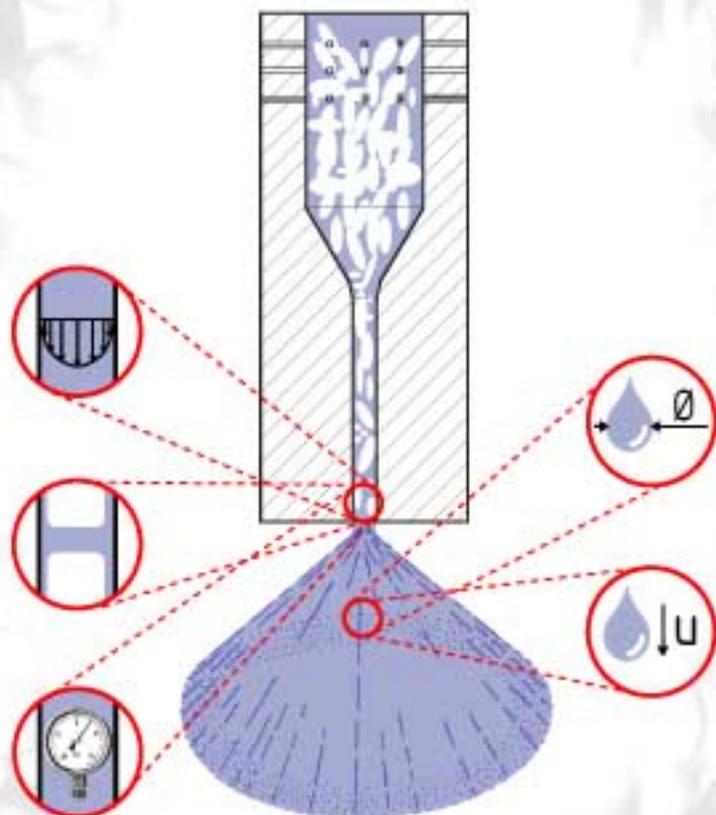


# Zweistoffzerstäuben von Suspensionen



# **Zweistoffzerstäuben von Suspensionen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Florian Schmidt  
geboren am 24. Dezember 1976, in Hannover

2007

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-355-8

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Dieter Mewes

Korreferentin: Prof. Dr.-Ing. Andrea Luke

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Lothar Schulze

Tag der Promotion: 16. April 2007

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2007

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-355-8

## VORWORT

Diese Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrenstechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

An erster Stelle spreche ich Herrn Dr.-Ing. Dr.h.c. Dieter Mewes als Leiter des Instituts meinen herzlichsten Dank aus. Mir wurde bereits als Student unter seiner Führung eine sehr fundierte Grundlagenausbildung ermöglicht. Während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter leitete er mich dann zur präzisen Analyse von Sachverhalten und zum eigenständigen wissenschaftlichen Arbeiten an.

Ebenso bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Luke für das Interesse an meiner Arbeit und die Anregungen sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Schulze für seine Tätigkeit als Vorsitzender der Prüfungskommission.

Ein großer Dank gebührt allen Mitarbeiter des Instituts, für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Insbesondere Martin Behling, Kerstin Kling, Marc Lörcher, Bastian Mahr, Alexander Scharf, Letizia Volpe und Diek Wiemann standen mir in fachlichen, organisatorischen und menschlichen Dingen stets zur Seite.

Für die Umsetzung meiner Ideen und Vorstellungen ist der Werkstatt unter der Leitung von Herrn Bernhard Schickedanz und André Papke sowie den Studierenden Svenja Bienert, Boyka Dobranova, Jarosław Frydel, Sascha Greinke, Siniša Kontin, Christoph Lietmeyer, Tuan Nguyen Quang, Ramona Rejnowski und Matthias Weng herzlich zu danken.

Meinen Eltern Gabriele und Günter Schmidt danke ich für die Unterstützung, vor allem während der Zeit meines Studiums. Sie haben mir in meinem Leben jede Möglichkeit gegeben und mir dabei alle Freiheiten gelassen. Meiner

Freundin Astrid Lipski gilt mein großer Dank für den Rückhalt im Alltag, das Verständnis und die Beratung während meiner Promotionszeit.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Förderung des Forschungsvorhabens.

Allen hier genannten Personen sei versichert, dass es ohne sie nicht zu dieser Arbeit gekommen wäre.

Vielen Dank!

Hannover, im April 2007

Florian Schmidt

---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Formelzeichen</b>	<b>IV</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>X</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Problemstellung und Ziele der Arbeit</b>	<b>3</b>
<b>3. Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
3.1 Eigenschaften strömender Suspensionen .....	5
3.2 Zerstäuben von Suspensionen .....	7
3.3 Kritisches Ausströmen von mehrphasigen Gemischen .....	11
<b>4. Experimenteller Aufbau und Messtechnik</b>	<b>15</b>
4.1 Bereitstellen der Fluide am Zerstäubermessstand.....	15
4.1.1 Charakterisieren dreiphasiger Strömungen .....	17
4.1.2 Bereitstellen des Gases .....	19
4.1.3 Bereitstellen der Flüssigkeit.....	20
4.1.4 Bereitstellen der Suspension .....	20
4.2 Aufbau und Abmaße des Zerstäubers .....	24
4.3 Druckmessung im Austrittsquerschnitt .....	26
4.4 Laserbasierte Kreuzkorrelation .....	28
4.4.1 Theorie der Kreuzkorrelation.....	28
4.4.2 Kreuzkorrelationssensor im Zerstäuber.....	32

4.5	Laser-Beugungs-Spektrometrie.....	34
4.5.1	Fraunhofersche Beugung.....	35
4.5.2	Auswertung und Darstellung klassierter Messwerte.....	39
4.5.3	Laser-Beugungs-Spektrometrie im Spray.....	40
4.6	Tomographische Laser-Beugungs-Spektrometrie.....	43
4.6.1	Tomographie.....	44
4.6.2	Konzentrationsmessung mit Hilfe der Extinktion.....	46
4.6.3	Lokal aufgelöstes Messen.....	47
4.7	Laser-Doppler-Anemometrie.....	49
4.7.1	Laser-Doppler-Theorie.....	49
4.7.2	Geschwindigkeitsmessungen im Spray.....	54
<b>5.</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>57</b>
5.1	Kritische Massenströme.....	58
5.2	Leistungseintrag in den Zerstäuber.....	60
5.3	Drücke im Austrittsquerschnitt.....	64
5.4	Geschwindigkeiten im Austrittsquerschnitt.....	66
5.5	Strömungsformen im Austrittsquerschnitt.....	71
5.6	Tropfengrößen im Spray.....	77
5.7	Tropfengeschwindigkeiten im Spray.....	83
<b>6.</b>	<b>Diskussion und Modellbildung</b>	<b>93</b>
6.1	Wirkungsgrad des Zerstäubens.....	93
6.2	Deutung des kritischen Massenstroms.....	95
6.2.1	Modell von Böckh.....	96
6.2.2	Vergleich des Modells mit den experimentellen Ergebnissen..	99
6.3	Modellbildung für die Tropfengröße.....	101
6.4	Geschwindigkeit der Tropfen.....	104

---

6.4.1	Bezogene Tropfengeschwindigkeit.....	104
6.4.2	Modell von Panchagnula und Sojka.....	106
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>

## FORMELZEICHEN

### Lateinische Symbole

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$a$	-	Mie-Parameter
$a_L$	m	Abstand der Teilstrahlen des Laser-Doppler-Anemometers
$b$	m	Länge
$b_L$	m	Brennweite der Linse des Laser-Doppler-Anemometers
$c$	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$c_1 \dots c_5$	-	empirisch angepasste Faktoren
$c_v$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	Volumenkonzentration
$d$	m	Durchmesser
$E$	-	Extinktion
$e$	-	Anzahl der Elemente im Signal X
$\vec{e}$	-	Einheitsvektor
$\Delta e$	-	Abstand zum Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion
$f$	Hz	Frequenz
$g$	-	Gausfunktion
$h$	-	relative Häufigkeit
$I$	$\text{W}/\text{m}^2$	Intensität
$i$	-	Klassennummer
$J_1$	-	Besselfunktion 1. Ordnung
$K_i$	-	partikelgrößenabhängiger Extinktionskoeffizient
$k$	-	Anzahl der Klassen
$L$	m	Länge
$m$	-	Startindex für die Summenbildung der Produkte der Signale X und Y

---

$M$	kg	Masse
$\dot{M}$	kg/s	Massenstrom
$n$	-	Index der Signalposition
$n_0$	-	Anzahl der Messereignisse
$n_1$	m	Länge der Messereignisse
$n_2$	m <sup>2</sup>	Fläche der Messereignisse
$n_3$	m <sup>3</sup>	Volumen der Messereignisse
$o$	-	Anzahl der Elemente im Signal Y
$P$	W	Leistung
$p$	Pa	Druck
$Q$	-	Verteilungssumme
$R$	m	Abstand zum Brennpunkt der Linse, Radius der Rundung des Austrittsquerschnitts
$R_0$	m	Radius des ersten Intensitätsminimums des relativen Intensitätsprofils eines Beugungsbildes
$r$	m	Radius
$q_0$	1/m	Verteilungsdichte (Tropfengeschwindigkeit)
$q_3$	1/m	Verteilungsdichte (Tropfengröße)
$s$	-	Schlupf
$T$	°C, K	Temperatur
$T$	-	Transmission
$t$	s	Zeit
$U$	V	Spannung
$u$	m/s	Geschwindigkeit
$u^*$	-	bezogene Geschwindigkeit
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$X$	N.N.	Signal des Kreuzkorrelationssensors
$x$	-	Massenanteil

$x$	m	Axiale Koordinate im Zerstäuber
$\dot{x}$	-	Massenstromanteil
$Y$	N.N.	Signal des Kreuzkorrelationssensors
$y$	m	Koordinatenrichtung
$z$	m	Koordinatenrichtung

**Griechische Symbole**

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$\alpha$	-	Volumenanteil
$\dot{\alpha}$	-	Volumenstromanteil
$\beta$	N.N.	Parameter nach Panchagnula und Sojka [53]
$\chi$	-	Koordinate im Koordinatensystem der Projektion
$\delta$	-	relative Intensität des Beugungsbildes
$\Phi_M$	N.N.	Projektion einer Feldgröße
$\Gamma_{xy}$	N.N.	Kreuzkorrelationsfunktion der Signale X und Y
$\gamma$	N.N.	Parameter nach Panchagnula und Sojka [53]
$\eta$	Pa·s	Viskosität
$\eta_{spray}$	-	Wirkungsgrad des Zerstäubens
$\vartheta$	°	Strahlkreuzungswinkel des Laser-Doppler-Anemometers
$\kappa$	-	Isentropenexponent $\kappa=1$ <i>isotherm</i> , $\kappa=1,4$ <i>isentrop</i>
$\varphi_n$	N.N.	Summe der Produkte aller Signale X und Y für eine Verschiebung $n$
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\mu$	-	Argument der Besselfunktion
$\Theta$	°	Projektionswinkel
$\theta$	°	Beugungswinkel
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	N/m	Oberflächenspannung
$\tau$	s	zeitliche Verschiebung
$\zeta$	-	Widerstandsbeiwert
$\Omega$	-	gesamte Anzahl der Elemente der Kreuzkorrelationsfunktion
$\omega$	N.N.	Standardabweichung
$\xi$	N.N.	klassierter Messwert
$\Delta\xi$	N.N.	Breite der Klasse

**Indices**

Symbol	Bedeutung
$0$	Ruhezustand vor dem Zerstäuber
$1$	Teilstrahl 1 des Lasers des Laser-Doppler-Anemometers
$2$	Teilstrahl 2 des Lasers des Laser-Doppler-Anemometers
$2$	Austrittsquerschnitt des Zerstäubers
$32$	Sauterdurchmesser (engl. SMD)
$\infty$	Umgebung
$ab$	Abtastung
$aus$	Austritt
$b$	Betrieb
$D$	Dopplerfrequenz
$E$	Richtung der optischen Achse des Laser-Doppler-Anemometers
$ein$	Eintritt
$exit$	Austritt
$g$	Gas
$ges$	gesamt
$h$	Halbwert
$i$	Index der betrachteten Klasse
$j$	Index der Verteilung basierend auf: Anzahl $j=0$ , Länge $j=1$ , Fläche $j=2$ , Volumen $j=3$
$k$	kalibriert
$krit$	kritisch
$L$	Linse
$l$	Flüssigkeit
$l+p$	Suspension (partikelbeladene Flüssigkeit)
$M$	zeitliches Mittel
$m$	massebezogen
$max$	maximal

---

$n$	Index der Messstellen des Kreuzkorrelationssensors im Zerstäuber
$norm$	normiert
$p$	Partikel
$r$	Rot
$shift$	Shift
$soll$	Soll-Wert
$spray$	Spray
$v$	volumetrisch
$XX$	Signal $X$ korreliert mit Signal $X$
$XY$	Signal $X$ korreliert mit Signal $Y$
$YY$	Signal $Y$ korreliert mit Signal $Y$
$z$	Zerstäuber
$\sigma$	Oberflächenenergie

### **Kennzahlen**

$$Re \equiv \frac{d u \rho}{\eta} \quad \text{Reynolds-Zahl}$$

$$We \equiv \frac{\rho u^2 d}{\sigma} \quad \text{Weber-Zahl}$$

$$Oh \equiv \frac{\eta}{\sqrt{d \rho \sigma}} \quad \text{Ohnesorge-Zahl}$$

# KURZFASSUNG

Schmidt, Florian

## Zweistoffzerstäuben von Suspensionen

Für das Zerstäuben von Suspensionen werden in der Praxis häufig innenmischende Zweistoffzerstäuber eingesetzt. Sie zeichnen sich durch geringe Betriebsdrücke, ein gutes Teillastverhalten und ein vermindertes Verstopfungsrisiko aus. Das mehrphasige Gemisch aus Flüssigkeit, Gas und partikelförmigem Feststoff zerfällt nach dem Austritt aus der Düse zu einem Spray. Die erzeugte große spezifische Phasengrenzfläche wird für den Wärme- und Stoffübergang genutzt.

In dieser Arbeit wird der Zusammenhang zwischen der Strömung im Zerstäuber und den Eigenschaften der erzeugten Tropfen im Spray experimentell untersucht. Hierzu werden für das Stoffsystem aus Wasser, Luft und Glaskugeln der kritische Massenstrom, die Strömungsgeschwindigkeit, die Strömungsform und der Druck im Austrittsquerschnitt in Abhängigkeit der volumetrischen Zusammensetzung der Strömung gemessen. Die Tropfengröße und die Tropfengeschwindigkeit werden orts aufgelöst gemessen und mit den Betriebsbedingungen des Zerstäubers in einen physikalischen Zusammenhang gesetzt. Analytische und halb-empirische Modellgleichungen werden zur Vorhersage von Geschwindigkeiten in der Düse und im Spray sowie der Tropfengröße verwendet.

### Stichworte:

Zerstäuben, Zerstäuber, Düse, innenmischend, mehrphasige Strömungen, Suspensionen, kritisches Ausströmen, Schallgeschwindigkeit, kritischer Massenstrom, Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit, Kreuzkorrelation, Laser-Beugungs-Spektrometer, Laser-Doppler-Anemometer

# **ABSTRACT**

Schmidt, Florian

## **Twin-Fluid Atomization of Suspensions**

Atomizing suspensions or slurries is technically accomplished using internal mixing twin-fluid atomizers. The advantages of their application are low atomization pressures, good partial load conditions and a small risk of blocking the nozzle. The critical flow consisting of a mixture of liquid gas and solids exits the atomizer and disintegrates into small droplets forming the spray. The high amount of generated specific surface is used for the heat- and mass transfer.

In this work, the dependencies of the spray characteristics on the critical flow inside the atomizer are experimentally investigated. For the system of water, air and glass spheres the mass flow, the exit velocity, the pressure and the flow-pattern in the exit cross-section of the atomizer are measured. The volumetric composition of the flow is varied. The dependencies of the locally measured drop sizes and velocities on the flow conditions inside the atomizer are investigated. Analytical and semi-empirical models are introduced to predict the flow velocities inside the atomizer as well as the drop velocities and the drop sizes in the spray.

### **Keywords:**

atomization, atomizer, nozzle, twin-fluid, multiphase-flow, suspension, slurry, critical flow, sonic speed, critical mass flow, drop size, drop velocity, cross correlation, laser-diffraction-spectroscope, laser-doppler-anemometry



## 1. EINLEITUNG

Als Zerstäuben wird das Zerteilen einer flüssigen Phase in ein Tropfenkollektiv bezeichnet. Dabei wird die kontinuierliche flüssige Phase durch das Zerstäuben zur dispersen Phase. Für diesen Prozess ist Energie erforderlich, die dem System zugeführt werden muss.

Flüssigkeiten werden zerstäubt, um eine große spezifische Phasengrenzfläche zu erzeugen. Die sich anschließenden Prozesse laufen hierdurch bei großen Wärme- und Stoffströmen ab. Durch Zerstäuben können außerdem geringe Flüssigkeitsmengen auf große Flächen oder in großen Volumina verteilt werden. Anwendung findet das Zerstäuben zum Beispiel in Verbrennungsprozessen, der Trocknungstechnik, der Klimatechnik und in der Beschichtungstechnik. Die jeweiligen Anwendungen stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an das erzeugte Spray in Bezug auf die Tropfengröße, die Tropfengeschwindigkeit und den transportierten Massenstrom. Es werden sowohl reine Flüssigkeiten als auch Suspensionen zerstäubt.

Für einige Anwendungen werden Zerstäuber eingesetzt, die neben der Druckenergie der flüssigen Phase die Energie einer Gasphase für das Zerstäuben nutzen. Dazu trifft das Gas entweder außerhalb des Zerstäubers mit hoher Relativgeschwindigkeit auf die Flüssigkeit oder wird bereits im Zerstäuber in der Flüssigkeit dispergiert. Im letzten Fall entsteht im Zerstäuber eine mehrphasige Strömung aus Flüssigkeit und Gas. Derartige Zerstäuber werden als innenmischende Zweistoffzerstäuber bezeichnet. Sie zeichnen sich durch geringe Tropfengrößen, kleine Betriebsdrücke, ein gutes Teillastverhalten und ein geringes Verstopfungsrisiko aus. Als Nachteile des innenmischenden Zweistoffzerstäubers sind die Neigung zum instationären Betrieb, die erschwerte

Einstellbarkeit von Betriebszuständen sowie der geringere Kenntnisstand über die physikalischen Prinzipien dieses Zerstäubertyps zu nennen.

## 2. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DER ARBEIT

Für das Zerstäuben von hochviskosen oder stark partikelbeladenen Flüssigkeiten wird der Einsatz von Zweistoffzerstäubern empfohlen [23,57]. Der hohe Energieeintrag durch das Einbringen der Volumenänderungsarbeit mit Hilfe der komprimierten Gasphase ist hierfür vorteilhaft. Daher werden in technischen Anwendungen wie dem Zerstäuben von Kohlesuspensionen zur Verbrennung [23], dem Zerstäuben von Suspensionen für eine anschließende Sprühtrocknung [25] und dem Zerstäuben von Kalkmilch [71] für die Rauchgasentschwefelung häufig Zweistoffzerstäuber mit innerer Mischung eingesetzt. Das Dimensionieren der Zerstäuber erfolgt jedoch oft auf empirischem Wege [6]. Innenmischende Zerstäuber sind bisher weniger detailliert untersucht als Einstoffdruckzerstäuber [57]. Der Einfluss der mehrphasigen Strömung sowie der Partikeln in der Suspension auf das Zerstäuben erschweren die Modellbildung.

Innenmischende Zweistoffzerstäuber werden häufig derart betrieben, dass sich der kritische, also maximal mögliche Massenstrom im Zerstäuber einstellt [17]. Ist dies der Fall und wird der Druck am Eintritt des Zerstäubers weiter erhöht, entsteht am Austritt des Zerstäubers ein Ducksprung zwischen dem Austrittsquerschnitt und der Umgebung. Die Gasphase expandiert in diesem Drucksprung schnell und unterstützt den Strahlzerfall. Das Vorhersagen von kritischen Massenströmen ist für das Dimensionieren von innenmischenden Zweistoffzerstäubern von großer Bedeutung. Der Einfluss von Partikeln auf den kritischen Massenstrom ist dabei weitgehend unbekannt.

In der vorliegenden Arbeit werden daher innenmischende Zweistoffzerstäuber experimentell untersucht. Für ein Modellsystem aus Wasser, Luft und Glaskugeln werden Messungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Strömung durchgeführt. Die gewonnenen experimentellen Ergebnisse werden ausgewertet

und für eine physikalisch begründete Modellbildung verwendet. Hierdurch wird eine Vorhersage der Zerstäubungseigenschaften von innenmischenden Zweistoffzerstäubern für das Zerstäuben von Suspensionen möglich.

Gemessen werden die Phasenanteile sowie die integralen Strömungsgrößen am Eintritt in den Zerstäuber. Im Austrittsquerschnitt der Düsen wird ein Lasersensor integriert, der sowohl das Messen der Strömungsformen als auch der Strömungsgeschwindigkeiten erlaubt. Diese Messungen basieren auf der Lichtschwächung an Phasengrenzen sowie auf der Kreuzkorrelation. Die Druckmessung im Austrittsquerschnitt wird mit Hilfe einer Messbohrung und eines Drucksensors durchgeführt. Für Strahlzerfallsmodelle sind Strömungsform, Geschwindigkeit und Druck im Austrittsquerschnitt wichtige Eingangsgrößen.

Mit Hilfe von Lasermessmethoden wird auch der Einfluss unterschiedlicher Zusammensetzungen der Strömung im Zerstäuber auf das Spray untersucht. Die tomographische Auswertung der Messergebnisse des Laser-Beugungs-Spektrometers liefert orts aufgelöste Tropfengrößenverteilungen im Spray. Die Laser-Doppler-Anemometrie wird zum Messen der lokalen Tropfengeschwindigkeiten im Spray verwendet.

---

## 3. STAND DER FORSCHUNG

### 3.1 Eigenschaften strömender Suspensionen

Suspensionen sind zweiphasige Gemische, die aus einer in kontinuierlicher Form vorliegenden flüssigen Phase mit darin homogen verteilten festen Partikeln bestehen. Sind die Partikeln groß und unterscheidet sich ihre Dichte merklich von der der Flüssigkeit, so verhält sich die Suspension im Strömungsfeld wie ein zweiphasiges Gemisch, das durch die Relativgeschwindigkeit und den Impulsaustausch zwischen den Phasen charakterisiert ist. Sind die Dichtedifferenzen gering und die Partikelabmessung so, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln und der umgebenden Flüssigkeit zu vernachlässigen ist, so verhält sich die Suspension wie eine homogene Flüssigkeit mit vom Feststoffanteil abhängigen rheologischen Fließeigenschaften. In den Gleichungen zum Beschreiben von Strömungsfeldern finden sich häufig neben den rheologischen Stoffeigenschaften die Dichten, die Oberflächenspannung und der Feststoffanteil. Diese können von Randbedingungen, der Gemischzusammensetzung aber auch vom Strömungsfeld abhängig sein.

Sollen zum Beispiel die Gesetze der Strömungsmechanik oder auch empirischen Gesetzmäßigkeiten für Druckverluste auf strömende Suspensionen angewendet werden, so kann es hilfreich sein, die Stoffeigenschaften der Suspension auf Ersatzstoffwerte einer einphasigen kontinuierlichen Phase zurückzuführen. Die Ersatzdichte einer Suspension ist leicht mit Hilfe der gewichteten Mittelwertbildung, wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, anzugeben. Ist die flüssige Phase die kontinuierliche und benetzt sie inerte Partikeln, so ist die Oberflächenspannung der Suspension nahezu gleich der der Flüssigkeit wie bei Doohar [23] und

Mulhem [47] angegeben. Für die Viskosität und ihre Abhängigkeit von der Scherrate gibt Nigam [49] eine Zusammenstellung der publizierten Modellgleichungen an.

In Tabelle 3.1 sind experimentelle Ergebnisse zu den Stoffeigenschaften von strömenden Suspensionen sowie solche zur Modellbildung zusammengestellt. Dabei wird sich auf Arbeiten beschränkt, in denen Suspensionen mit festen Partikeln kleiner als 250  $\mu\text{m}$  untersucht werden.

Tabelle 3.1 Zusammenstellung bekannter experimenteller Arbeiten zum Messen von Viskositäten und Fließeigenschaften von Suspensionen

Verfasser	Stoffsystem	varierte Parameter	Messtechnik und/oder Modell	Zielgröße
Glaser [26] (1986)	Kohlepartikeln, Wasser	Partikelkonzentration, Scherrate, Kohlesorte	Kapillarviskosimeter/ -	Viskosität
Graham, Raymond, Steele [27] (1984)	diverse (Messdaten aus der Literatur)	Partikelkonzentration, Reynolds-Zahl	diverse/ Mikrorheologie und Clusterbildung $\eta = f(\text{Re}, c_{v,p})$ mit angepassten Koeffizienten	Viskosität
Grassmann, Hilfiker [28] (1979)	Sand, Wasser, Wasserdampf	Dichte der Partikeln, Temperaturen, Druck	isokinetisches Absaugen eines Probevolumens/ Gesetzt für Reibungsdruckverlust mit angepassten Koeffizienten $\zeta = f(\text{Re})$	Phasenanteile in der dreiphasigen Strömung, Druckverlust, krit. Volumenstrom der Suspension
Kawatra, Bahashi [34] (1996)	Silikapartikeln, Wasser	Partikelkonzentration	Rotationsviskosimeter, Kugelvibrationsviskosimeter/ -	Viskosität, Fließverhalten
Mulhem [45] (2006)	Kaolin-, Polymerpartikeln, Wasser, Luft	Partikelkonzentration, Partikelgröße, Scherrate	k.A./ -	Viskosität
Nigam, Schumpe [49] (1991)	diverse (Messdaten aus der Literatur)	Partikelkonzentration, Partikelsorte, Gasvolumenstrom,	diverse/ $\eta = f(c_{v,p})$	Viskosität, Fließverhalten, Strömungsform

Glaser [26], Kawatra [34] und Mulhem [45] messen steigende Viskositäten für steigende Partikelkonzentrationen. Zusätzlich stellen Glaser [26] und Mulhem [45] für die von ihnen untersuchten Suspensionen ein Newtonsches Fließverhalten für Scherraten größer als  $10 \text{ s}^{-1}$  und Feststoffmassenanteile unter 0,50 fest. Graham [27] und Nigam [49] verwenden zahlreiche publizierte

Messwerte um die Viskosität als Funktion der Partikelkonzentration auf empirischem Wege darzustellen. Dabei berücksichtigt Graham [27] auch mikrorheologische Aspekte, welche die Interaktion von Partikelclustern mit der Flüssigkeit wiedergeben. Beide finden eine gute Übereinstimmung mit der von Thomas [66] angegebenen Gleichung für kugelförmige inerte Partikeln bis 435  $\mu\text{m}$  Durchmesser mit einer Volumenkonzentrationen unter 0,60.

Grassmann [28] stellt fest, dass sich die Partikeln in einer dreiphasigen Strömung nur in der flüssigen Phase befinden und gibt ein empirisches Modell zum Berechnen des Druckverlustes in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl an.

### **3.2 Zerstäuben von Suspensionen**

Das Zerstäuben von Flüssigkeiten mit dem Ziel die Phasengrenzfläche zu vergrößern, um damit einen intensiveren Stoff- und Wärmeübergang zu erzielen, ist ein wichtiger verfahrenstechnischer Prozess. Technische Anwendungen, unterschiedliche Bauformen von Zerstäubern, sowie Berechnungsverfahren zum Dimensionieren von Zerstäubern finden sich in den Arbeiten von Lefebvre [35], Richter [56] und Wozniak [76]. Die beschriebenen Bauformen der Zerstäuber sind:

- Druckzerstäuber (einphasig)
- Abtropfzerstäuber
- Lamellenzerstäuber
  - Hohlkegelzerstäuber
  - Fächerstrahlzerstäuber
- Turbulenzerstäuber
- pneumatische Zerstäuber oder Zweistoffzerstäuber (zweiphasig)