

Primärzerfall nicht-newtonscher Flüssigkeiten im Nahfeld eines Hochrotationszerstäubers für Spritzlackierprozesse

Bo Shen², Q. Ye¹, O. Tiedje¹, J. Domnick²

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart

² Hochschule Esslingen, Esslingen

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit numerischen und experimentellen Untersuchungen des primären Zerfallsprozesses bei Hochrotationszerstäubern. Es werden Ergebnisse von Untersuchungen vorgestellt, die sich gezielt auf den Bereich unmittelbar am Glockentellerrand, in dem der Zerfall stattfindet, konzentrieren. Unter Anwendung der VOF-Methode (Volume of Fluid) und des Reynolds-Spannungs-Turbulenzmodells werden mittels der CFD-Software AnsysFluent der Desintegrationsprozess und das entstehende zweiphasige Strömungsfeld simuliert. Als Einlaßbedingungen für die Zerfallssimulationen werden die Eigenschaften des Flüssigkeitsfilms an der Glockenkante, d. h. Filmdicke, Geschwindigkeiten und scheinbare Viskosität herangezogen, die sich aus eigenen früheren Arbeiten ergaben. Das in den Untersuchungen verwendete Lackmaterial zeigt, gemessen mit Rotations- und Kapillarviskosimetern, ein scherverdünnendes (pseudoplastisches) Verhalten.

In den Simulationen werden zwei verschiedene Flüssigkeitszerfallsmechanismen gefunden, die auch durch experimentelle Untersuchungen mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet werden können. Mittels eigener, in AnsysFluent integrierter benutzerdefinierter Funktionen (UDFs), erfolgt eine an den Zerfallsprozess anschließende Erkennung aller nicht mehr weiter zerfallender Tropfen, wodurch die weitere Simulation der Tropfenbewegungen mit Hilfe der klassischen Euler-Lagrangeschen Methode zur Behandlung zweiphasiger disperser Strömungen durchgeführt werden kann. Auf diese Weise lassen sich auch alle Tropfeneigenschaften wie Durchmesser, Geschwindigkeit und Position bestimmt werden. Die durch die Simulation erhaltenen Tropfengrößenverteilungen werden abschließend mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Schlüsselwörter: Numerische Simulation, Rotationszerstäuber, Fadenbildung, Flüssigkeitszerfall

Einführung

Die sogenannten Hochrotationszerstäuber sind in automatisierten Lackierprozessen weit verbreitet. Im Vergleich zu den in anderen Anwendungen, z. B. der Sprühtrocknung oder der Pulverherstellung, verwendeten Rotationszerstäubern sind diese Zerstäuber durch einen kleinen Glockendurchmesser zwischen 20 und 70 mm und sehr hohen Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 70.000 1/min gekennzeichnet. Sie liefern hervorragende Lackfilmeigenschaften sowie hohe Auftragswirkungsgrade aufgrund der elektrostatischen Unterstützung und der Möglichkeit, Tropfengröße und Tropfentransport separat zu steuern. Der Einfluss komplexer Materialeigenschaften auf die Zerstäubung ist jedoch noch ein offenes Forschungsthema.

Bereits seit einigen Jahren werden intensive Forschungsarbeiten durchgeführt, welche die Zerstäubung mit Hochrotationszerstäubern zum Inhalt haben (z. B. [1-3]). Darunter sind einige wenige Veröffentlichungen, in denen Ergebnisse experimenteller Arbeiten [4] vorgestellt werden, die sich mit Hochrotationszerstäubern, wie sie in Lackierprozessen verwendet werden. Domnick et al. [5] stellten erstmals numerische Untersuchungen vor, mit denen das zweiphasige Strömungsfeld im Verteiler eines Rotationszerstäubers und die Bildung des freien Films auf der Glockenoberfläche berechnet werden. Die Zellenauflösung der Rechendomäne war jedoch aufgrund der verfügbaren geringen Rechenkapazität begrenzt. Die Viskosität des bei ihrer Untersuchung verwendeten Lackmaterials wurde als konstant angenommen, d. h. das nicht-Newtonsche Verhalten vieler Lacke wurde nicht berücksichtigt. In bisherigen eigenen Arbeiten [6] wurde in den numerischen Untersuchungen ein wesentlich feineres Netz verwendet; ebenso wurde das strukturviskose Fließverhalten des Lackmaterials berücksichtigt. Es konnte beobachtet werden, wie sich das Lackmaterial ausgehend von der Düse über die Verteilerscheibe bis hin zur inneren Oberfläche der Glocke ausbreitet. Dabei spielt die Blockierwirkung der Bolzen, durch die Verteilerscheibe und Glocke zusammengefügt werden, eine wichtige Rolle. Der Lack bildet am äußeren Rand der Verteilerscheibe Tropfen und Filamente, die danach auf die innere Oberfläche der Glocke treffen und dort einen Film bilden. Anschließend fließt das Lackmaterial als dünner Film zum Glockentellerrand. Eine gewisse Zeit nach dem Einschalten ist die innere Oberfläche der Glocke vollständig vom Lackmaterial benetzt. Die Verteilung der Filmdicke ist jedoch nicht homogen.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf den Bereich nahe der Glockentellerrand, in dem die Zerstäubung des Lackes stattfindet. Durch diese Beschränkung ist es möglich, bei vertretbarem Ressourcen- und Zeitbedarf ein sehr feines Rechengitter zu realisieren. Die für die Simulation des Zerfallsprozesses erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen (Filmdicke, Luftgeschwindigkeiten etc.) wurden den bisherigen numerischen Simulationen der Schichtbildung auf der Glocke entnommen.

Eigenschaften des Zerstäubers

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden mit einem Hochrotationszerstäuber der EISENMANN LacTec GmbH durchgeführt, der in automatisierten Lackieranlagen eingesetzt wird. Abbildung 1 zeigt das CAD-Modell des Zerstäubers und einen Querschnitt der Glocke. Das Lackmaterial wird der Glocke durch eine Düse mit einem Durchmesser von 1,6 mm im Bereich der Drehachse zugeführt. Diese Lackdüse ist von einem 0,5 mm breiten Ringspalt umgeben, durch den Umgebungsluft angesaugt wird. Dieser Luftstrom trägt zu einem stabilen Flüssigkeitsfilm auf der Glocke bei und verhindert so die Bildung von Flüssigkeitsansammlungen oder unbenetzten Zonen auf der Glockenoberfläche, wodurch die Zerstäubungsqualität verbessert werden kann [7]. Hinter der Lackdüse befindet sich eine innere Verteilerscheibe mit einem Durchmesser von 20 mm. Die Verteilerscheibe und die Glocke werden mit Hilfe dreier Bolzen zusammengehalten. Im Betrieb rotieren Verteilerscheibe und Glocke mit der vorgegebenen Drehzahl, während die Lackdüse statisch bleibt. Der Lack strömt aus der Düse auf die Hinterseite der Verteilerscheibe und bildet darauf einen Lackfilm. Dieser Lackfilm wird durch Zentrifugalkräfte radial beschleunigt und wird schließlich in einem bestimmten Abstand von der Drehachse instabil. Anschließend verteilt sich die Farbe sowohl auf der Oberfläche der Ver-

teilerscheibe als auch auf der Innenfläche der Glocke. Der entstehende Film strömt aufgrund der wirkenden Zentrifugalkraft weiter bis zum Glockentellerrand, um dort zerstäubt zu werden. Auf den Bereich des Glockentellerrandes wirken sogenannte Lenkluftströme, die koaxial zur Glockentellerachse aus zwei Ringen von Luftdüsen (innere und äußere Lenkluft) neben der Glocke austreten. Diese Lenklüfte haben die Aufgabe, die Tropfen axial in Richtung Substrat umzulenken. Die Volumenströme der beiden Lenklüfte können individuell angepasst werden.

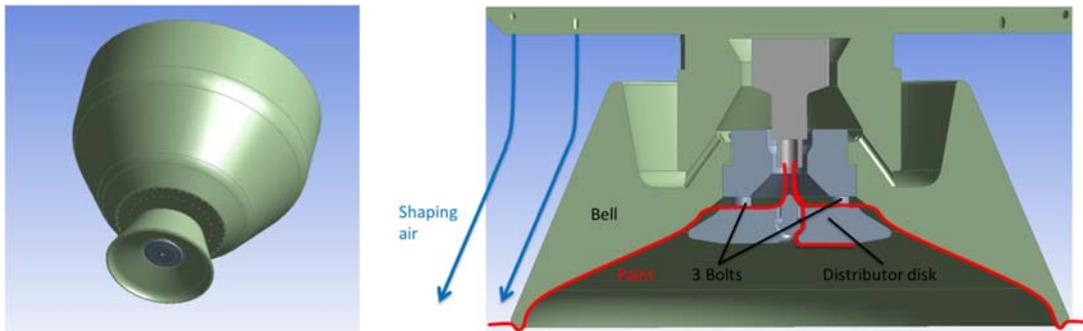


Abb. 1: CAD-Modell des Rotationszerstäubers (links) und Querschnitt der Glocke (rechts)

Rheologische Eigenschaften des Lacks

Für die hier gezeigten Untersuchungen wurde ein realer Lack gewählt, der in automatisierten Lackierprozessen eingesetzt wird und dessen Viskosität, experimentell gemessen mit Rotations- und Kapillarviskosimetern, in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit in Abbildung 2 aufgetragen ist. Es handelt sich um ein insbesondere für wasserbasierende Lacke typisches strukturviskoses Verhalten, das in den Simulationen mit Hilfe des sogenannten Cross-Model [8] berücksichtigt wird. Der Verlauf des Cross-Modells ist ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt.

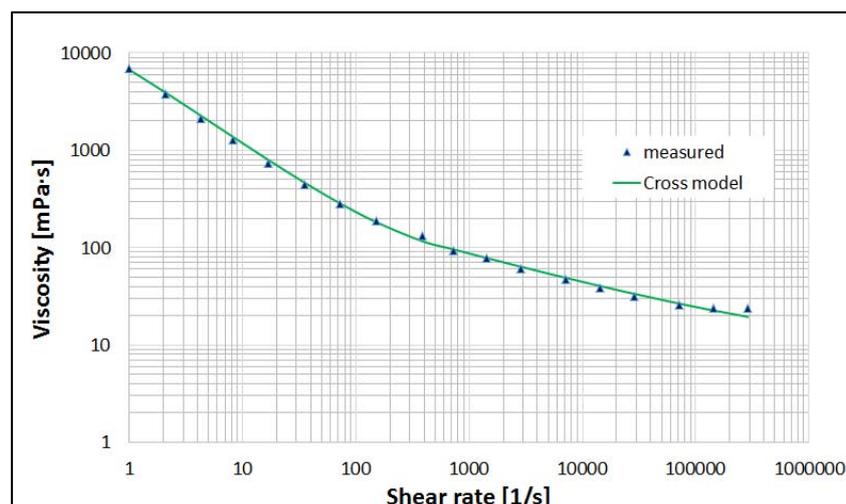


Abb. 2: Viskositätskurve des verwendeten Lackes

Numerische Methoden

Das in den vorliegenden Untersuchungen verwendete Rechengebiet ist in Abb. 3 dargestellt. Verwendet wird lediglich 1/64 des Glockenumfangs, was bei einem Glockendurchmesser von 55 mm einer Tiefe von 2,7 mm entspricht. Ein kleiner Abschnitt der inneren Glockenoberfläche blieb erhalten, d. h. durch eine Ebene senkrecht zur Glockentelleroberfläche in einem Abstand von 1 mm vom Glockentellerrand fließt das Lackmaterial in Form eines Flüssigkeitsfilms in den Rechenbereich. Die Wandbegrenzung der Glocke erstreckt sich um das Filet auf der äußeren Glockenoberfläche. Die Domäne erstreckt sich radial 4 mm und axial 2 mm von der jeweiligen Glockentelleroberfläche. Die obere Begrenzung der Berechnungsdomäne wurde als Lenklufteinlass definiert, um die Auswirkung der Lenkluft auf den Zerfallsprozess zu berücksichtigen.

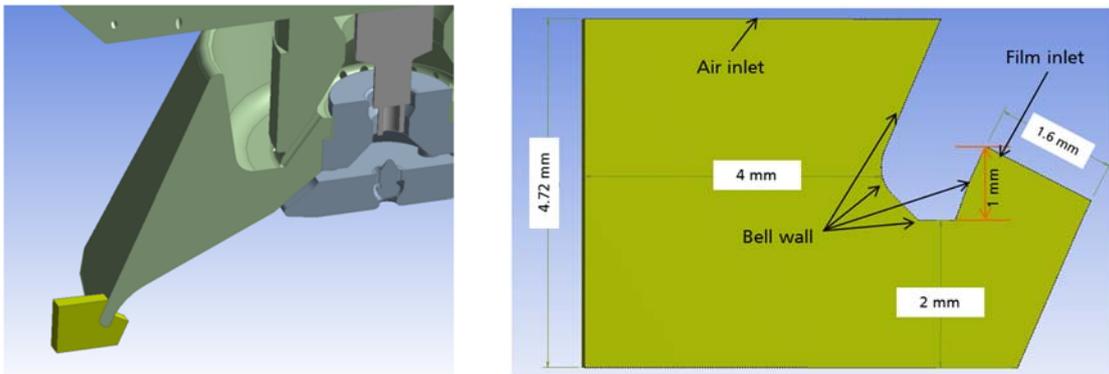


Abb. 3: Rechengebiet

Ein Querschnitt des vernetzten Rechenbereichs ist in Abbildung 4 dargestellt. Grundsätzlich wäre es möglich, das gesamte Rechengebiet mit Hilfe eines strukturierter Gitter zu vernetzen, hier wurden jedoch aufgrund der erforderlichen räumlichen Auflösung 3 verschiedene Gitter miteinander kombiniert. Der Bereich nahe der Unterkante der Glocke, in dem der primäre Zerfall auftritt, wurde mit einer Gittergröße von $10 \times 10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}$ vernetzt (Bereich 1). Sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenfläche der Glocke wurden Prismenschichten erzeugt. Die Höhe der ersten Prismenschicht nahe der Glocke beträgt $5 \text{ } \mu\text{m}$, was die notwendige Auflösung für die Berechnung der Filmdicke auf der Glockenoberfläche liefert. Die Wachstumsrate der Prismenschichten wurde zu 1,2 gewählt.

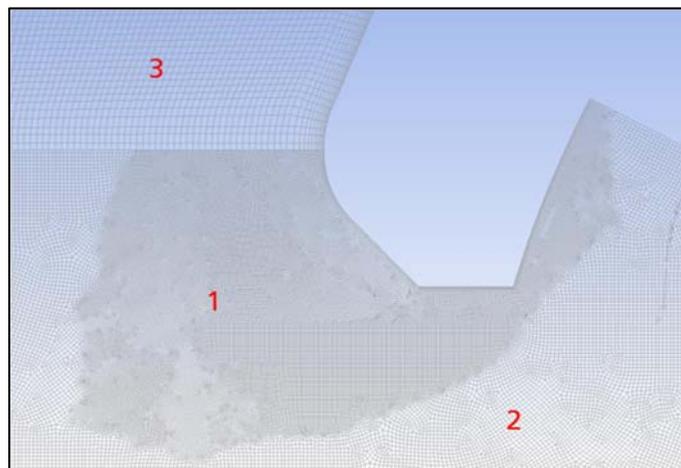


Abb. 4: Rechengitter

Im Bereich der Lenklufteinströmung (Bereich 3) kann von einphasiger Strömung ohne Tropfen ausgegangen werden. Daher wurden in diesem Bereich auch keine VOF-Berechnungen durchgeführt und es konnte ein relativ grobes Gitter mit einer Auflösung von $30 \times 40 \times 40 \mu\text{m}$ verwendet werden, um Rechenaufwand zu sparen. Im Rest der Domäne (Bereich 2) wurde ein mittleres Gitter von $10 \times 20 \times 20 \mu\text{m}$ erzeugt. Die Gesamtzahl der Maschenzellen betrug damit etwa 17 Millionen.

Die numerischen Simulationen wurden mit dem kommerziellen CFD-Code Ansys-FLUENT nach dem Finite-Volume-Ansatz durchgeführt. Der Code wurde verwendet, um die instationären, dreidimensionalen Reynolds-Spannungstransportgleichungen zu lösen. Das VOF-Modell wurde verwendet, um das Zweiphasenfeld und die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche zu berechnen. Für die zeitabhängigen VOF-Berechnungen wurde eine variable Zeitschrittweite verwendet, d. h. die Zeitschrittdauer wurde automatisch angepasst, falls sich die Oberfläche zwischen Gas und Flüssigkeit eine Schnittstelle durch dichte Zellen bewegt oder falls die Geschwindigkeit der Oberfläche hoch ist. Die Zeitschrittdauer wurde in einem Bereich zwischen 0,1 und 1 μs basierend auf der vorkonfigurierten maximalen globalen Courant-Zahl von 2 variiert, was die Rechenstabilität der numerischen Simulationen gewährleistet. Die Simulationen wurden auf einem CRAY Cascade Supercomputer am Hochleistungsrechenzentrum (HLRS) der Universität Stuttgart durchgeführt.

Randbedingungen

Wie oben erwähnt, wurde der Benetzungsprozess der Glocke in den vorliegenden Untersuchungen nicht berechnet. Stattdessen wurden die Eigenschaften des Lackfilms in einer Ebene senkrecht zur inneren Glockenoberfläche als Eingabeparameter angegeben. Dicke und Fließgeschwindigkeit des Lackfilms konnten in den in früheren Arbeiten durchgeführten Benetzungssimulationen ermittelt werden. Beispielsweise ergaben sich für den Fall mit einem Lackvolumenstrom von 135 ml/min und einer Glockendrehzahl von 55.000 1/min als Einlassbedingungen 11 μm für die Dicke des Lackfilmes und 1,77 m/s für die mittlere Geschwindigkeit.

Der in der vorliegenden Untersuchung verwendete Volumenstrom der Lenkluft beträgt 100 NI/min für die innere Lenkluft und 270 NI/min für die äußere Lenkluft. Für diese Bedingungen ergibt sich die in Abbildung 5 dargestellte Geschwindigkeitskontur in der Mittelebene des Sprühstrahles. Es handelt sich um das Resultat einer einphasigen Simulation der Gasphase. Zur besseren Darstellung und einfacheren Interpretation ist in der Grafik die Luftgeschwindigkeit auf 50 m/s begrenzt, obwohl in Düsennähe deutlich höhere Geschwindigkeiten herrschen. Aus dieser Simulation ergibt sich das Geschwindigkeitsprofil der Luft in der oberen Eingangsebene (siehe Abb. 3, Air Inlet).

Abbildung 6 zeigt die drei Geschwindigkeitskomponenten (axial, radial und tangential) der Luft in dieser Eingangsebene. Für das in der vorliegenden Studie verwendete Zylinderkoordinatensystem zeigen positive axiale Geschwindigkeiten in Richtung des Rotationsachsenvektors, positive radiale Geschwindigkeiten zeigen von der Glockendrehachse radial nach außen und die Rechte-Hand Regel wird verwendet, um die positive Richtung der tangentialen Geschwindigkeiten zu definieren.

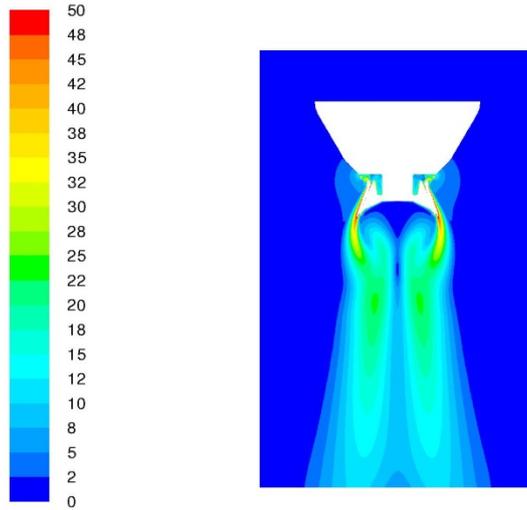


Abb. 5: Geschwindigkeitskontur des Lenkluftstroms(in m/s)

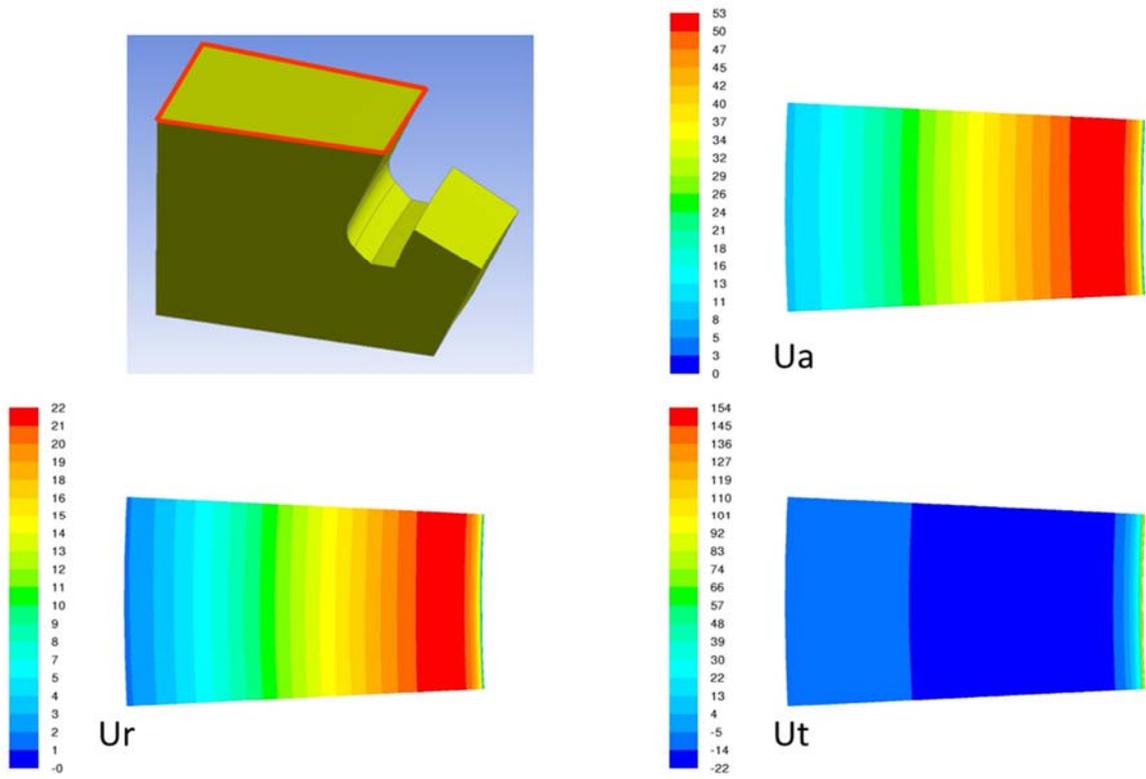


Abb. 6: Axiale (U_a), radiale (U_r) und tangentiale (U_t) Lenkluftgeschwindigkeiten (in m/s)

Zerfallsmechanismen

In Abhängigkeit von Lackmassenströmen und Glockendrehzahlen können in den Simulationen zwei unterschiedliche Zerfallsmechanismen beobachtet werden. Diese beiden Mechanismen sind in Abbildung 7 in der Ansicht von unten dargestellt. Im Allgemeinen verlässt das Lackmaterial die Glocke nicht direkt am unteren Rand. Vielmehr fließt der Lack in Form eines Films weiter über die Unterseite der Glocke und erreicht eine bestimmte Höhe, in der sich dann der Lackfilm von der Glocke löst und in Form von Fäden zerfällt.

Wie für den Fall eines geringen Lackvolumenstromes von 100 ml/min und einer niedrigen Glockendrehzahl von 20.000 1/min (linkes Bild) deutlich zu sehen ist, bilden sich bei diesen Bedingungen aus dem Film zunächst Lackfäden, die dann weiter in Tropfen zerfallen. Die Tropfenbildung selbst kann sowohl am Ende des noch mit dem Film in Verbindung stehenden Fadens stattfinden, aber auch durch den Zerfall einzelner, bereits abgelöster Ligamente.

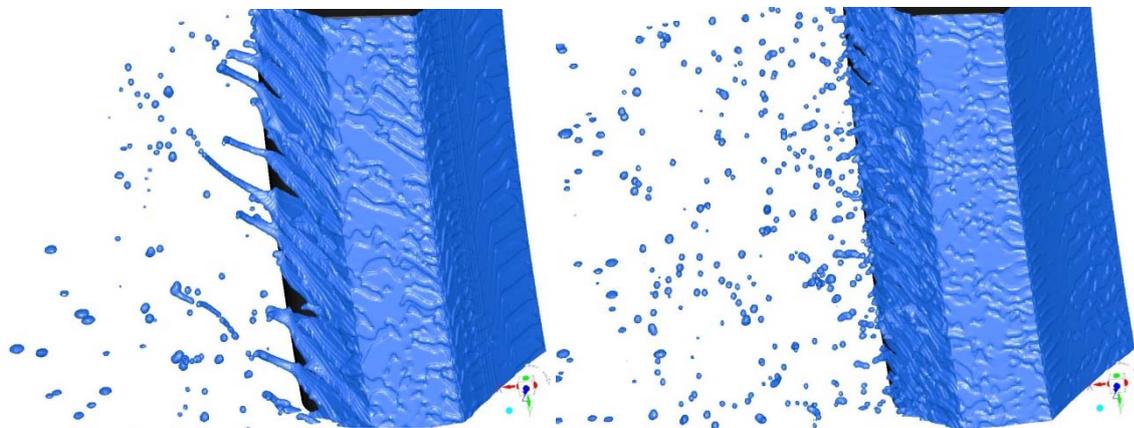


Abb. 7: Lackzerfall am Glockentellerrand mit $V = 100$ ml/min, $n = 20.000$ 1/min (links) und $V = 250$ ml/min, $n = 55.000$ 1/min (rechts)

Auf der rechten Seite der Abb. 7 ist der Zerfall bei einem Lackvolumenstrom von 250 ml/min und einer Glockendrehzahl von 55.000 1/min dargestellt. Unter diesen Bedingungen können keine Lackfäden mehr beobachtet werden. Das Lackmaterial löst sich direkt in Tropfenform von der äußeren Glockenoberfläche.

Unter den gleichen Bedingungen wurde der Lackzerfall experimentell mittels Hochgeschwindigkeitskamera erfasst. Bei niedrigem Lackvolumenstrom und niedriger Drehzahl (linkes Bild) sind die Ausbildung der Lackfäden und deren Zerfall in Tropfen deutlich sichtbar. Ebenso existieren, wie in durch die Simulation vorhergesagt, auch Tropfen in unmittelbarer Nähe zum Glockentellerrand. Bei hohem Lackvolumenstrom und hoher Drehzahl (rechtes Bild) sind keine Fäden mehr erkennbar, auch unter Berücksichtigung der in diesem Fall durch die hohe Drehzahl deutlich reduzierten Aufnahmequalität. Die Simulationsergebnisse werden qualitativ durch die experimentellen Beobachtungen weitestgehend bestätigt.

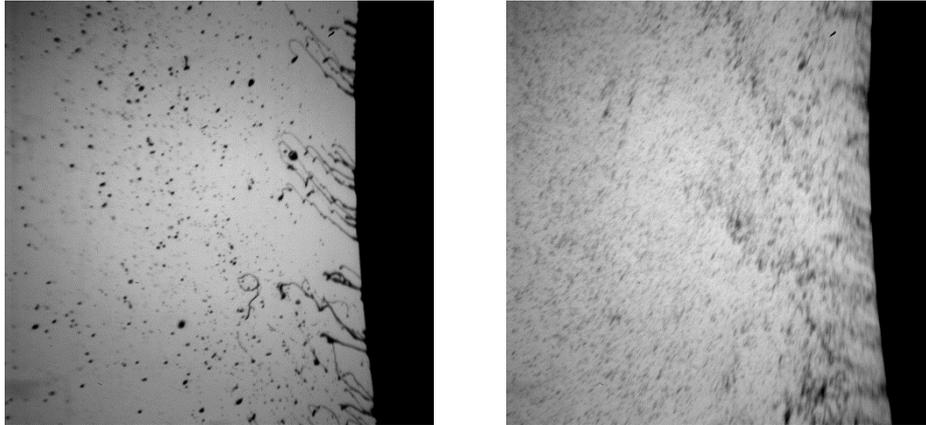


Abb. 8: Lackzerfall am Glockentellerrand, aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera

Tropfenerkennung

Die in den Abb. 7 und 8 vorgestellten Ergebnisse liefern hauptsächlich qualitative Informationen zum Flüssigkeitszerfall und zur Tropfenbildung. Tropfengrößen können nicht direkt aus Fig. 7 abgeleitet werden. Ein in der Abbildung subjektiv großer Tropfen muss nicht zwangsläufig auch ein realer, großer Tropfen sein, da die Rechenzellen in der Domäne unterschiedliche Größen haben, wie bereits oben erwähnt. Für eine genauere, quantitative Analyse und Berechnung der Tropfendurchmesser wurde daher ein zusätzlicher Algorithmus entwickelt und mit Hilfe benutzerdefinierte Funktionen (UDFs) in Ansys-Fluent integriert. In ersten Schritt beinhaltet dieser Algorithmus die Erkennung der realen Tropfen. Hierzu wird überprüft, ob eine Zelle flüssige Phase enthält. Ist dies der Fall, werden alle Nachbarzellen dahingehend überprüft, ob sie auch Flüssigkeitsanteile enthalten. Dieser Prozess wird so lange fortgesetzt, bis keine weiteren „zweiphasigen“ Nachbarzellen mehr gefunden werden können. Die gefundenen Flüssigkeitsanteile erhalten eine gemeinsame „Tropfen-ID-Nummer“. Im Anschluss daran wird aus der Summe der Flüssigkeitsvolumina ein Tropfen mit äquivalentem Volumen berechnet. Auf diese Weise können auch die anderen Eigenschaften des Tropfens wie Geschwindigkeit und Position bestimmt werden.

Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Tropfenerfassung für den Fall eines Lackvolumenstromes von 135 ml/min und einer Glockendrehzahl von 55.000 1/min zu einem festen Zeitpunkt. Unter diesen Bedingungen ist keine Bildung von Lackfäden zu beobachten, vielmehr kommt es zu einer unmittelbaren Tropfenbildung direkt an der Glockentellerkante. Die Farbe der Tropfen charakterisiert deren Größe in einer Skala von 1,5 bis 50 μm . Die im Rechengebiet zu beobachtenden größten Tropfen haben einen Durchmesser von ca. 50 μm und befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Glockentellerkante. Die aus dem gesamten beobachteten Volumen abgeleitete Tropfengrößenverteilung ist in Abbildung 10 dargestellt. Es handelt sich in der Summe um ca. 400 Tropfen. Nahezu 100 Tropfen haben einen Durchmesser von weniger als 1 μm . Abgesehen davon von diesen haben die meisten Tropfen eine Größe zwischen 16 und 32 μm .

Die Korrelation zwischen Tropfengröße und Geschwindigkeit ist in Abbildung 11 dargestellt. Bei der Interpretation sollte jedoch beachtet werden, dass die Geschwindigkeit eines Tropfens nicht nur von

seiner Größe, sondern auch stark von seiner Position abhängt. Befinden sich Tropfen in unmittelbarer Nähe der Glockenoberfläche, kurz nach dem Ablösen vom Lackfilm, dominiert der tangentialer Anteil der Geschwindigkeit, so dass die Geschwindigkeitsgröße größer als 100 m/s sein kann. Die Tangentialgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Abstand zur Glocke ab, da der Luftstrom nachlässt. Bei kleinen Tropfen ändert sich die Tangentialgeschwindigkeit schneller und kann innerhalb weniger hundert Mikrometer auf Null abfallen.

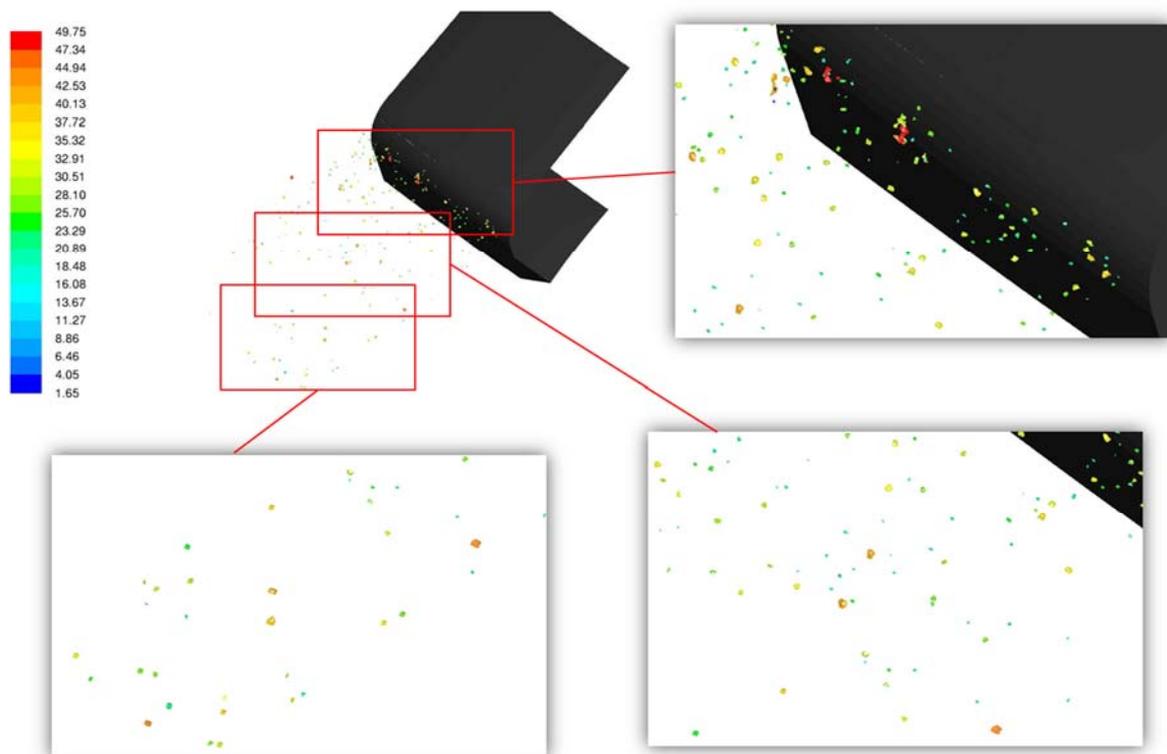


Abb. 9: Kontur der Tropfengröße (in μm)

Zusammenfassung und Fazit

Wie in diesem Beitrag vorgestellt, wurden numerische Simulationen basierend auf der VOF-Methode und dem Reynolds-Spannungsmodell durchgeführt, um den Lackzerfall an der Kante von Hochrotationszerstäubern zu untersuchen. Dabei wurden die Ergebnisse früherer Simulationen zur Berechnung der Benetzung und der Filmbildung auf der Glockentelleroberfläche als Einlassbedingungen verwendet. In Abhängigkeit vom Lackvolumenstrom und der Glockendrehzahl ergeben sich in den Simulationen 2 verschiedene Zerfallsmechanismen, zum einen der Fadenzerriss bei eher niedrigen Drehzahlen, zum anderen die unmittelbar an der Kante stattfindende Tropfenbildung bei höheren Drehzahlen. Diese Ergebnisse werden durch experimentelle Beobachtungen bestätigt.

Zur Bestimmung von Größe, Position und Geschwindigkeit der Tropfen wurde ein spezieller Algorithmus entwickelt und in Ansys-Fluent integriert. Dieser Ansatz wird es erlauben, die nachfolgende

Berechnung der Sprühstrahlformation auf Basis des klassischen Euler-Lagrange Ansatzes durchzuführen. Weitere Aktivitäten werden sich insbesondere damit befassen. Zur Verbesserung der Statistik ist es erforderlich, die erhaltenen und erkannten Tropfen mit einer bestimmten Abtastrate an mehreren Zeitpunkten zu erfassen und die Ergebnisse aufzusummieren. Weiterhin ist es notwendig, die Geschwindigkeit der Tropfen ortabhängig aufzunehmen und auszuwerten, wodurch sich ebenfalls ortsabhängige Größe-Geschwindigkeitskorrelationen ergeben. Diese Resultate lassen sich dann mit entsprechenden orts aufgelösten Messergebnissen, z. B. mit Hilfe der Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) vergleichen.

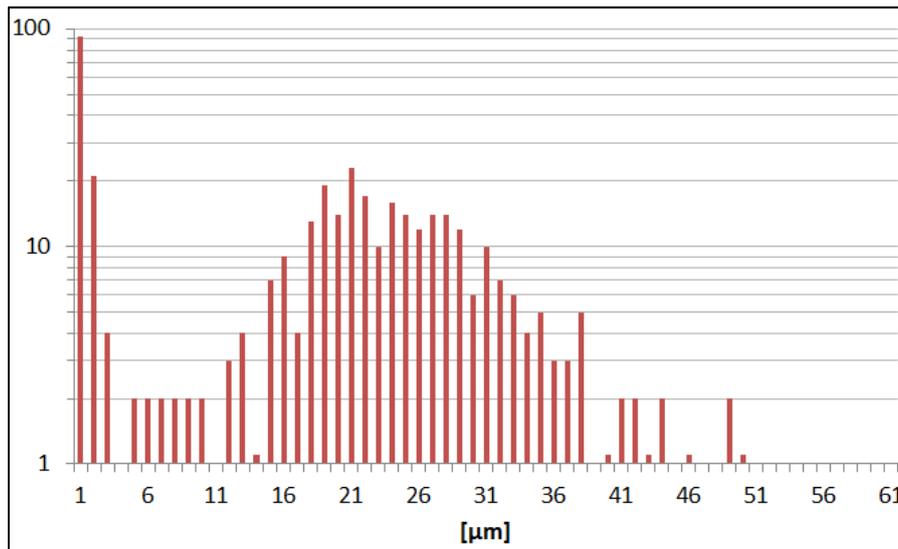


Abb. 10: Tropfengrößenverteilung

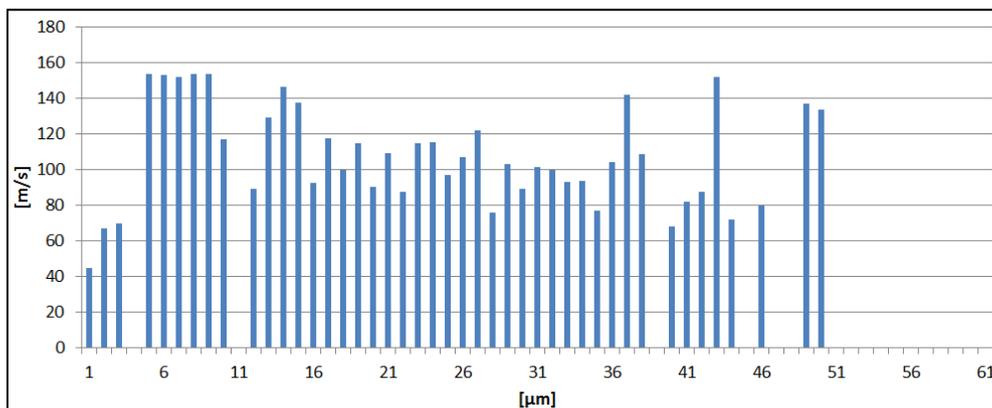


Abb. 11: Korrelation zwischen Tropfengröße und Geschwindigkeit

Danksagung

Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des AiF-IGF Projektes 19097N unterstützt. Weitere Unterstützung erhielten die Arbeiten vom Hochleistungsrechenzentrum (HLRS) der Universität Stuttgart (Bundesprojekt: PbusRobe). Die Autoren bedanken sich bei den Kollegen vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart für die Zurverfügungstellung der experimentellen Ergebnisse

Literatur

- [1] Lefebvre, A. H., Atomization and Sprays (1988)
- [2] Walzel, P., Chemie Ingenieur Technik 62: 983-994 (1990)
- [3] Bayvel, L., Orzechowski, Z., Liquid Atomization (1993)
- [4] Domnick, J., Thieme, M., Atomization and Sprays 16: 857-874 (2006).
- [5] J. Domnick, Z. Yang, Q. Ye, 22. European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, (ILASS), Como, Italy, 8.-10. September 2008
- [6] Shen, B., Ye, Q., Tiedje, O., Domnick, J., 28. European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS), Valencia, Spain, 6.-8. September 2017
- [7] Mehrhardt, E., Ph.D. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin (1978)
- [8] Macosko, C. W., Rheologie: Prinzipien, Messungen und Anwendungen, Wiley-VCH (1994)