

Erfassung und Bewertung von Konzentrations-Inhomogenitäten von Tropfenverteilungen in Sprays

J. Heinlein, U. Fritsching, G. Schulte,
Fachgebiet Verfahrenstechnik, Universität Bremen, 28359 Bremen

Zusammenfassung

Analysen von Tropfenverteilungen in Sprays beruhen größtenteils auf der Erfassung lokaler Zusammenhänge für den Partikeldurchmesser oder die Partikelgeschwindigkeit. Hieraus werden dann beispielsweise zeitlich gemittelte Anzahldichten der Partikel im Spray oder die Massenstromdichte abgeleitet. Die Phasen-Doppler-Anemometrie ermöglicht es jedoch auch, zeitliche und räumliche dynamische Vorgänge in Sprays zu analysieren. Derart können Sprays mit Hilfe der punktuellen „interparticle arrival time“ (zeitlicher Abstand des Durchtritts aufeinander folgender Partikeln an einem Messort) in stationäre und instationäre Zustände unterschieden werden. Ein typisches Beispiel für einen instationären Spray-Zustand stellt die Bildung von Tropfen- bzw. Partikelclustern dar.

Einleitung

Die lokale räumliche Struktur der Tropfenverteilungen in Sprays wird für die Betrachtung der relevanten Impuls-, Wärme- und Stoffübergänge in technischen Anwendungen der Fluidzerstäubung im allgemeinen als homogen angenommen. Dies trifft jedoch nur in sehr düsenfernen Bereichen zu, nach Durchlaufen einer ausreichend großen „Homogenisierungsstrecke“. Infolge des im allgemeinen als mehrstufig angenommenen Fluid-Disintegrationsvorgangs bei der Zerstäubung (Primär- und Sekundärzerstäubung), sowie aufgrund der Wechselwirkung der Tropfen mit den verschiedenen Größenskalen der Fluidturbulenz und der Randwirbel des Sprays kann es jedoch zu signifikanten Konzentrations-Inhomogenitäten und Entmischungen der Tropfen in einem Spray kommen.

Theoretische Grundlagen

Der Formalismus zur Bestimmung des stationären oder instationären Verhaltens eines Sprays kann in drei Hauptschritte unterteilt werden [7]. Dabei wird zuerst unter der Annahme eines stationären Sprays die theoretische Funktion der interparticle arrival time berechnet. Im zweiten Schritt wird dann aus den erfassten PDA-Messdaten die resultierende experimentelle Funktion berechnet. Im letzten Schritt werden beide Funktionen mit Hilfe des Chi-Quadrat Tests und der Anzahl an Abweichungen von der Standardabweichung für die erste interparticle Klasse miteinander verglichen. Die theoretische interparticle arrival time Verteilung $h_{\text{exp}}(\tau_j)$ kann dabei entweder von einer ausreichend langen Einzelmessung (SR) oder aus mehreren miteinander kombinierten kurzen Einzelmessungen (ER) berechnet werden.

Edwards und Marx [1, 2] zeigten, dass sich die theoretische interparticle arrival time Verteilung zu

$$h_{\text{exp}}(\tau_j) = \frac{H(\tau_j)}{N\Delta\tau_j} \quad (1)$$

ergibt. Hierbei ist τ_j der Bereich der betrachteten interparticle Zeit j , $H(\tau_j)$ die Anzahl an Ereignissen im j -ten interparticle Zeitbereich, N ist die Gesamtzahl der Ereignisse und $\Delta\tau_j$ ist die Breite vom j -ten interparticle Zeitbereich.

Um die theoretische interparticle arrival time Verteilung zu bestimmen, wurde hierbei ein ideales stationäres Spray als inhomogener Poisson-Prozess modelliert. Dieser Poisson-Prozess wird durch die Intensitäts-Funktion λ beschrieben, welche die zu erwartende Anzahl an Partikeln pro Zeiteinheit angibt. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die theoretische Verteilung zu:

$$h_{\text{th}}(\tau_j) = \frac{\lambda^2(T - \tau) \exp(-\lambda\tau)}{\lambda T - 1 + \exp(-\lambda T)}. \quad (2)$$

Um die interparticle arrival time Verteilung berechnen zu können, ist es notwendig, die interparticle arrival time zu diskretisieren, woraus sich interparticle-Klassen (Bins) mit einer bestimmten Breite ergeben. In diesem Zusammenhang haben Luong und Sojka [3] aus der interparticle-Verteilung abgeleitet, dass die Diskretisierung der interparticle arrival time erfolgen kann durch:

$$\tau_j = T \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{\tau_{j-1}}{T} \right)^{\frac{n}{\Theta}} - \frac{1}{Q} \right]^{\frac{\Theta}{n}} \right\}. \quad (3)$$

Hierbei ist T die Gesamt-Messdauer, Q die Anzahl der interparticle-Klassen und Θ die Anzahl der Einzelmessungen. Die Anwendung von Gleichung (3) resultiert in einer dynamischen Klasseneinteilung, was bedeutet, dass die Breite der interparticle Klassen nicht konstant ist. Ein großer Nachteil hierbei ist jedoch, dass dadurch das resultierende Histogramm der experimentellen Verteilung sehr empfindlich auf Über- und Untersampling bei der PDA-Messdatenerfassung reagiert. Aus zahlreichen Untersuchungen [4, 6] ist jedoch bekannt, dass derartige Fehler bei realen Sprays selten ausgeschlossen werden können. Aus diesem Grund wurde in Erweiterung zu den bisherigen Ansätzen Gleichung (3) nur zur Berechnung der kompletten Klassenbreite für alle Klassen herangezogen. Die nachfolgende Diskretisierung erfolgte dann in der Form, dass die Gesamt-Klassenbreite in Klassen mit konstanter Breite eingeteilt wurde. Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Diskretisierung der interparticle Zeit zu:

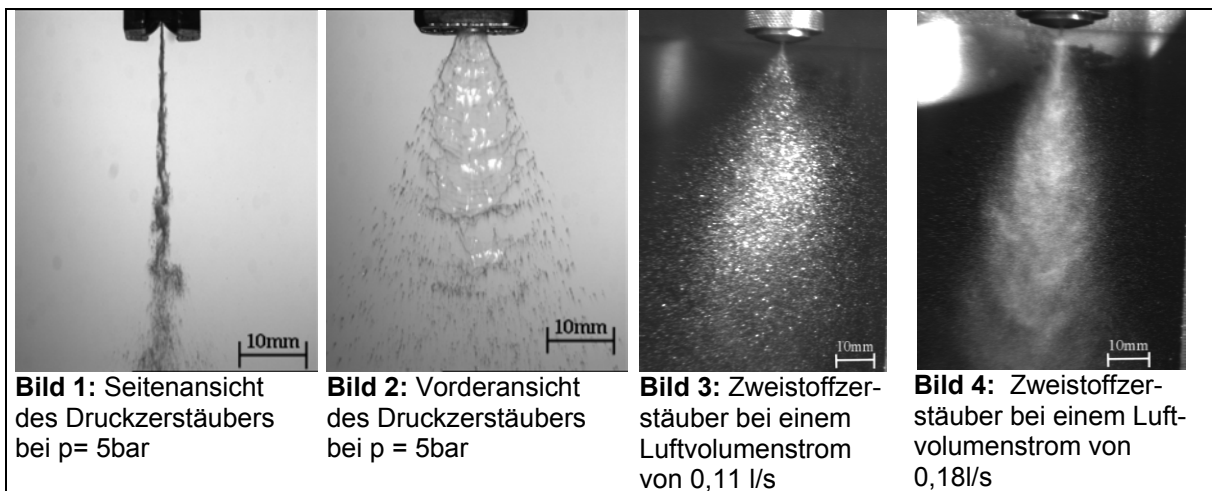
$$\Delta\tau = \frac{\tau_{j=Q}}{Q}. \quad (4)$$

Eine weitere wesentliche Erweiterung der bestehenden Ansätze besteht darin, die minimal mögliche interparticle arrival time zu bestimmen und diese als "Offset-Zeit" einzuführen, in

der kein interparticle Ereignis vorhanden sein kann und darf. Die Notwendigkeit dafür besteht darin, dass Bias- Effekte durch zwei oder mehrere Partikeln im PDA-Messvolumen ausgeschlossen werden müssen. Dieser Offset führt letztendlich dazu, dass die Interparticle-Verteilungen erst ab dieser minimalen interparticle Zeit berechnet werden, was in dieser Art erstmalig für die Auswertung der interparticle arrival time angewendet wurde.

Messungen an unterschiedlichen Zerstäubersystemen

Das PDA-System wurde dazu benutzt die Tropfengröße, die Geschwindigkeit und die Zeitinformation zu erfassen. Die Auswertung der aufgenommenen PDA-Daten erfolgte hierbei im Post-Processing, was bedeutet, dass zunächst das gesamte detektierte Signalband kontinuierlich aufgezeichnet wird und nachfolgend offline die Auswertung bezüglich Geschwindigkeit, Durchmesser und Zeit erfolgte. Das Auffinden der PDA typischen Doppler-Bursts geschieht hierbei im Frequenzbereich, was bedeutet, dass das Signalband zunächst mittels eines FFT-Algorithmus analysiert wird und erst dann, wenn beide Kanäle die gleiche Frequenz aufweisen, ein Partikel erkannt wird. Dadurch wird es ermöglicht, auch Partikel mit einem geringen SNR zu erkennen und diese für die Auswertung der interparticle arrival time Statistik heranzuziehen.



Das Ziel dieser Untersuchungen war, herauszufinden, inwieweit ein instationäres Verhalten des Sprays von den Zerfallsbedingungen und dem Zerfallsprozess abhängt. Hierfür sind zwei unterschiedliche Zerstäuber untersucht worden. Zum einen handelte es sich dabei um einen Druckzerstäuber mit einem Flachstrahlprofil (Bild 1-2) und zum anderen um einen Zweistoffzerstäuber mit einem Vollkegelprofil (Bild 3-4). Um Fluktuationen durch die Flüssigkeitszufuhr zu vermeiden, wurde bei beiden Systemen ein Druckbehälter benutzt, der einen konstanten Flüssigkeitsvolumenstrom gewährleistet. Für beide Zerstäuber sind Messungen an verschiedenen axialen und radialen Positionen im Spray durchgeführt worden.

Untersuchungen am Druckzerstäuber

Eine Möglichkeit, das Ergebnis einer interparticle arrival time Analyse für einen diskreten Messort im Spray darzustellen, ist die Darstellung der theoretischen und der experimentellen Kurve in einem Diagramm. In Bild 5 ist dies beispielhaft dargestellt. Als entscheidende Parameter zur Beurteilung der Analyse erweisen sich jedoch die Werte des Chi-Quadrat-Tests und die Anzahl an Abweichungen für die erste interparticle Klasse. Der Wert der Chi-Quadrat-Analyse gibt dabei an, in wie weit beide Verteilungen miteinander übereinstimmen und ist außerdem ein Maß für die Zufälligkeit von Ereignissen. Die Anzahl an Abweichungen für die erste interparticle arrival time Klasse ist gerade im Fall der Cluster-Bildung von großem Interesse, da hier davon ausgegangen werden kann, dass innerhalb eines

Tropfenclusters die interparticle arrival time im Gegensatz zum stationär verteilten Spray geringer ist. Die Bestimmung dieses Parameters erfolgt dabei dadurch, dass zunächst die Standardabweichungen der theoretischen Verteilung ermittelt werden und dann bestimmt wird, um welchen Faktor der Standardabweichungen die experimentelle Verteilung von der theoretischen abweicht.

Die Beschränkung auf die Werte der Chi-Quadrat-Analyse und des Wertes für die Anzahl an Abweichungen erweist sich dabei als gute Möglichkeit mehrere Messpositionen direkt miteinander zu vergleichen. Bezüglich einer Aussage über das stationäre Verhalten eines Sprays ist jedoch immer darauf zu achten, dass beide Parameter miteinander kombiniert betrachtet werden müssen. In diesem Zusammenhang zeigt Bild 6 die Ergebnisse für die Berechnung der Anzahl an Abweichungen und Bild 7 die Chi-Quadrat-Werte für verschiedene axiale und radiale Positionen im Spray des Druckzerstäubers.

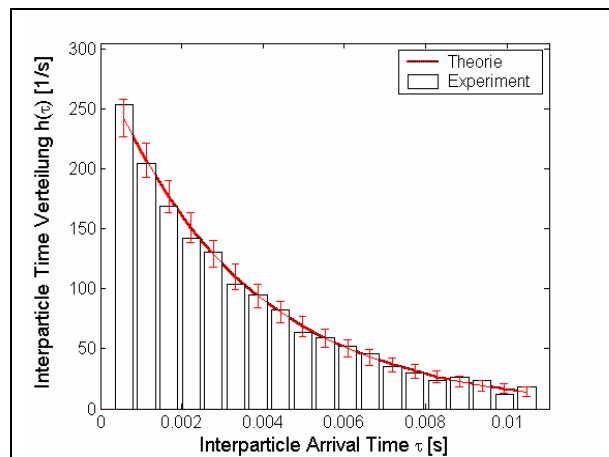


Bild 5: Experimentelle und theoretische Interparticle Time Verteilung für den Druckzerstäuber, 30mm unterhalb des Düsenaustritts in der Spraymitte.

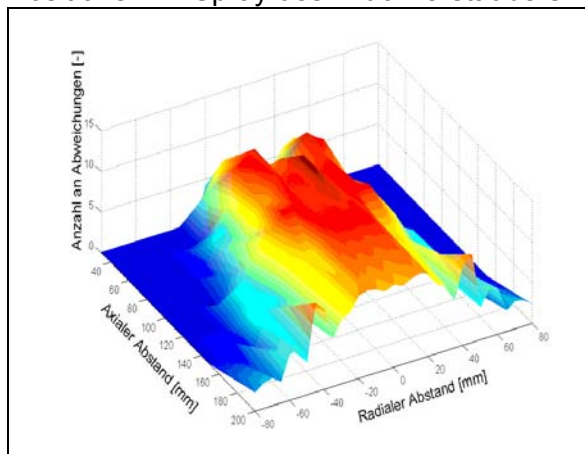


Bild 6: Anzahl an Abweichungen für verschiedene axiale und radiale Abstände

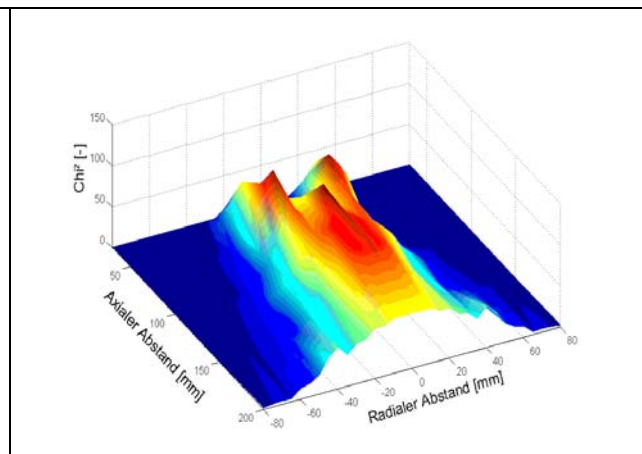


Bild 7: Chi-Quadrat für verschiedene axiale und radiale Abstände

Für die in Bild 6 dargestellten Werte für die Anzahl an Abweichungen erkennt man, dass diese in der Nähe des Düsenaustritts am größten sind. Dabei findet man das Maximum nicht direkt auf der Spray-Mittelachse, sondern zunächst außerhalb der Spray-Mitte. Mit zunehmenden axialen Abstand nimmt die Anzahl der Abweichungen zu. Ab einem bestimmten axialen Abstand (ca. 80mm) ist der Wert über einen großen radialen Bereich (± 20 mm) in der Spray-Mitte stark angestiegen. Der Wert fällt zum Spray-Rand wieder ab und erreicht dort ein Minimum. Dies gilt dabei für den gesamten dargestellten axialen Bereich. Vergleicht man dazu die in Bild 7 dargestellten Werte der Chi-Quadrat-Analyse kann das gleiche Verhalten beobachtet werden. Auch hier kommt es zunächst mit zunehmendem axialen Abstand zur Zunahme des Wertes, wobei ein außermittiges Maximum zu beobachten ist. Mit zunehmendem axialen Abstand findet man jedoch einen Maximalbereich größerer Ausdehnung über der Spray-Mitte. Auch hier zeigt sich, dass die Werte zum Spray-Rand wieder geringer werden und dort ein Minimum einnehmen. Um eine Aussage bezüglich des stationären/instationären Verhaltens des Sprays machen zu können, ist es notwendig, beide Ergebnisse miteinander zu kombinieren. Bereiche innerhalb des Sprays in denen ein großer Wert für die Anzahl an Abweichungen und ein großer Chi-Quadrat-Wert gefunden werden können, sind dabei von besonderem Interesse. Da beide Parameter gute Übereinstimmungen in ihrem Verhalten aufzeigen, folgt, dass in den Bereichen, in denen eine große Anzahl an Abweichungen festgestellt werden kann, ebenfalls große Chi-Quadrat-

Werte vorhanden sind. Das bedeutet, dass für diese Bereiche eine große Wahrscheinlichkeit für die Clusterbildung besteht und das Spray ein instationäres Verhalten aufweist. Um genauere Aussagen über die Eigenschaften der detektierten Cluster machen zu können, sind sowohl die Durchmesserverteilung als auch die Geschwindigkeitsverteilung in diskrete Klassen eingeteilt worden und hierfür die interparticle arrival time Analyse durchgeführt worden. Hieraus berechnete Werte für die Anzahl an Abweichungen und die Chi-Quadrat-Werte für die verschiedenen Durchmesserklassen sind in den Bildern 8 und 9 und die Werte für die verschiedenen Geschwindigkeitsklassen in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränkt sich die Darstellung in den beiden Diagrammen auf die aussagefähigen unteren Durchmesser- bzw. Geschwindigkeitsklassen.

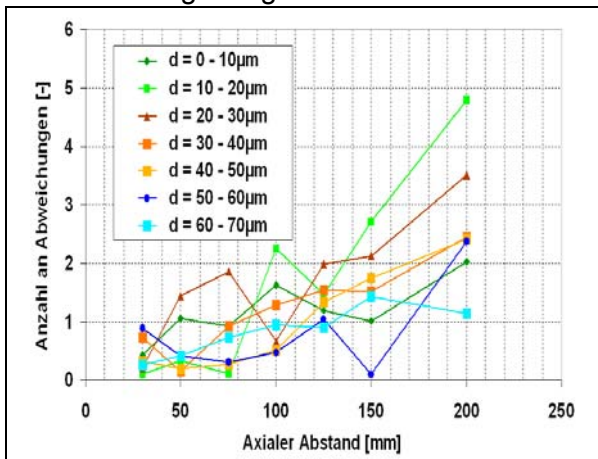


Bild 8: Anzahl an Abweichungen für verschiedene axiale und radiale Abstände

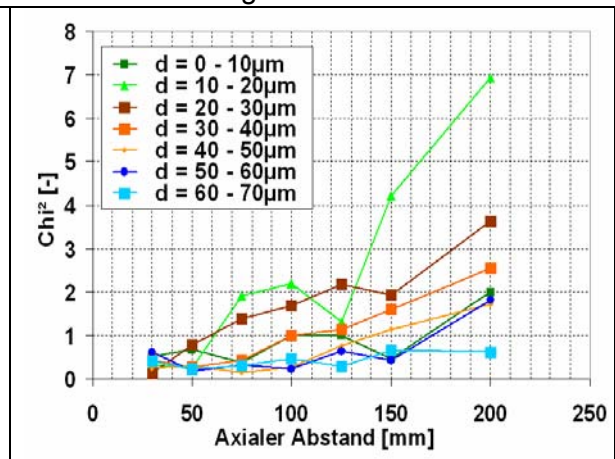


Bild 9: Chi-Quadrat für verschiedene axiale und radiale Abstände

Alle Durchmesserklassen (Bild 8) folgen dem gleichen Trend, dass mit zunehmenden axialen Abstand ebenfalls die Anzahl an Abweichungen zunimmt. Der größte Wert für die Anzahl an Abweichungen kann dabei für die Durchmesserklasse von 10 bis 20µm ermittelt werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine Übereinstimmung mit der vorher angestellten Betrachtung der Gesamtverteilung. Bezieht man jedoch die in Bild 9 dargestellten Chi-Quadrat-Werte mit in die Betrachtung ein, so zeigt sich zwar auch hier der gleiche beschriebene Trend, nur befinden sich alle Werte unterhalb eines kritischen Wertes. Das bedeutet, dass zwar ein prinzipieller Trend vorliegt, dieser jedoch nicht signifikant ist und durch stochastische Fluktuationen begründet sein kann. Im Gegensatz dazu zeigt sich für die in Bild 10 und 11 dargestellten Ergebnisse für die verschiedenen Geschwindigkeitsklassen ein anderes Ergebnis.

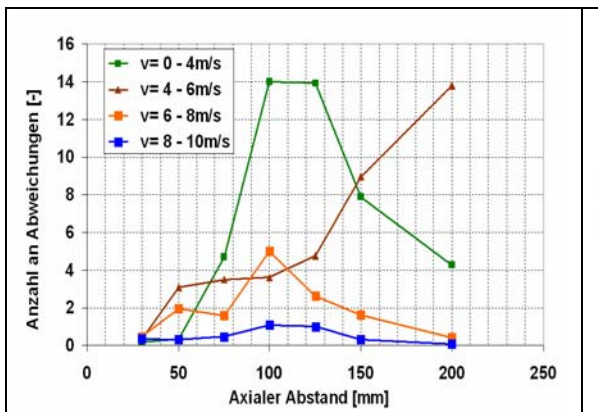


Bild 10: Anzahl an Abweichungen für verschiedene axiale und radiale Abstände

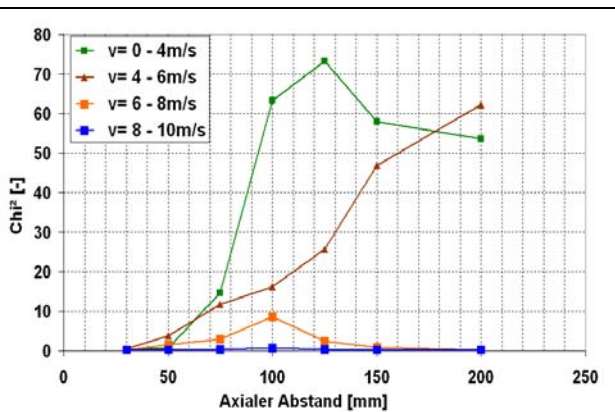


Bild 11: Chi-Quadrat für verschiedene axiale und radiale Abstände

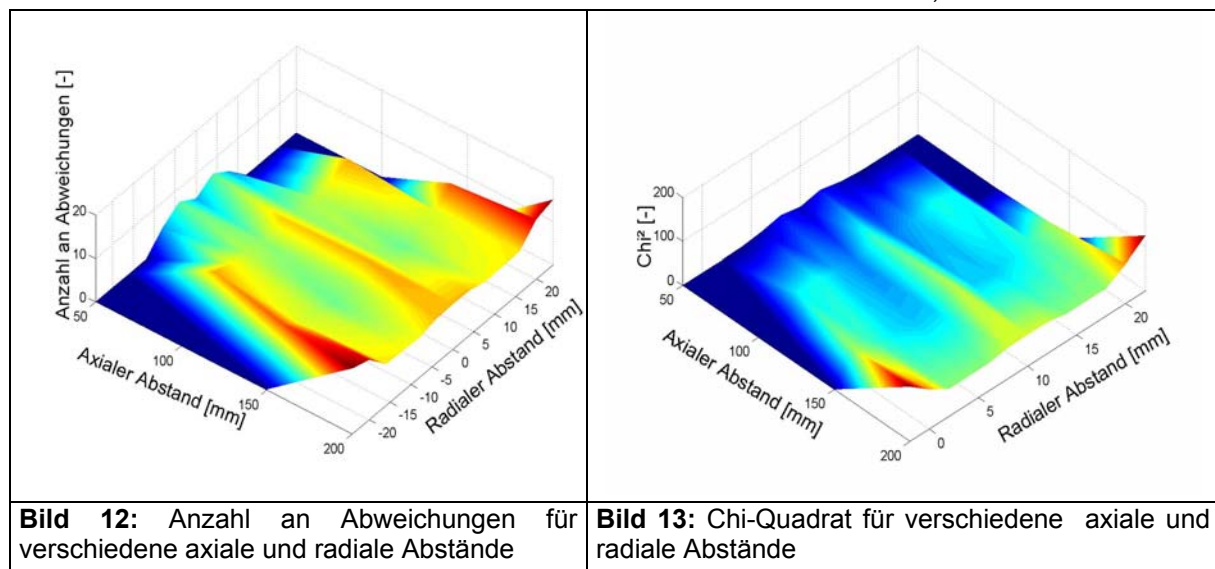
Anhand von Bild 10 erkennt man, dass die beiden untersten Geschwindigkeitsklassen die größte Anzahl an Abweichungen aufweisen. Mit zunehmender Geschwindigkeit verringert sich der Wert drastisch. Die zugehörigen Werte des Chi-Quadrats in Bild 11 zeigen ebenfalls den gleichen Trend auf, da auch hier die größten Chi-Quadrat-Werte für die beiden unteren

Geschwindigkeitsklassen festgestellt werden können. Während bei der Auswertung im Bereich der Durchmesserklassen kein signifikantes Ergebnis festgestellt werden konnte, liegen hier die Chi-Quadrat-Werte für die ersten beiden Geschwindigkeitsklassen in einem Bereich, der eine signifikante Aussage zulässt. Die Kombination der beiden Parameter ergibt demnach, dass das Vorhandensein von Partikelclustern im Bereich von geringeren Geschwindigkeiten zu erwarten ist.

Insgesamt betrachtet ergibt sich, dass es im Spray des betrachteten Druckzerstäubers Bereiche gibt, in denen ein ausgeprägtes instationäres Verhalten festgestellt werden kann. Diese Bereiche sind vornehmlich in der Spray-Mitte zu finden. Anhand der differenzierten Betrachtung von getrennten Durchmesserklassen ergibt sich, dass die detektierten Cluster keiner bestimmten Partikelgröße zugeordnet werden können. Daraus folgt, dass die Tropfenverteilung innerhalb eines Clusters der Verteilung des Gesamtsprays entspricht. Die Betrachtung einzelner Geschwindigkeitsbereiche zeigt, dass die Cluster in Bereichen niedrigerer Geschwindigkeiten zu finden sind.

Untersuchungen am Zweistoffzerstäuber

Analog zum Druckzerstäuber ist der Zweistoffzerstäuber an verschiedenen axialen und radialen Positionen im Spray untersucht worden. Bild 12 zeigt die Anzahl an Abweichungen und Bild 13 die Chi-Quadrat-Werte bei einem Luft-Volumenstrom von 0,14l/s.



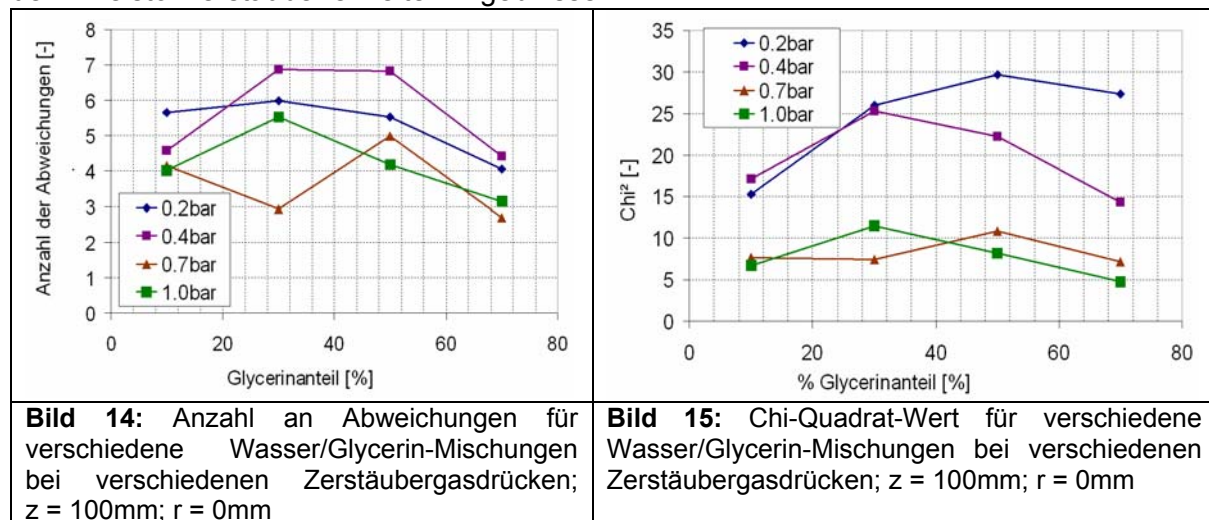
In Bild 12 zeigt sich, dass in Bereichen nahe am Düsenaustritt ein ähnliches Verhalten wie beim Druckzerstäuber festgestellt werden kann, da hier ebenfalls das Maximum außerhalb der Spray-Mitte zu finden ist und am Spray-Rand ein Minimalwert erreicht wird. Mit zunehmendem axialen Abstand zeigt sich hier jedoch ein anderes Verhalten auf. Ab einem axialen Abstand von ca. 100mm von der Düse zeigt sich, dass das Maximum nicht mehr innerhalb des Sprays sondern am Rand des Sprays zu finden ist. Parallel zum Anstieg des Wertes am Spray-Rand kann ebenfalls ein Anstieg direkt in der Spray-Mitte beobachtet werden. Der Bereich zwischen Spray-Rand und Spray-Mitte ist jedoch durch eher geringe Werte charakterisiert. Die in Bild 13 dargestellten Chi-Quadrat-Werte zeigen ein identisches Verhalten der auftretenden Maxima und Minima.

Um eine Aussage über das stationäre/instationäre Verhalten des Sprays machen zu können, ist es wiederum notwendig, beide Parameter miteinander zu kombinieren. Daher lassen sich zwar für geringere axiale Abstände relativ große Werte für die Anzahl an Abweichungen finden, die zugehörigen Chi-Quadrat-Werte sind jedoch so gering, dass die Abweichungen auch in zufälligen Fluktuationen begründet sein können. Für größere axiale Abstände stellt sich der Sachverhalt anders dar. Während für geringe axiale Abstände der Wert des Chi-Quadrats für die Spray-Mitte relativ gering ist, steigt dieser mit zunehmendem axialen Abstand an. Das bedeutet, dass mit zunehmendem Abstand die Wahrscheinlichkeit für das

Auftreten von Clustern steigt. Der gleiche Effekt kann dabei ebenfalls für den Rand des Sprays beobachtet werden, da auch hier beide Parameter mit zunehmendem axialen Abstand hohe Werte erreichen. Hier besteht eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, dass kurze interparticle arrival Zeiten vorhanden sind und das Spray somit ein ausgeprägtes instationäres Verhalten aufweist.

Untersuchungen des Viskositätseinflusses

Um den Einfluss der Fluidstoffwerte auf das stationäre/instationäre Verhalten eines Sprays zu untersuchen, sind an beiden Zerstäubersystemen Untersuchungen mit verschiedenen Wasser-Glycerin-Mischungen durchgeführt worden. Zusätzlich ist beim Zweistoffzerstäuber der Zerstäubergasdruck variiert worden, was einer Variation der Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Zerstäubergas gleichkommt. Die Diagramme 14 und 15 zeigen die für den Zweistoffzerstäuber erzielten Ergebnisse.



Die in Bild 14 dargestellte Anzahl an Abweichungen zeigt, dass diese für die beiden unteren Zerstäubergasdrücke die größten Werte annimmt. Eine generelle Abhängigkeit zwischen der Glycerinkonzentration und dem Zerstäubergasdruck lässt sich nicht erkennen. Bezieht man auch hier die in Bild 15 dargestellten Werte der Chi-Quadrat-Analyse mit ein, werden für die größeren Zerstäubergasdrücke Chi-Quadrat-Werte ermittelt, welche von ihrem Niveau so gering sind, dass die hier festgestellten Abweichungen in zufälligen Fluktuationen begründet sein können. Für die niedrigen Gasdrücke verhält sich dies jedoch anders, da die ermittelten Werte so groß sind, dass eine signifikante Aussage möglich ist. Dabei lässt sich feststellen, dass gerade für den niedrigsten Zerstäubergasdruck und somit für den Bereich geringer Relativgeschwindigkeiten die größten Chi-Quadrat-Werte festgestellt werden können. Hier weist das Spray ein instationäres Verhalten auf. Schlussfolgernd lässt sich somit hieraus ableiten, dass das aufgezeigte instationäre Verhalten eines Sprays bei der Zweistoffzerstäubung vornehmlich auf aerodynamische Effekte zurückzuführen ist, während sich eine Viskositätsveränderung nicht signifikant auswirkt.

Schlussfolgerungen

Bezug nehmend auf die beiden eingesetzten Zerstäuber wurde festgestellt, dass unterschiedliche Effekte für die Bildung von Partikelclustern verantwortlich sind, beide Zerstäuber zeigen unterschiedliches zeitliches Verhalten. Während beim Druckzerstäuber die Bildung von Clustern eher im Kernbereich des Sprays zu beobachten ist, sind Cluster beim Zweistoffzerstäuber eher im Randbereich des Sprays zu finden. Bei beiden Zerstäubern beginnt und steigert sich zunächst mit zunehmendem axialen Abstand die Formation von Clustern während im Fernfeld eine Vermischung der Cluster zu finden ist. Die Auswertung der interparticle arrival time Verteilung zeigt, dass im Fall der

Einstoffzerstäubung (Druckzerstäubung) die Clusterbildung auf den Zerfallsvorgang der Fluidlamelle zurückzuführen ist. Demgegenüber findet die Cluster-Formierung bei der Zweistoffzerstäubung durch die aerodynamischen Wechselwirkungen von Partikeln und Gas in der Scherzone zwischen Spray und Gasumgebung statt, geprägt durch großskalige Wirbelstrukturen.

Anhand der Analyse einzelner Partikel-Durchmesser- und Geschwindigkeitsklassen, lässt sich feststellen, dass keine signifikante Abhängigkeit zwischen dem Tropfendurchmesser und dem Vorhandensein von Partikelclustern besteht. Die Durchmesser- und Geschwindigkeitsverteilung innerhalb eines Clusters korrespondiert mit der Verteilung des gesamten Sprays. Das Vorhandensein von Clustern kann jedoch dem Bereich von geringen Partikelgeschwindigkeiten zugeordnet werden.

Die Bildung von Partikelclustern kann ebenfalls in einem stationären Spray auftreten, was auf die stochastische Struktur eines Sprays zurückzuführen ist, jedoch wird der Begriff des Partikelclusters hier nur für die Situationen verwendet, in denen die interparticle arrival time Verteilung statistisch signifikant von der stationären Poisson-Verteilung abweicht.

Danksagung

Dieser Veröffentlichung liegt ein Forschungsprojekt zugrunde, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Schwerpunktprogramm „Fluidzerstäubung und Sprühvorgänge“ gefördert wurde.

Literatur

- [1] Edwards, C.F.; Marx, K.D.: Multipoint Statistical Structure of the Ideal Spray, Part I: Fundamental Concepts and the Realization Density, *Atomization & Sprays* 5 (1995), 435 – 455
- [2] Edwards, C.F.; Marx, K.D.: Multipoint Statistical Structure of the Ideal Spray, Part II: Evaluating Steadiness Using the Interparticle Time Distribution, *Atomization & Sprays* 5 (1995), 457-505
- [3] Luong, J.T.K.; Sojka, P.E.: Unsteadiness in Effervescent Sprays, *Atomization & Sprays* 9 (1999), 217-257
- [4] Edwards, C.F.; Marx, K.D.; W.K. Chin: Limitations of the ideal phase-doppler system; Extension to spatially and temporally inhomogeneous particle flows, *Atomization & Sprays* 4 (1994), 1 – 40
- [5] Hodges J. T.; Presser C.; Gupta A.K.; Avedisian C.T: Analysis of Droplet Arrival Statistics in a Pressure- Atomized Spray Flame, 25th Int. Symp. On Combustion, pp. 353 – 361, Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1994
- [6] Roismann I.V.; Tropea C.: Drops distributions and flux measurements in sprays using phase Doppler technique, 10th Int. Symp. on Appl. of Laser Techn. to Fluid Mech., Lisbon 2000
- [7] Heinlein J, Fritsching U.: Droplet Clustering in Sprays, Proc. ILASS (Europe) '04, Nottingham England (2004), 412-417