

## Optische Untersuchungen von rücklaufgeregelten Dralldruckdüsen in einem großen Betriebsbereich

### Optical investigation of spill-return atomizers in a large operation range

**Daniel Butscher, Jörg Sauerhering, Frank Beyrau, Jürgen Schmidt**

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, E-Mail: [daniel.butscher@ovgu.de](mailto:daniel.butscher@ovgu.de), Tel.: 0391-67-12559

Dralldruckdüsen, rücklaufgeregelt, Lamellenzerfall, Hohlkegelspray  
swirl pressure nozzle, spillreturn, disintegration of lamella, hollow cone spray

### Zusammenfassung

In vielen technischen Sprühprozessen finden rücklaufgeregelte Dralldruckdüsen Anwendung, wobei diese Düsen unterschiedlichste Größenordnungen bezüglich des Durchsatzes abdecken. In dieser Untersuchung wurden zwei rücklaufgeregelte Dralldruckdüsen mit verschiedenen Durchsätzen aber gleichem prinzipiellen Aufbau bezüglich der Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten mittels Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) miteinander verglichen. Anschließend wurden bei beiden Düsen die Primärzerfallsregime an der Lamelle mit Hilfe von High-Speed-Aufnahmen durch das Schattenverfahren visualisiert. Es konnte bei beiden Düsen dominierende Zerfallsform identifiziert werden.

### Einleitung

Rücklaufgeregelte Dralldruckdüsen werden aufgrund ihrer einfachen Regelung des versprühten Massenstromes, bei annähernd ähnlicher Zerstäubungsqualität, häufig in verfahrenstechnischen Prozessen verwendet. Darunter fallen z.B. die Kühlung von Gasen zur Vermeidung von Temperaturspitzen in energieintensiven Prozessen durch die Zerstäubung von Wasser sowie der Einsatz bei der Rauchgasreinigung in der Zementindustrie und in Müllverbrennungsanlagen unter der Verwendung von Suspensionen. Entscheidend für die Auswahl der Zerstäuber ist die Sprayqualität, deren Anforderung an die teils sehr unterschiedlichen Anwendungsfälle gebunden ist. Für eine Effizienzsteigerung der Prozesse ist somit immer eine Charakterisierung des erzeugten Sprays erforderlich. Hierbei spielt die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) eine wichtige Rolle. Jedoch ist diese Form der Spraycharakterisierung oft nicht ausreichend, wenn eine Optimierung des Zerstäubers, beispielsweise durch Änderung des Düsendesigns, realisiert werden soll. In solchen Fällen kommen zunehmend Simulationen der Zerstäubungsprozesse als Unterstützung zum Einsatz. Für Simulationen sind besonders die Einflüsse bzw. die Ursachen einer vorgenommenen Änderung der Geometrie auf das erzeugte Spray von Bedeutung, die eine PDA-Analyse allein nicht hinreichend genau aufzeigen kann. Für Dralldruckdüsen können Untersuchungen der Lamelle und deren Zerfallsregime eindeutiger Aussagen zum Einfluss der Geometrie auf die erzeugten Tropfeneigenschaften liefern, wobei sich für eine Einteilung der Zerfallsregime in der Literatur Ansätze finden lassen. Diese beziehen sich jedoch hauptsächlich auf Hohlkegelsprays von einfachen Dralldruckdüsen, also Düsen ohne Rücklauf. Lefebvre 1988 verwendet als Unterteilung der Regime des Primärzerfalls einer Lamelle den Rand-, Wellen- und Lochzerfall und bezieht sich dabei auf Untersuchungen von Fraser und Eisenklam 1953. Bayvel und Orzechowski 1993 listen ebenfalls diese

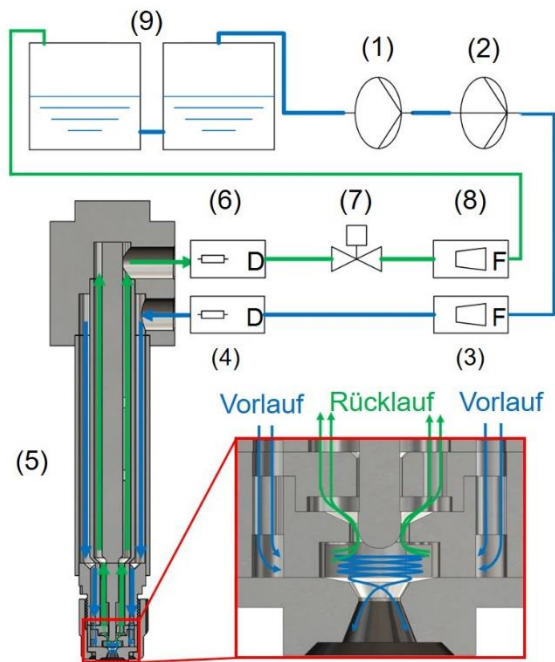
drei Zerfallsregime für eine freie Flüssigkeitslamelle bei einem Dralldruckzerstäuber auf. Wozniak 2013 unterteilt die Regime in Zerfall durch Randkontraktion, Zerfall durch aerodynamische Wellenbildung und den turbulenten Lamellenzerfall. Zudem erwähnt er, dass der Zerfall durch Lochbildung besonders im Vakuum und bei Emulsionen beobachtet wurde. Walzel 1982 unterscheidet ebenfalls in Rand-, Wellen- und turbulenten Zerfall, wobei er den Zerfall durch Lochbildung als eigenständiges Regime anführt, welches als Überlagerung in den anderen Regimen, besonders im Wellen- und turbulenten Zerfall, zu beobachten ist. Für die industriellen Anwendungen spielt der Zerfall durch Randkontraktion aufgrund der darin entstehenden großen Tropfen eine eher untergeordnete Rolle. Laut Musemic 2013 sind für praktische Anwendungen hauptsächlich der Zerfall durch aerodynamisches Zerwellen und der turbulente Lamellenzerfall von Bedeutung, wobei er ebenfalls erwähnt, dass der Zerfall durch Lochbildung bei beiden Zerfallsformen mit zu beobachten sei.

Gegenstand dieses Beitrages ist die qualitative Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Zerfallsformen einer Hohlkegellamelle und den daraus resultierenden Tropfengrößen an einem relativ kleinen rücklaufgeregelten Dralldruckzerstäuber mit einem Durchsatz bis maximal 50 kg/h und einem im Vergleich dazu deutlich größeren Zerstäuber gleicher Art mit maximal 1000 kg/h Durchsatz.

## Versuchsaufbau und Auswertemethoden

Die Versuchsanlage ist bei beiden Zerstäubern identisch aufgebaut, was schematisch in Abb. 1 dargestellt ist. Zentrum der Anlage ist die Lanze (5), an der die Düsen mittels einer Überwurfmutter verschraubt werden. Am Lanzenkopf gibt es zwei Bohrungen, wobei die erste für den Vorlauf und die zweite für den Rücklauf genutzt wird. Das Wasser wird mittels einer Ansaugpumpe Typ JP 9 (1) von der Firma Grundfos aus zwei Tanks (9) gefördert und an eine Kreiselpumpe Typ CRNE 1 (2), ebenfalls von der Firma Grundfos, weitergegeben. Mit Hilfe der regelbaren Kreiselpumpe kann der Vorlaufdruck  $p_{VL}$  für die Zerstäuber eingestellt werden. Durch ein Ventil (7) im Rücklauf kann die Menge an Rücklaufmassenstrom  $\dot{M}_{RL}$  und damit auch der versprühte Massenstrom  $\dot{M}_{Spray}$  geregelt werden. Beide Zerstäuber sind bis zu 1/3 ihres maximalen Durchsatzes regelbar. Um den Messfehler gering zu halten, wurde der Massenstrom im Vorlauf  $\dot{M}_{VL}$  (3) und im Rücklauf  $\dot{M}_{RL}$  (8) aufgrund der unterschiedlichen Durchsätze bei beiden Zerstäubern mit unterschiedlichen Messgeräten, bzw. Messbereichen, erfasst. Für den großen Zerstäuber kamen im Vorlauf, wie auch im Rücklauf, Schwebekörper-Durchflussmessgeräte vom Typ H250 der Firma Krohne zum Einsatz. Diese Sensoren erfassen die Volumenströme, die mit Hilfe einer Temperaturmessung und der dazugehörigen Dichte von Wasser über die Auswertesoftware in Massenströme umgerechnet wurden. Bei der kleinen Düse kamen Corioliskraft-Massenstromsensoren vom Typ MASS 2100 im Vor- und im Rücklauf zum Einsatz. Aus der Differenz der Massenströme  $\dot{M}_{VL}$  und  $\dot{M}_{RL}$  ist der versprühte Massenstrom  $\dot{M}_{Spray}$  berechnet worden.

Weiterhin wurde der Vorlaufdruck  $p_{VL}$  mittels eines Drucksensors (4) vom Typ S20 von der Firma WIKA und der Rücklaufdruck  $p_{RL}$  mittels eines Kistler-Drucksensors Typ 4073A50 gemessen. Das Wasser im Rücklauf wurde zurück in die Tanks (9) geleitet.



**Nr. Bezeichnung**

- (1) Grundfos JP 6 Ansaugpumpe
- (2) Grundfos CRNE 1 vertikale Kreiselpumpe
- (3) große Düse:  
Krohne Schwebekörper-Durchflussmessgerät Typ H250
- kleine Düse:  
MASS 2100 Corioliskraftsensor
- (4) WIKA Drucksensor Typ S20
- (5) Düsenslanze
- (6) Kistler Drucksensor Typ 4073A50
- (7) Rücklaufregelventil
- (8) große Düse:  
Krohne Schwebekörper-Durchflussmessgerät Typ H250
- kleine Düse:  
MASS 2100 Corioliskraftsensor
- (9) 2 mal 600l Wassertanks

Abb. 1: RI-Schema der Anlage mit der Lanze, Schnittbild der Düse und die Bezeichnungen der wichtigsten Instrumente

Die beiden Düsen sind rücklaufgeregelte Dralldruckzerstäuber von der Firma Fluidics® Instruments. Beide Zerstäuber besitzen eine Wirbelkammer mit 4 tangentialen Einlaufkanälen und den gleichen prinzipiellen Aufbau, welcher in Abb. 2 zu sehen ist. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer geometrischen Dimensionen und dementsprechend in ihrem Durchsatz. Auf der linken Seite der Abb. 2 sind die Eigenschaften der Rücklaufzerstäuber aufgelistet, wobei sich die Massenströme auf die Verwendung von Wasser bei Raumtemperatur beziehen.

|                      | große Düse               | kleine Düse       | a) |
|----------------------|--------------------------|-------------------|----|
| Firma                | Fluidics® Instruments    |                   |    |
| Einlass Wirbelkammer | tangentielle Einströmung |                   |    |
| Anzahl Einlasskanäle | 4                        |                   |    |
| $D_{WK}$             | 10 mm                    | 5,5 mm            |    |
| $D_{Aus}$            | 3,5 mm                   | 1,0 mm            |    |
| $\dot{M}_{Spray}$    | 300 kg/h - 1000 kg/h     | 16 kg/h - 50 kg/h |    |

Abb. 2 Eigenschaften der rücklaufgeregelten Düsen mit a) Schnittbild der Wirbelkammer b) Schnittbild durch die gesamte Düse

Die Analyse der Tropfengeschwindigkeiten und der Tropfendurchmesser erfolgte mit Hilfe eines 2-D-Phasendoppler-Anemometers von Dantec Dynamics. Das System verwendet einen Argon-Ionen-Laser vom Typ Stabilite 2017 von Spectra-Physics. Als Messebene wurde bei beiden Zerstäubern eine Distanz zum Düsenaustritt von 50 mm gewählt, wobei die Ebene bei der kleinen Düse in den radialen Positionen 4 mm, 12 mm, 20 mm, 24 mm und 28 mm vermessen wurde. Bei der großen Düse erfolgte, aufgrund der größeren Ausbreitung des Sprays, alle 10 mm vom Spraykern bis zum Sprayrand eine Messung. In allen Positionen wurden 40.000 Tropfen mit dem PDA-System erfasst und aus diesem Datensatz der Sauter-Mean-Durchmesser  $D_{32}$  sowie die mittlere Tropfengeschwindigkeit für jede radiale Position ermittelt. Für die Mittelung über die gesamte axiale Ebene wurde eine Gewichtung der Daten anhand der radialen Position im Spray und einer berechneten Massenbeaufschlagungsdichte aus den PDA-Daten verwendet.

Der Zerfall der austretenden Flüssigkeitslamelle wurde mittels High-Speed-Visualisierung im Schattenverfahren untersucht. Der Aufbau ist schematisch in der Abb. 3 dargestellt. Als Lichtquelle diente das Blitzlicht-System Ministrobokin 20 TW von der Firma High-Speed Photo-Systeme, mit welchem eine Blitzfrequenz von maximal 20 kHz bei einer Blitzdauer von 25 ns zu erreichen ist. Die Aufweitung der Punktlichtquelle erfolgte mit Hilfe eines Achromats, der in unmittelbarer Nähe zum Lichtbogens montiert ist. Eine zweite Linse und ein Diffusor, welche beide auf einer optischen Schiene montiert sind, komplettierten das Belichtungssystem. Mit Hilfe der zweiten Linse konnte durch Änderung des Abstandes zum Achromaten der Durchmesser des Lichtkegels und damit auch die Lichtintensität auf dem Diffusor bzw. im Bildausschnitt variiert werden. Der Diffusor bewirkte eine geringfügige Lichtstreuung, wodurch der Kontrast zwischen dem Hintergrund und dem zu betrachtenden Objekt reduziert und somit Strukturen auf der Lamellenoberfläche sichtbar wurden. Zudem ist der Hintergrund in seiner Lichtintensität gleichmäßiger ausgeleuchtet.

Für die High-Speed-Aufnahmen ist eine High-Speed-Kamera vom Typ High-Speed-Star X der Firma LaVision in Kombination mit einem Objektiv von Nikon, AF MICRO NIKKOR 200 mm 1:4 D, verwendet worden. Sowohl das Belichtungssystem, wie auch die Kamera waren jeweils an einem 3-Achs-Traversen-System der Firma Isel auf einem Stativkopf befestigt. Mit Hilfe des Stativkopfes und mit den Traversen konnte das gesamte System so positioniert werden, dass das Sichtfeld der Kamera orthogonal zur austretenden Lamellenoberfläche ausgerichtet war, siehe Abb. 3.

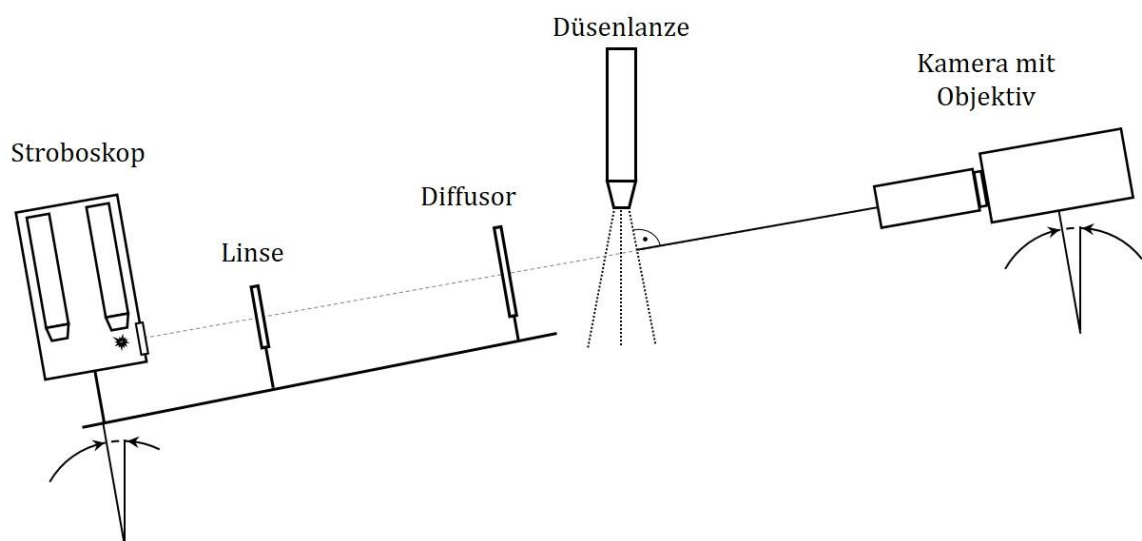


Abb. 3: schematischer Aufbau für die High-Speed-Visualisierung der Lamelle durch das Schattenverfahren

Für die weitere Bearbeitung und anschließende Auswertung der Aufnahmen wurde die Software DaVis von LaVision verwendet. Mittels dieser wurde die unregelmäßige Belichtung durch die Blitzlichtquelle korrigiert, wodurch deutlich hochwertigere Aufnahmen des Lamellenzerfalls erzielt wurden.

## Messergebnisse und Diskussion

Das Ergebnis der Analyse der gewichteten Tropfengrößen beider Zerstäuber ist in der Abb. 5 links, das der Tropfengeschwindigkeiten rechts dargestellt. Grundsätzlich erzeugt der kleinere Zerstäuber ein Spray mit feineren Tropfen, lediglich im Teillastbereich (0,6) konnte ein größerer mittlerer Tropfendurchmesser beobachtet werden. Der Verlauf der Kurve für den Tropfendurchmesser zeigt, dass von Kleinlast (0,3) bis Teillast (0,6) die Tropfengrößen im Spray nur geringfügig sinken. Erst über den Teillastbereich (0,6) hinaus bis in den Volllastbereich (1,0) wurden deutlich kleinere Tropfengrößen festgestellt. Der große Zerstäuber zeigt hingegen ein anderes Verhalten, denn hier sinkt die Tropfengröße vom Kleinlast- (0,3) zum Teillastbereich (0,6) zunächst deutlich. Betreibt man die Düse jedoch über den Teillastbereich (0,6) hinaus, so bleiben die Tropfengrößen relativ ähnlich. Insgesamt sind die entstehenden Tropfengrößen bei beiden Zerstäubern trotz der großen Unterschiede in ihren geometrischen Dimensionen, wie Austrittsdurchmesser oder Durchsatzrate, verhältnismäßig ähnlich.

Gegensätzlich verhalten sich jedoch die Tropfengeschwindigkeiten, siehe Abb. 4 (rechts), wo beim großen Zerstäuber deutlich größere Tropfengeschwindigkeiten gemessen wurden. Der Anstieg der Tropfengeschwindigkeiten über den betrachteten Betriebsbereich ist bei beiden Zerstäubern hingegen ähnlich.

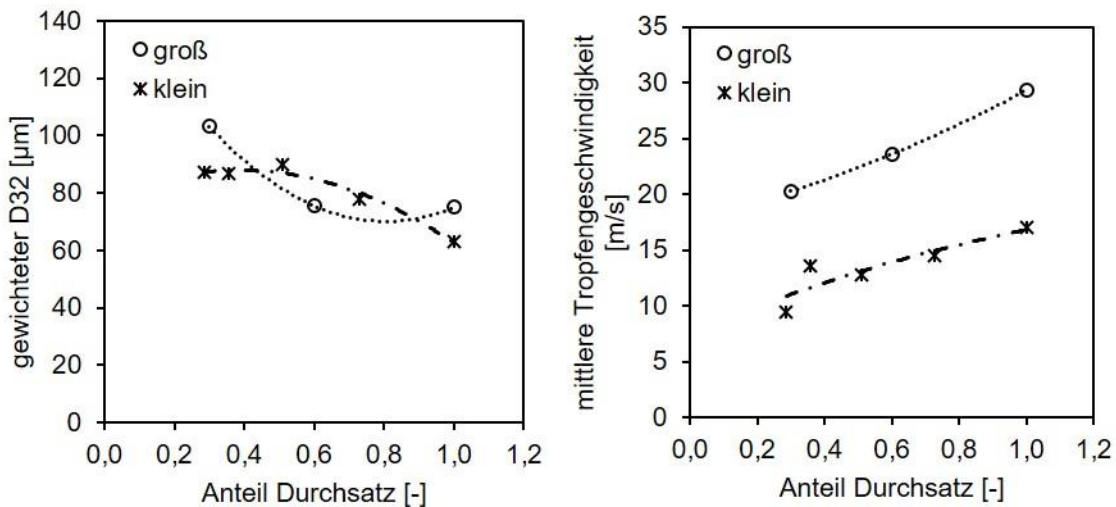


Abb. 4: gewichteter Sauter-Durchmesser D32 (links) und mittlere Tropfengeschwindigkeit (rechts) für beide Düsen bei einem VLD von 22 bar und variablen Durchsatz für die Messebene 50 mm

Somit ergibt sich die Frage was die Ursache für die verhältnismäßig ähnlichen Tropfengrößen, trotz der enormen geometrischen Unterschiede, ist. Mögliche Erklärungen für die auftretenden Tropfenverteilungen können im Primärzerfall an der Lamelle zu finden sein, da deren Eigenschaften, bzw. das Zerfallsregime der Lamelle, der Ausgangspunkt für die nachfolgenden Tropfengrößenverteilungen ist.

Um eine qualitative Auswertung der auftretenden Zerfallsformen vornehmen und miteinander vergleichen zu können, wurden High-Speed-Visualisierungen der Lamellen beider Düsen vorgenommen. Das Ergebnis der Visualisierung ist für die kleine Düse in Abb. 5 und für die große Düse in Abb. 6 bei einem Vorlaufdruck von 22 bar und variierenden Durchsätzen dargestellt. In beiden Bildreihen ist der Zerfall durch aerodynamisches Zerwellen mit Überlagerung der

Lochbildung nachweisbar. Einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der unterschiedlichen Zerfallsregime hat die Geschwindigkeit der austretenden Lamelle, wobei mit Erhöhung des zerstäubten Massenstroms die Austrittsgeschwindigkeit steigt und somit die Störungen in Form von Wellen deutlich zunehmen. Der Zusammenhang zwischen der zunehmenden Geschwindigkeit der Lamelle und dem Einleiten des Zerfalls durch das aerodynamische Zerwellen, bzw. das exponentielle Wellenwachstum, wurde bereits unter anderen von Dombrowski und Johns 1963 gezeigt. Besonders deutlich ist bei der kleinen Düse die Zunahme der Wellenbewegung mit steigendem Durchsatz zu erkennen, was vermutlich auf eine geringere Lamellendicke zurückzuführen ist, denn nach Squire 1953 fördern dünne Lamellen das Störungswachstum. Da bei der großen Düse trotz der höheren Lamellengeschwindigkeit das Wellenwachstum eher gehemmt auftritt, müsste im Umkehrschluss eine dickere Lamelle vorhanden sein.

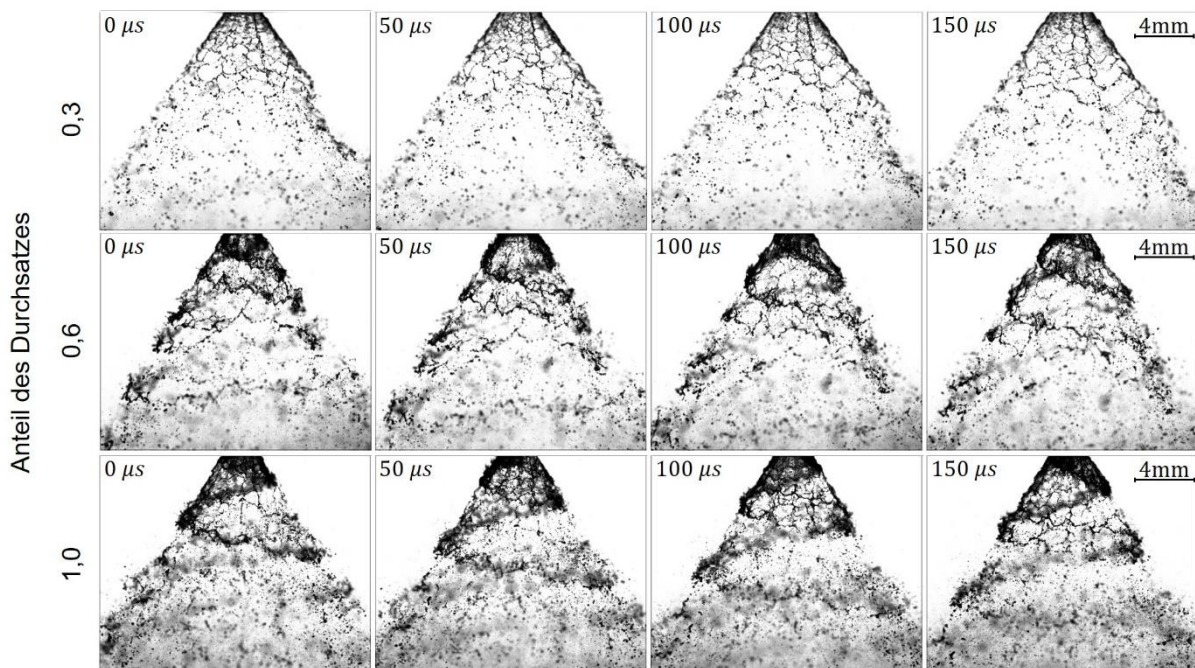


Abb. 5 Lamellenzerfall bei VLD 22 bar und unterschiedlichen Durchsätzen für die kleine Düse

Dafür erscheint der Zerfall durch Lochbildung bei der großen Düse eine dominierende Rolle einzunehmen. Die Entstehung der Lochbildung geht auf Berührungen der beiden schwingenden Lamellenoberflächen zurück, deren Ursprung laut Cooper und Yule 2001 auf Schwankungen des Luftkernes im Inneren der Düse zurückzuführen sind. Nach Fraser et al. 1962 entstehen bei dem Zerfall durch Lochbildung Tropfen, die im Mittel 1,2 bis 1,5mal größer ausfallen, als beim aerodynamischen Zerwellen. Vergleicht man die berechneten gewichteten  $D_{32}$  aus den PDA-Messungen beider Düsen in der Abb. 4 links im Kleinlast- (0,3) und im Volllastbereich (1,0), so ist festzustellen, dass das Verhältnis zwischen der großen und der kleinen Düse, 1,2 beträgt und somit mit der Aussage von Fraser et al. 1962 übereinstimmt. Lediglich der Teillastbereich (0,6) bildet eine Ausnahme, deren Ursache eventuell in der Veränderung der Strömung im Düseninneren einer rücklaufgeregelten Dralldruckdüse zu finden ist. Laut Löffler-Mang 1992 weist die Düseninnenströmung verstärkt Wirbelbewegungen bei mittleren Rücklaufverhältnissen auf. Diese zusätzlichen Turbulenzen in der Wirbelkammer sorgen für weitere Störungen im Wasserfilm der Lamelle, wodurch der Zerfall durch aerodynamisches Zerwellen eventuell bei der kleinen Düse düsennäher erfolgt. Somit entstehen tendenziell größere Ligamente und Tropfen, was schließlich bewirkt, dass der berechnete  $D_{32}$  im Teillastbereich nur

geringfügig sinkt. Im Gegensatz zu der kleinen Düse könnte eine zusätzliche Störung der Lamelle durch die Turbulenzen im Inneren bei der großen Düse zu einer verstärkten Anzahl an Lochbildungen in der Lamelle führen, was die Ursache für kleinere Ligamenten sein würde und folglich in einen reduzierten  $D_{32}$  resultiert. Die optische Auflösung der Visualisierung lässt jedoch diesbezüglich keine quantitativen Aussagen zu.

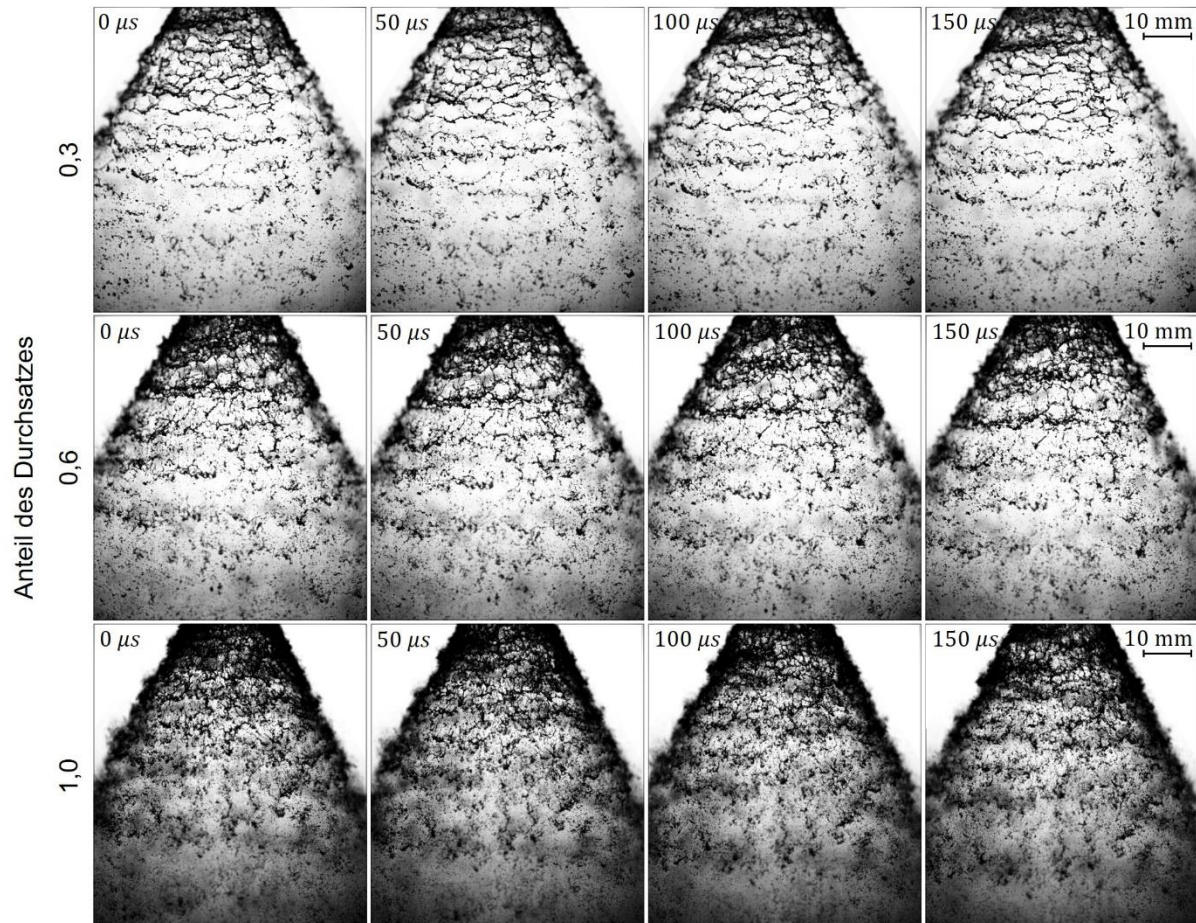


Abb. 6 Lamellenzerfall bei VLD 22 bar und unterschiedlichen Durchsätzen für die große Düse

Somit kann festgehalten werden, dass die High-Speed-Aufnahmen der Lamellen und deren Zerfallsregime bei der Klärung der ermittelten PDA-Daten hilfreich, aber für eine eindeutige Erklärung nicht ausreichend sind. Um genauere Antworten auf die gemessenen Tropfeneigenschaften zu finden, ist die Messung von Eigenschaften der Lamellen, wie Lamellendicke, Lamellengeschwindigkeit, sowie Austrittswinkel und deren Änderung in Abhängigkeit von den Betriebspunkten und dem Abstand vom Düsenaustritt notwendig.

### Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Untersuchung wurden mit Hilfe der Phasen-Doppler-Anemometrie die Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen von rücklaufgeregelten, sich im Durchsatz jedoch um Größenordnungen unterscheidenden Dralldruckdüsen analysiert. Die ermittelten  $D_{32}$ -Durchmesser und mittleren Tropfengeschwindigkeiten wurden unter Verwendung der radialen Position und einer aus den PDA-Daten berechneten Massenbeaufschlagungsdichte über die axiale Ebene gemittelt. Der Vergleich der Ergebnisse für beide Zerstäuber zeigte, dass die Tropfengeschwindigkeiten bei dem großen Zerstäuber deutlich höher ausfallen. Die Tropfengrößen fallen trotz der enormen Unterschiede der Düsengeometrien ähnlich aus, wobei sich

die Abhängigkeit der Tropfengrößen mit steigendem Durchsatz bei beiden ähnlich verhält. Lediglich im Teillastbereich (0,6) der Düsen ist eine entgegengesetzte Änderung der Tropfengröße festgestellt worden.

Zur besseren Interpretation der Ergebnisse der PDA-Messungen zu erhalten, wurde mit Hilfe von High-Speed-Visualisierungen der Zerfall der austretenden Lamelle untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass bei der kleinen Düse die Lamelle hauptsächlich durch aerodynamisches Zerwellen zerfällt, wohingegen bei der großen Düse vorwiegend der Zerfall durch Lochbildung zu beobachten war. Laut Fraser et al. 1962 ist bekannt, dass der Zerfall durch Lochbildung etwa 1,2 bis 1,5mal größere Tropfen erzeugt. Dieser Sachverhalt konnte anhand der PDA-Daten im Kleinlast- (0,3) und Volllastbereich (1,0) der beiden untersuchten Düsen bestätigt werden. Lediglich der Teillastbereich (0,6) zeigt ein entgegengesetztes Verhalten. In diesem Punkt generiert die größere Düse ein feineres Spray als die kleine Düse. Anhand der Visualisierung der Lamellen konnte hierfür keine Erklärung gefunden werden. Jedoch hat Löffler-Mang 1992 eine Veränderung der Strömungsbedingungen in der Wirbelkammer bei mittleren Rücklaufverhältnissen festgestellt, deren Einfluss auf die unterschiedlichen Zerfallsregime eventuell die Ursache für die gemessenen Tropfengrößen darstellt. Für eine genauere Erklärung dieses Ergebnisses könnte die Analyse von weiteren Lamellenparameter, wie die Lamellengeschwindigkeit oder Lamellendicke, in Abhängigkeit des Abstands zum Düsenaustritt und der Betriebsparameter hilfreich sein.

## Literatur

**Musemic, Emir, 2013:** „Experimentelle Untersuchung zum Tropfenbildungsprozess an Hohlkegeldüsen“, Verlag Dr. Hut

**Lefebvre, A.H., 1988:** „Atomization and Sprays“, Taylor & Francis, Oxford

**Wozniak, Günter, 2013:** „Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte“, Springer-Verlag

**Walzel, P., 1982:** „Auslegung von Einstoff-Druckdüsen“, Chem.-Ing.-Tech.;54(4), 313-328

**Dombrowski, N., Johns, W. R., 1963:** „The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets“, Chemical Engineering Science, 18(3), pp. 203-214.

**Squire, H. B., 1953:** „Investigation of the Instability of a Moving Liquid Film“, British Journal of Applied Physics, 4(6), pp. 167-169

**Löffler-Mang, M.;1992:** „Düseninnenströmung, Tropfenentstehung und Tropfenausbreitung bei rücklaufgeregelten Drall-Druckzerstäubern“, Dissertation, Karlsruhe

**Fraser, R. P., Eisenklam, P., 1953:** „Research into the Performance of Atomizers for Liquids“, Imp. Coll. Chem. Eng. Soc. J., 18, pp. 52-68

**Bayvel, L., Orzechowski, Z., 1993:** „Liquid Atomization“, Verlag Taylor & Francis

**Cooper, D., Yule, A.Y., 2001:** „Waves on the air core/liquid interface of a pressure swirl atomizer“ In Proc. ILASS-Europe

## Nomenklatur

### Symbole

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $\dot{M}$                | Massenstrom [kg/h]                        |
| $\dot{M}_{\text{Spray}}$ | Versprühter Massenstrom [kg/h]            |
| $D_{32}$                 | Sauter-Mean-Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ] |
| $p$                      | Druck [bar]                               |
| $D$                      | Durchmesser [mm]                          |

### Indizes

|     |              |
|-----|--------------|
| VL  | Vorlauf      |
| RL  | Rücklauf     |
| Aus | Austritt     |
| WK  | Wirbelkammer |