

Experimentelle Untersuchung von Wasserbasislacken bei der Hochrotationszerstäubung mittels optischer Messmethoden

Experimental analysis of bell-atomized waterborne paint sprays using optical measurement methods

Lutz Gödeke¹, Maximilian Illner¹, Peter Ehrhard¹,
Walter Oswald², Norbert Willenbacher²

1: TU Dortmund, Bio- und Chemieingenieurwesen, Strömungsmechanik, Emil-Figge-Str. 68, D-44227 Dortmund

2: KIT, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Angewandte Mechanik, Gotthard-Franz-Str. 3, D-76131 Karlsruhe

Zerstäubung, Rotationszerstäuber, Phasen-Doppler-Anemometrie, Dehnviskosität;
Atomization, Rotary bell atomizer, Phase-Doppler- Anemometry, Extensional viscosity;

Zusammenfassung

Hochrotationszerstäuber werden aufgrund ihrer Flexibilität und Leistungsfähigkeit in einer Vielzahl von industriellen Prozessen eingesetzt. Die Hauptanwendungsgebiete sind Sprühtrocknungsverfahren und die Applikation von Hochleistungslacken, wie sie in der Automobilindustrie gefordert werden. Der Prozess muss für variable Lackflussraten, Glockendrehzahlen und für unterschiedliche Lackeigenschaften klar definierte Anforderungen erfüllen. Die Wahl geeigneter Prozessparameter führt hierbei zu den gewünschten Sprühcharakteristiken.

Die aktuelle Arbeit untersucht die wichtigsten Einflussgrößen für die Bildung und den anschließenden Zerfall der auftretenden Filamente und für die resultierende Tropfengrößenverteilung. Die Verwendung der Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermöglichen die genaue Untersuchung des Zerfallsprozesses von der Glockenkante bis zum Substrat. Die analysierten Materialien sind nicht-transparente, nicht-newtonsche Flüssigkeiten, welche sich in ihrem Zerfallsverhalten aufgrund ihrer rheologischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Weiterhin wird ein Modellsystem formuliert, das aus handelsüblichen Acrylatverdickern besteht. Dieses System ermöglicht eine unabhängige Veränderung der Scher- und Dehnströmungseigenschaften. Der komplexe Schubmodul $G^* = G' + iG''$ wird mit Hilfe der Schwingungsrheometrie bestimmt. Der Widerstand gegenüber Dehnung im Filament wird durch das „Capillary Breakup Extensional Rheometer“ (CaBER) bestimmt.

Es wird eine detaillierte Dimensionsanalyse für dieses Problem vorgestellt, die sowohl die Filamentbildung, als auch die Tropfenentstehung in Abhängigkeit der Hauptprozessparameter und der zugrundeliegenden Rheologie darstellt. Die resultierenden dimensionslosen Kennzahlen werden in einem Potenzansatz verwendet. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Korrelation zu finden, welche die lokalen Tropfengrößenverteilungen vorhersagen kann.

Einleitung

Die Verwendung von Hochrotationszerstäubern stellt den aktuellen Stand der Technik für die Applikation von Lacken in der automatisierten Automobilindustrie dar. In den letzten Jahren sind sowohl experimentelle als auch theoretische und numerische Arbeiten zu diesem Themengebiet veröffentlicht worden, welche sich sowohl mit der Tropfenentstehung, als auch mit den angewendeten Messmethoden befassen. Domnick et al. (2005) haben experimentelle Messdaten als Basis für numerische Modelle zur Vorhersage des Sprühprozesses verwendet. Mescher (2012) und Kamplade (2014) haben Experimente zum Fadenzerfall bei Queranströmung und anschließende numerische Untersuchungen zur Optimierung der Gasführung in Bezug auf resultierende Tropfengrößenverteilungen durchgeführt. Kalmbach et al. (2016) haben einen vergleichbaren Ansatz theoretisch untersucht und die asymptotischen Lösungen der linearen Stabilitätsanalyse mit Experimenten validiert. Weiterhin haben Tratnig et al. (2009) verschiedene nicht-transparente nicht-newtonsche Flüssigkeiten mittels PDA untersucht und die Ergebnisse in einem Potenzansatz zusammengefasst. Dalili et al. (2014) haben das Koaleszenzverhalten für newtonsche Flüssigkeiten auf Stahl untersucht. Hierzu wurden Einzeltropfen mit variablen Abständen auf das Substrat aufgebracht und auf Aufriss- und Koaleszenzverhalten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass steigende Reynolds- und Weber-Zahlen die resultierende Filmdicke maßgeblich beeinflussen.

Das Benetzungsverhalten von viskosen Flüssigkeiten bei Auftreffen auf einem Substrat hängt nach Dalili et al. (2014) maßgeblich von ihren Geschwindigkeiten, Tropfengrößen und der anschließenden Koaleszenz ab. Entsprechend ist für ein detailliertes Verständnis des gesamten Prozesses die Bestimmung der relevanten Prozessparameter und der Stoffeigenschaften notwendig.

Die in dieser Arbeit verwendeten Modellsysteme weisen komplexe rheologische Eigenschaften auf. Sie bestehen aus verschiedenen Flüssigkeiten und Feststoffen, die als Suspension vorliegen. Die Modellflüssigkeit wird bei der Hochrotationszerstäubung in der Applikation in das Innere einer Rotationsglocke gefördert und bildet an der Glockenkante Filamente aus, welche anschließend in feine Tropfen mit charakteristischen Größenverteilungen zerfallen. Diese Verteilungen hängen zum einen von den jeweiligen Eigenschaften wie Dichte, Oberflächenspannung, scher- und dehnrheologischem Verhalten und zum anderen von Prozessparametern wie Drehzahl der Rotationsglocke und Volumenstrom an Flüssigkeit ab. Mit Hilfe der sogenannten Lenkluft werden die Flüssigkeitstropfen axial auf das Substrat transportiert. Diese lagern sich auf dem Substrat ab und bilden unter Koaleszenz und Oberflächenbenetzung einen dünnen Film aus.

Der Sprühkegel, dargestellt in Abbildung 1, ist in seiner Form hauptsächlich von der Drehzahl ω , dem Lackvolumenstrom Q , der Lenkluftstrom L , dem Glockenradius R und den Eigenschaften der zerstäubten Flüssigkeit (Dichte ρ , Oberflächenspannung σ , Scherviskosität $\eta_{s,l}$, Dehnviskosität $\eta_{e,l}$) abhängig. Im zeitlichen Mittel ist der Sprühkegel in guter Näherung rotationssymmetrisch.

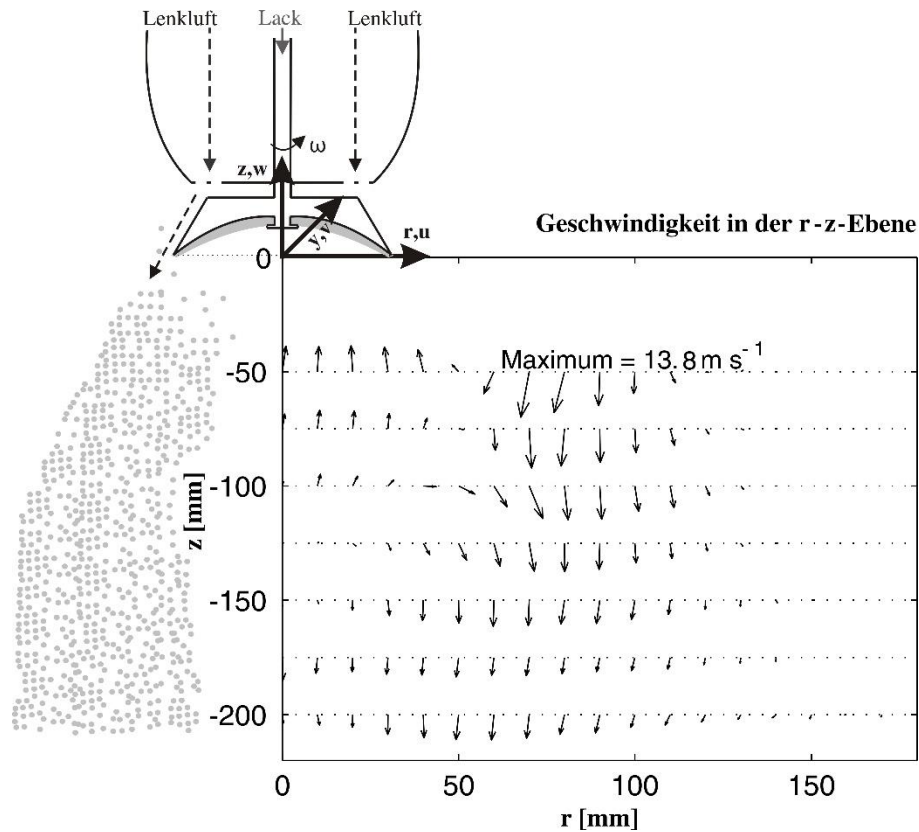


Abb. 1: Skizze des Sprühkegels im Schnitt (links), gemessene Tropfengeschwindigkeitsverläufe in $r - z -$ Ebene (rechts), Lack schwarz-metallic, $C_D = 4.9 \cdot 10^{-5}$, Lenkluft $L = 340$ NI/min, mindestens 12 000 Detektionen pro Messpunkt.

Wichtige Kennzahlen sind die Reynolds-Zahl Re , der Entladungskoeffizient C_D und das Verhältnis aus scheinbarer Dehnviskosität und Scherviskosität bei definierter Dehn- bzw. Scherrate, $\hat{\eta}$:

$$Re = \frac{\omega \cdot R^2 \cdot \rho_l}{\eta_{s,l,\infty}}, \quad C_D = \frac{Q}{\omega R^3}, \quad \hat{\eta} = \frac{\eta_{e,l,app,ref}}{\eta_{s,l,ref}}.$$

Der Durchmesser der entstehenden Tropfen kann gemäß Walzel (2010) in der Form

$$d_T = f(Re, C_D, \dots)$$

angegeben werden.

Der Einfluss der Oberflächenspannung auf den Filamentzerfall geht über die scheinbare Dehnviskosität in die Betrachtung ein, wodurch eine gebildete Weber-Zahl nicht mehr linear unabhängig von der scheinbaren Dehnviskosität ist. Weiterhin wird der Einfluss der umgebenden Luft in der klimatisierten Lackierkabine für alle Versuchsreihen als identisch angenommen. Die Formulierung eines Acrylatverdickersystems ermöglicht die Betrachtung des Prozesses bei variabel einstellbarer Dehn- und Scherviskosität. Dies erfolgt unter Verwendung von Sterocoll® SHT und SXT in verschiedenen Mischungsverhältnissen in wässriger Lösung (BASF 2017). Die Dichten, Oberflächenspannungen und Viskositäten der verwendeten Flüssigkeiten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Stoffdaten der verwendeten Flüssigkeiten, S1 (1.6% SHT+ 0.4% SXT), S2 (1.7% SHT+ 0.3% SXT), LSM - Wasserbasislack schwarz-metallic, LBM - Wasserbasislack braun-metallic.

Material	Dichte	Oberflächen- spannung	Scherviskosität $\eta_{s,l}$ bei $\dot{\gamma} = 2.9 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}$	App. Dehnviskosität $\eta_{e,l,app}$ bei $\dot{\epsilon} = 0.8 \cdot 10^3 \text{s}^{-1}$
	[kg/m ³]	[N/m]	[Pa · s]	[Pa · s]
S1	1013	0.0514	0.110	3.83
S2	1013	0.0508	0.110	2.68
LSM	1040	0.0270	0.016	1.36
LBM	1030	0.0290	0.030	1.67

Experimenteller Aufbau

Die Messung der Tropfengröße erfolgt mit einem Single Burst FiberPDA von DantecDynamics in Vorwärtsstreuung unter Reflektion, die Messung der Geschwindigkeiten mit einem FiberFlow 2D-LDA in Rückwärtsstreuung (vgl. Abb. 2). Der Laserlichtschnitt wird mit einem Lexel 95 Argonlaser aufgespannt. Der Versuchsaufbau befindet sich in einer vollautomatisierten Lackierkabine. Luft mit einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 0,3 m/s durchströmt den Raum kontinuierlich von oben nach unten. Unter den Gittern, auf denen der Versuchsaufbau steht, wird die Luft abgezogen und entstaubt. Die Atmosphäre im Raum ist damit annähernd staubfrei. In der Kabine herrscht eine definierte Temperatur von etwa 25°C und eine relative Luftfeuchte von etwa 65 %. Der Luftdruck liegt einige Millibar über dem Umgebungsdruck.

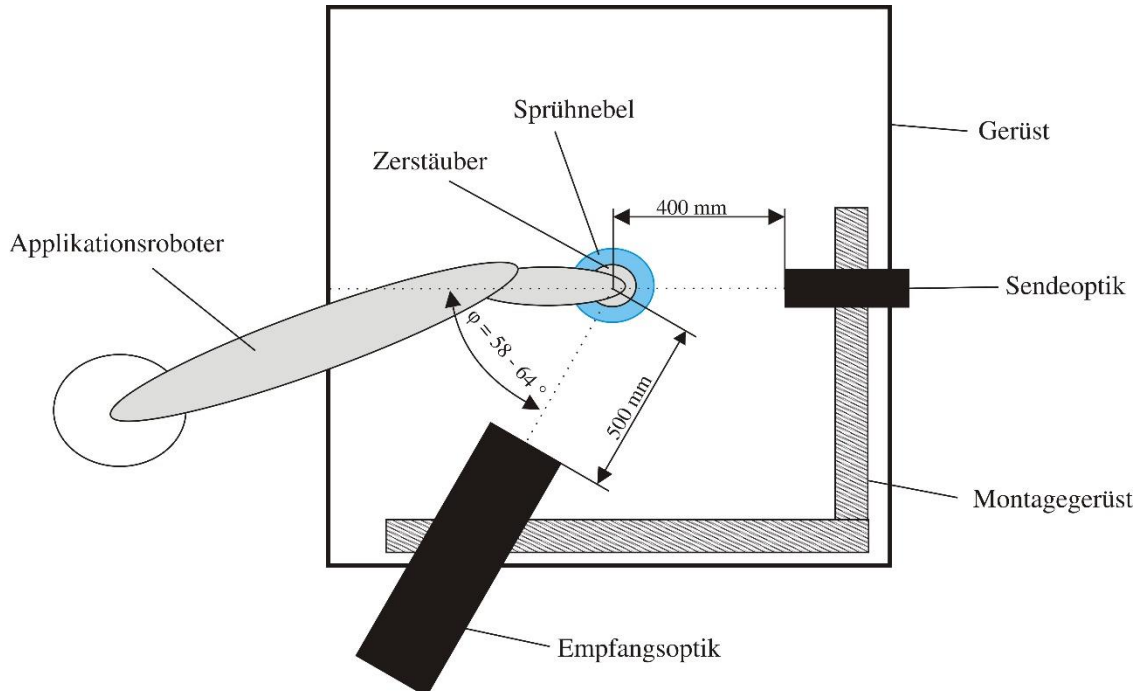


Abb. 2: Messaufbau schematisch, Draufsicht – Sprühkegelvermessung mittels PDA Messgerät in Vorwärtsstreuung für nicht-transparente Wasserbasislacke, Streuwinkel 58 – 64°, Sendeoptik ist gleichzeitig 2D-LDA in Rückwärtsstreuung.

Die Vermessung des Sprühkegels erfolgt auf fein gerasterten Punkten in radialer Richtung. Der Zerstäuber fährt die radiale Nullposition an, beginnt die Zerstäubung und bewegt sich

anschließend mit einer definierten Wartezeit zum nächsten Messpunkt. Der Zeitraum der Zerstäubung wird zeitlich so gewählt, dass Anfahrinstabilitäten nicht auftreten und eine neue Punktmessung gestartet wird. Eine hardwareseitige Kopplung der Systeme ist nicht vorgesehen. Durch Vorversuche kann gezeigt werden, dass der flächen- und anzahlgewichtete globale Durchmesser nach Tratnig et al. (2009) für die verschiedenen Materialien und verschiedene Prozessparameter im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert maximal um 5 % abweicht. In fast allen Fällen liegt der Unterschied bei 1 – 2 % und damit im Bereich des statistischen Fehlers. Die Variation der Prozessparameter erfolgt auf Basis einer statistischen Versuchsplanung im Rahmen der üblichen Bereiche für Drehzahl ($\omega = 30\,000 - 60\,000$ U/min) und Flüssigkeitsvolumenstrom ($Q = 200 - 500$ ml/min). Die verwendete Glocke hat einen Radius von $R = 32.5$ mm und weist eine Rändelung mit einem hydraulischen Durchmesser von $d_h = 310$ μm an der Glockenkante auf. Eine Validierung der mit dem PDA gemessenen Tropfengrößen erfolgt durch Verwendung eines Time-Shift-Messverfahren (SpraySpy™ von AOM Systems). Für nicht-transparente Medien kann hierbei eine gute Übereinstimmung der Tropfengrößenverteilungen erreicht werden.

Rheologische Charakterisierung

Die rheologischen Größen Scherviskosität und Dehnviskosität sind zur vollständigen Beschreibung der Tropfenentstehung notwendig. Die Bestimmung der Scherviskosität im Rotationsrheometer erfolgt scherraten gesteuert mit einer Couette-Strömung. Die Ermittlung der Viskosität bei hohen Scherraten (Scherraten bis $\dot{\gamma} = 2.9 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}$) wird mit einem Kapillarrheometer vorgenommen.

Mittels CaBER-Versuchen wird das Dehnverhalten der Proben charakterisiert. Hierbei wird die Probe zwischen zwei Platten gefüllt und anschließend die obere Platte bis zu einer definierten Höhe bewegt. Die Fadenverjüngung des Fadens $d_{zy1}(t)$, welche sich durch seine Oberflächenspannung und viskosen bzw. visko-elastischen Kräfte ergibt, wird durch Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera bestimmt.

Nach Stelter et al. (2000) lässt sich aus dem Verlauf der relativen Verengung $d_{zy1}(t)/d_{zy1}(t=0)$ eine scheinbare Dehnviskosität der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Dehnrates $\dot{\epsilon}$ bestimmen (Abb. 3).

Nach Sachsenheimer (2014) lässt sich die scheinbare Dehnviskosität (Abb. 4) vereinfacht aus den zeitlichen Verläufen der Durchmesser der Flüssigkeitsfäden im CaBER-Versuch wie folgt berechnen:

$$\eta_{e,l,app} = -\sigma_{lg} \frac{\Delta t}{\Delta d_{zy1}}$$

Durch die Verwendung von Sterocoll® als Modellfluid kann die Frage beantwortet werden, ob die in der Dimensionsanalyse einfließenden Stoffparameter Scher- und Dehnviskosität für die Charakterisierung des Zerstäubungsvorganges ausreichend sind. Gleichzeitig kann bei gleichbleibender Scherviskosität allein der Einfluss der Dehnviskosität auf die Zerstäubung untersucht werden. Hierbei ist anzumerken, dass die verwendeten Sterocoll-Mischungen transparent sind. Dies wurde bei der PDA-Messung für die Tropfengrößenbestimmung unter Reflektion und Brechung 1. Ordnung berücksichtigt.

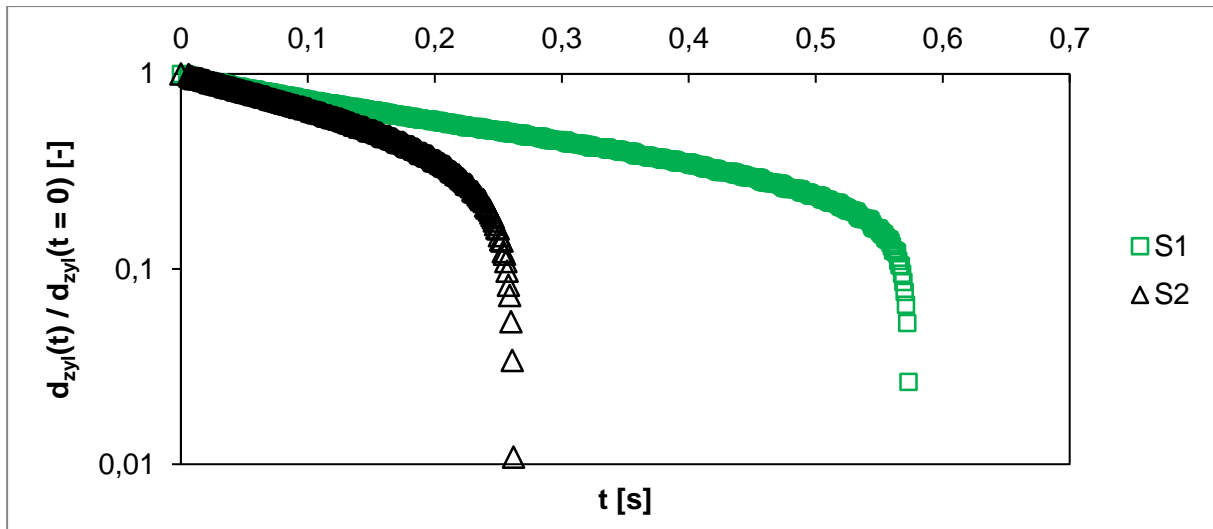


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der relativen Flüssigkeitszylinderverengung $d_{zyl}(t) / d_{zyl}(t = 0)$ im CaBER-Versuch für S1 und S2.

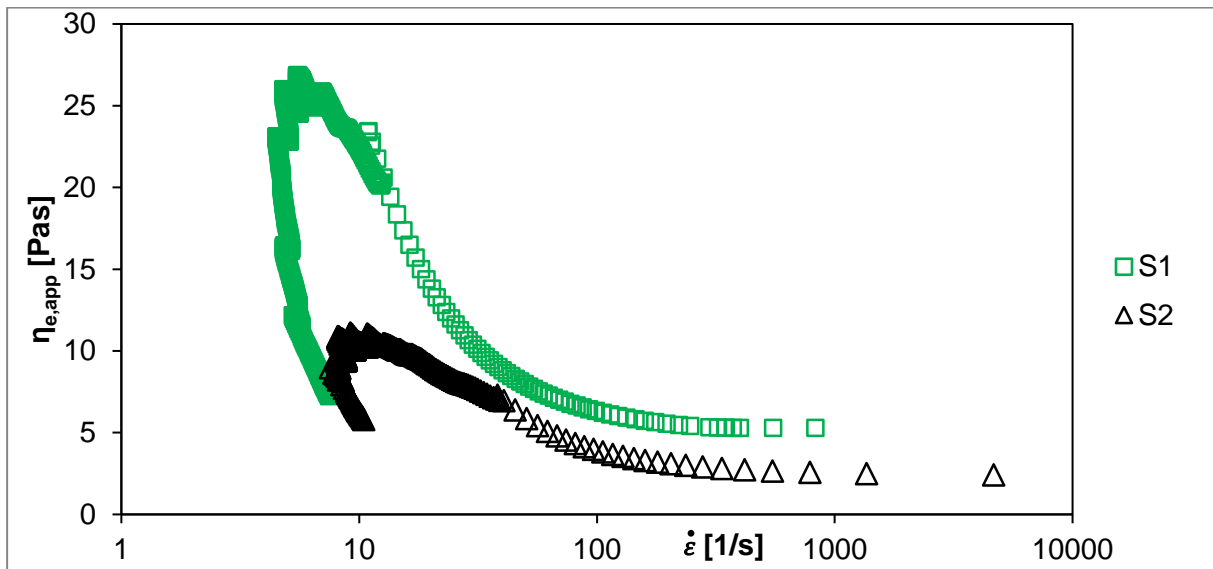


Abb. 4: Scheinbare Dehnviskositäten $\eta_{e,app}$ der Materialien S1 und S2 als Funktion der Dehnrates.

Ergebnisse und Modell

Die Exponenten der einzelnen Kennzahlen in der Gesamtkorrelation werden aus den Einzeldarstellungen der Tropfengröße über der jeweiligen Kennzahl ermittelt. Der Exponent ergibt sich hierbei aus der Steigung der Geraden bei logarithmischer Auftragung.

Die Einzelkorrelationen können in einen Produktansatz überführt werden, wodurch alle untersuchten Einflüsse auf die Tropfenbildung berücksichtigt werden. Es ergibt sich eine Gleichung für den globalen arithmetisch gemittelten Tropfendurchmesser, entdimensioniert mit dem hydraulischen Durchmesser der Rändelung:

$$\frac{d_{10,global}}{d_h} = 3.82 \cdot 10^2 \cdot Re^{-0.40} \cdot C_D^{0.21} \cdot \hat{\eta}^{-0.54} + 0.028$$

Für die mittleren Tropfengrößen $d_{10,global}$ der Materialien LSM, LBM, S1 und S2 kann somit eine Korrelation in Abhängigkeit der Prozess- und Stoffparameter bestimmt werden. Diese ist in der Lage die Tropfengrößen $d_{10,global}$ der untersuchten Materialien mit einer relativen Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten von 20 % ($R^2 = 0.93$) oder besser vorherzusagen.

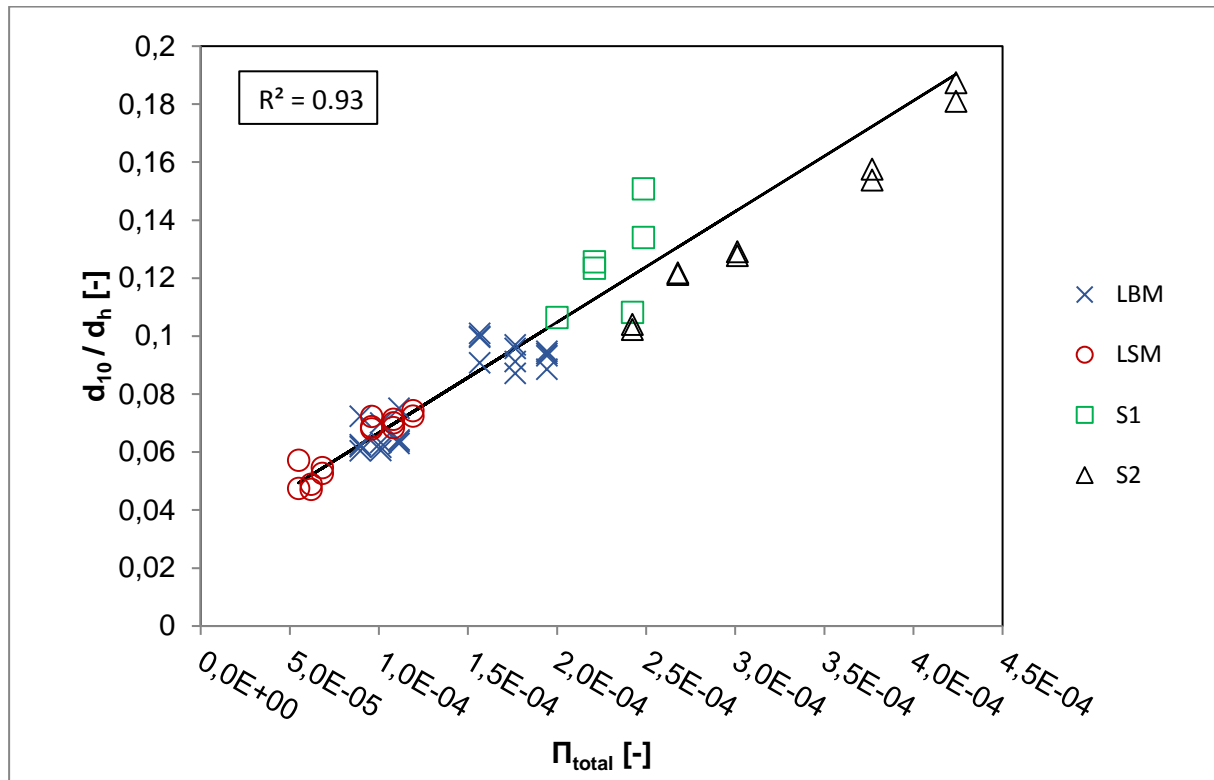


Abb. 5: globaler arithmetischer Tropfendurchmesser entdimensioniert mit dem hydraulischen Durchmesser der Rändelung als Funktion von $\Pi_{total,dh}$. Sterocoll S1 und S2, LSM Lackmaterial schwarz-metallic, LBM Lackmaterial braun-metallic, Drehzahl ($\omega = 30.000 - 60.000$ U/min), Flüssigkeitsvolumenstrom ($Q = 200 - 500$ ml/min).

Mit steigender Reynolds-Zahl ist eine Abnahme der globalen arithmetischen Tropfendurchmesser zu beobachten. Die gleiche Tendenz ist für das Verhältnis der Viskositäten $\hat{\eta}$ zu erkennen. Im vorliegenden Fall kann eine leichte Abhängigkeit der Tropfengrößenverteilung vom vorliegenden Flüssigkeitsvolumenstrom bestätigt werden, die resultierenden Tropfendurchmesser werden mit steigendem Q größer. Eine Erhöhung der Dehnviskosität führt bei LSM/LBM zu einer Zunahme der mittleren Durchmesser, bei S1 und S2 ist ein umgekehrtes Verhalten zu erkennen. Eine Überlagerung weiterer Effekte während des Zerfallsprozesses ist naheliegend. Diese Ergebnisse sind mit den verwendeten Materialien reproduzierbar.

Dankesworte

Besonderer Dank gilt allen bisher beteiligten Abschlussarbeitern und selbstverständlich den Mitarbeitern der Abteilung Application Process Technology Europe der BASF Coatings GmbH in Münster für die Realisierung des gesamten Projektes.

Literatur

BASF SE, 2017, *Sterocoll*, zuletzt geprüft 25.05.2017, https://worldaccount.basf.com/wa/EU~de_DE/Catalog/Paper/pi/BASF/Brand/sterocoll.

Dalili, A., Chandra, S., Mostaghimi, J., Fan, H. C., & Simmer, J. C. (2014). Formation of liquid sheets by deposition of droplets on a surface. *Journal of colloid and interface science*, 418, 292-299.

Domnick, J., Scheibe, A., & Ye, Q. (2005). The Simulation of the Electrostatic Spray Painting Process with High-Speed Rotary Bell Atomizers. Part I: Direct Charging. *Particle & Particle Systems Characterization*, 22(2), 141-150.

Kalmbach, T., Gramlich, S., & Piesche, M. (2016). Movement and Hydrodynamic Instabilities of Particle-Laden Liquid Jets in the Centrifugal Field Influenced by a Gas Flow. In *Process-Spray* (pp. 171-204). Springer International Publishing.

Kamplade, J., Mack, T., Küsters, A., & Walzel, P. (2014). Break-Up of Threads From Laminar Open Channel Flow Influenced by Cross-Wind Gas Flow. In *ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels* (pp. V002T20A001-V002T20A001). American Society of Mechanical Engineers.

Mescher, A. (2012). *Einfluss der Gasführung in Sprühtrocknern auf den Fadenzerfall an Rotationszerstäubern: Analyse und Optimierung* (Doctoral dissertation, Dissertation, Dortmund, Technische Universität, 2012).

Stelter, M., Brenn, G., Yarin, A. L., Singh, R. P., & Durst, F. (2000). Validation and application of a novel elongational device for polymer solutions. *Journal of Rheology*, 44(3), 595-616.

Sachsenheimer, D. (2014). *Capillary thinning of viscoelastic fluid filaments* (Doctoral dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014).

Tratnig, A., Brenn, G., Strixner, T., Fankhauser, P., Laubacher, N., & Stranzinger, M. (2009). Characterization of spray formation from emulsions by pressure-swirl atomizers for spray drying. *Journal of food engineering*, 95(1), 126-134.

Walzel, P. (2010). Spraying and atomizing of liquids. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*.