnis SNR als Güteparameter, mit berücksichtigt in Form der Ansätze

$$\begin{aligned}\sigma_{T1} &= \text{Const}_1, \\ \sigma_{T2} &= 1/d \text{ und} \\ \sigma_{T3} &= 1/d + \text{Const}_2.\end{aligned}$$



Messung: PDA2855, Näherungsfunktion: NT, Standardabweichungen von $T(d)$: $\sigma_{T1/T2/T3}$

Abb. 7: Realistische Anzahlverteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_{0,Real}(d)$ nach *EvoFalt* für unterschiedliche Verteilungsfunktionen

Abb. 8: Standardabweichung σ_T als Funktion des Partikeldurchmessers d nach *EvoFalt* für die NT-Verteilungsfunktion

Der Ansatz $\sigma_{T3} = 1/d + \text{Const}_2$ für die Standardabweichung der Gauß-förmigen Streufunktionen $T(d)$ hat gegenüber den ein-parametrischen Ansätzen für $\sigma_{T1/T2}$ (Const_1 bzw. $1/d$) einen weiteren Freiheitsgrad und somit eine erhöhte Flexibilität bei der Anpassung an die Messdaten. Daher ist zu erwarten, dass σ_{T3} von allen Ansätzen systematisch die beste Annäherung liefert. Generell kann man feststellen, dass auch hier die mehrgliedrige Evolutionsstrategie gut funktioniert (**Abb. 7**). Mit dem Ansatz $\sigma_{T3} = 1/d + \text{Const}_2$ wird die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Daten erreicht. Der spezielle Verlauf von σ_{T3} als Funktion des Partikel-

durchmessers d bestätigt den Ansatz $\sigma_{T1} = \text{Const}_1$ ab einem Partikeldurchmesser von ca. 30 μm , für kleinere Partikel zeigt sich eine stärkere Abhängigkeit der Standardabweichung σ_T zum Partikeldurchmesser (**Abb. 8**). Die gewählten parametrischen Verteilungsfunktionen sind gut geeignet, um die tatsächlichen Verteilungsdichten der Partikeldurchmesser $q_{r,Tat}(d)$ sinnvoll zu beschreiben.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung von industriell relevanten Sprühtrocknungssprays mit einem Zwei-Detektor-Standard-PDA-Aufbau führt insbesondere im Hinblick auf die Partikel-durchmesser d und alle damit korrelierten Verteilungen und Kennwerte zu Biasbehafteten Ergebnissen. Die Erkenntnisse von experimentellen Untersuchungen und der theoretischen Deutung zur Streuung der Messwerte wurden in der Formulierung geeigneter Nachbearbeitungs-Algorithmen berücksichtigt und implementiert. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse erscheint eine zuverlässigere Charakterisierung von Sprays auch auf Grundlage fehlerhafter PDA-Messdaten sehr gut möglich. Für eine weiterführende Überprüfung bzw. Bestätigung der mathematischen Lösungen zur Beschreibung der Verteilungsdichten wären Spraydaten eines Referenzmesssystems sehr interessant und hilfreich.

Literatur

- [1] Aizu, Y.; Durst, F.; Gréhan, G.; Onofri, F.; Xu, T.-H.: PDA-Systems without Gaussian Beam Defects, Proc. 3rd International Congress on Optical Particle Sizing, Yokohama, Japan (1993), S. 461–470
- [2] Durst, F.; Tropea, C.; Xu, T.-H.: The slit effect in phase Doppler anemometry, Proc. 2nd International Conference on Fluid Dynamic Measurements and its Application, Peking, China (1994), S. 1–6
- [3] Gréhan, G.; Gouesbet, G.; Naqwi, A.; Durst, F.: Particle Trajectory Effects in Phase Doppler Systems: Computations and Experiments, Part. Part. Syst. Charact. 10 (1993), S. 332–338
- [4] Manasse, U.: Erweiterung der Phasen-Doppler-Anemometrie auf optisch absorbierende Flüssigkeiten, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 353, Düsseldorf (1993)
- [5] Manasse, U.; Wriedt, T.; Bauckhage, K.: Phase-Doppler Sizing of Optically Absorbing Liquid Droplets: Comparison between Mie Theory and Experiment, Part. Part. Syst. Charact. 9 (1992), S. 176–185
- [6] Menn, P.: Charakterisierung von Sprays Aachen: Shaker, 2005. - 3-8322-3573-6
- [7] Mitschke, M.: PDA-relevante Streulichteigenschaften: Phänomene, Parameterwahl und mathematische Korrektur, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 851, Düsseldorf (2000)
- [8] Schöne, F.: Wichtung von Partikelgrößenverteilungen in der Phasen-Doppler-Anemometrie, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 368, Düsseldorf (1993)
- [9] Schulte, G.: Zweidimensionale Verteilungen von Partikeleigenschaften – Anwendung auf Systeme ruhender und bewegter Partikeln, Shaker, Aachen (1995)
- [10] Sultan, G.: PDA-Messungen in „optisch dichten“ Sprays: Störungen der Signaldetektion und deren Auswirkung auf ermittelte Verteilungen, Shaker, Aachen (2001)
- [11] Tillwick, J.: Einsatz der PDA-Meßtechnik zur Charakterisierung des Sprühkompaktierprozesses bei der Zerstäubung von Metallschmelzen, Dissertation, Universität Bremen / FB 04 (2000)
- [12] Ziesenis, J.: Weiterentwicklung der PDA-Meßtechnik zur on-line Prozesskontrolle beim Sprühkompaktieren, Fortschrittberichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik, Nr. 783, Düsseldorf (2003)