

Thomas Richter

Zerstäuben von Flüssigkeiten

Düsen und Zerstäuber in Theorie
und Praxis

4. Auflage

Thomas Richter

Zerstäuben von Flüssigkeiten

Zerstäuben von Flüssigkeiten

Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis

Dipl.-Ing. Thomas Richter

Mit 85 Bildern und 11 Tabellen

4. Auflage



Kontakt & Studium
Band 660

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl
Dipl.-Ing. Elmar Wippler

expert  **verlag**®

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication
in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data are available on the internet at
<http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8385-5186-9

4. Auflage 2017
3. Auflage 2011
- 2., durchgesehene Auflage 2008
1. Auflage 2004

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.
Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2004 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0) 71 59-92 65-0, Fax: +49 (0) 71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herausgeber-Vorwort

Bei der Bewältigung der Zukunftsaufgaben kommt der beruflichen Weiterbildung eine Schlüsselstellung zu. Im Zuge des technischen Fortschritts und angesichts der zunehmenden Konkurrenz müssen wir nicht nur ständig neue Erkenntnisse aufnehmen, sondern auch Anregungen schneller als die Wettbewerber zu marktfähigen Produkten entwickeln.

Erstausbildung oder Studium genügen nicht mehr – lebenslanges Lernen ist gefordert! Berufliche und persönliche Weiterbildung ist eine Investition in die Zukunft:

- Sie dient dazu, Fachkenntnisse zu erweitern und auf den neuesten Stand zu bringen
- sie entwickelt die Fähigkeit, wissenschaftliche Ergebnisse in praktische Problemlösungen umzusetzen
- sie fördert die Persönlichkeitsentwicklung und die Teamfähigkeit.

Diese Ziele lassen sich am besten durch die Teilnahme an Seminaren und durch das Studium geeigneter Fachbücher erreichen.

Die Fachbuchreihe *Kontakt & Studium* wird in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Akademie Esslingen und dem expert verlag herausgegeben.

Mit über 700 Themenbänden, verfasst von über 2.800 Experten, erfüllt sie nicht nur eine seminarbegleitende Funktion. Ihre eigenständige Bedeutung als eines der kompetentesten und umfangreichsten deutschsprachigen technischen Nachschlagewerke für Studium und Praxis wird von der Fachpresse und der großen Leserschaft gleichermaßen bestätigt. Herausgeber und Verlag freuen sich über weitere kritisch-konstruktive Anregungen aus dem Leserkreis.

Möge dieser Themenband vielen Interessenten helfen und nützen.

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

Dipl.-Ing. Elmar Wippler

Vorwort

Das Zerstäuben von Flüssigkeiten zählt zu den elementaren Methoden in der mechanischen Verfahrenstechnik. In einer Vielzahl industrieller Prozesse werden Flüssigkeiten und Suspensionen zu Tropfen zerteilt, um insbesondere Vorgänge des Stoff- und Wärmeaustausches zu begünstigen. Darüber hinaus kommen Zerstäuberdüsen in nahezu allen Beschichtungs- und Lackiertechniken zum Einsatz. Die im Gegensatz zu den eigentlichen Zerstäubereinrichtungen oftmals erheblich kostenintensiveren apparativen und strömungstechnischen Komponenten einer Produktionsanlage können erfahrungsgemäß nur dann verlässlich dimensioniert werden, wenn die Art der Flüssigkeitszerstäubung festgelegt und verifiziert ist.

Umso erstaunlicher ist, dass der Düsen- und Zerstäubertechnologie häufig nicht bereits in der Gestaltungsphase neuer verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen der notwendige Stellenwert zuteil wird. Dieses hat gelegentlich zur Folge, dass geplante oder gar bereits realisierte Komponenten kostspielig modifiziert werden müssen. Stellt sich zudem im Rahmen der Testphase heraus, dass erforderliche Sprayeigenschaften nicht zu erzielen sind, so geht dieses in der Regel mit einer Änderung des gesamten verfahrenstechnischen Prozesses einher.

Mit der Planung und Entwicklung von produktionstechnischen Anlagen betraute Ingenieure und Techniker stehen erfahrungsgemäß oft vor dem Problem, dass zerstäubungsspezifische Fachliteratur, welche die gesamte Thematik der Düsentechnologie überschaubar und praktikabel darstellt, kaum verfügbar ist. Zudem wird nur an einigen wenigen Hochschulen und Universitäten das Fach „Zerstäubungstechnik“ als eigenständige Vorlesung angeboten.

Das vorliegende Buch möchte diese Lücke schließen. Die dargebotenen Beispiele sollen zudem die theoretischen Zusammenhänge transparent und nachvollziehbar erkennen lassen. Die komplizierten Gesetzmäßigkeiten ein- und mehrphasiger Strömungen werden nur soweit behandelt, wie es zum Verständnis der erörterten Zerstäubungsprozesse notwendig ist.

Die an der Technischen Fachhochschule „Georg Agricola zu Bochum“ von mir gehaltenen Vorlesungen sowie die an der Technischen Akademie Esslingen e.V. und der Technischen Akademie Wuppertal e.V. regelmäßig durchgeführten Seminare bilden die inhaltliche Grundlage des Buches.

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die mich bei der Herausgabe dieses Werkes tatkräftig unterstützten. Herr Professor Dr. Günter Wozniak und Herr Professor Dr. Rainer Lotzien waren mir fortdauernd gewissenhafte Ansprechpartner und haben im Rahmen der gemeinsam durchgeführten Projekte viele interessante Anregungen beigetragen. Die Mitarbeiter der IBR Zerstäubungstechnik GmbH standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite.

Haltern am See, im November 2007

Thomas Richter

Vorwort zur 4. Auflage

Das Buch liegt nun bereits in der 4., unveränderten Auflage vor. Es ist offensichtlich gelungen, mit dieser Abhandlung die physikalischen und strömungsmechanischen Zusammenhänge in der Zerstäubungs- und Düsenteknik anschaulich und nachvollziehbar darzustellen. Insbesondere der gewählte Praxisbezug und die anschaulichen Anwendungsbeispiele haben sich bewährt.

Ich bin davon überzeugt, dass das Buch auch weiterhin helfen kann, den Zugang zu der komplexen Materie zu erleichtern und grundlegende Kenntnisse zur zielführenden Anwendung der verschiedenen Zerstäubersysteme in verfahrenstechnischen Anwendungen zu erwerben.

Münster, im November 2016

Thomas Richter

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Grundlagen der Flüssigkeitszerstäubung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Der monodisperse Sprüh	1
1.3	Gängige Zerstäuberbauarten	3
1.4	Stoffeigenschaften von Fluiden	4
1.4.1	Die Viskosität	5
1.4.2	Die Dichte	8
1.4.3	Die Oberflächen- und Grenzflächenspannung	8
2	Erzeugen monodisperser Tropfen	12
2.1	Tropfenbildung an Düsen und Kapillaren	12
2.2	Das Abtropfen an Kapillaren und Düsen bei Nichtbenetzung ..	12
2.3	Das Abtropfen an Kapillaren und Düsen bei Benetzung	17
2.4	Der laminare Strahlzerfall	19
3	Strahlbildende Einstoff-Druckdüsen	25
3.1	Grundlagen der Zerstäubung mit Einstoff-Druckdüsen	25
3.2	Flüssigkeitsströmungen in Einstoff-Druckdüsen	25
3.2.1	Die reibungsfreie Strömung in Einstoff-Druckdüsen	25
3.2.2	Die reibungsbehaftete Strömung in Einstoff-Druckdüsen	28
3.2.3	Der Sprühwinkel an Einstoff-Druckdüsen	30
3.3	Tropfengrößen an Turbulenzdüsen	32
3.4	Bauarten strahlbildender Einstoff-Druckdüsen	39
4	Lamellenbildende Einstoff-Druckdüsen	43
4.1	Erzeugen von Flüssigkeitslamellen	43
4.2	Zerfall von Flüssigkeitslamellen	46
4.3	Bauarten lamellenbildender Einstoff-Druckdüsen	54
4.4	Hohlkegel-Druckdüsen	57
5	Rotationszerstäuber	66
5.1	Grundlagen der Zerstäubung mit Rotationszerstäubern	66
5.2	Benetzungsgrenze an Rotationszerstäubern	68
5.3	Filmdicke und Schlupf am Scheibenrand	69
5.4	Tropfenbildung am Scheibenrand	71

5.5	Fadenbildung am Scheibenrand	73
5.6	Lamellenbildung am Scheibenrand	79
5.7	Konstruktive Ausführungen von Rotationszerstäubern	80
6	Zweistoff-Zerstäuber	85
6.1	Einführung	86
6.2	Grundlagen der Gasdynamik	86
6.3	Grundlagen der Zweiphasenströmung	95
6.5	Bauarten von Zweistoff-Düsen	101
6.5.1	Zweistoff-Düsen äußerer Mischung	102
6.5.2	Zweistoff-Düsen innerer Mischung	110
7	Ultraschallzerstäuber	118
7.1	Grundlagen der Ultraschallzerstäubung	118
7.2	Tropfenbildung durch Kapillarwellen	118
7.3	Die Kavitationsschwelle	122
7.4	Tropfenkoaleszenz an Ultraschallzerstäubern	124
7.5	Akustische Zerstäuber	125
8	Sonstige Zerstäuberbauarten	129
8.1	Einführung	129
8.2	Pralldüsen	129
8.3	Zerteilung durch Tropfenprall	131
8.4	Elektrostatische Zerstäubung	134
9	Tropfengrößenverteilungen	137
9.1	Einführung	137
9.2	Charakteristische Tropfendurchmesser	137
9.3	Verteilungsfunktionen	140
9.4	Messen von Tropfengrößenverteilungen	143
9.4.1	Bildanalyseverfahren	144
9.4.2	Laserbeugungsspektrometrie	145
9.4.3	Phasen-Doppler-Anemometer	149
9.4.4	Präparative Methoden	149
10	Formelzeichen	151
11	Literatur	153
12	Sachwortverzeichnis	158

1 Grundlagen der Flüssigkeitszerstäubung

1.1 Einführung

Unter dem Begriff *Zerstäuben* versteht man üblicherweise das Erzeugen einer Vielzahl einzelner Tropfen aus einem bestimmten Flüssigkeitsvolumen- bzw. Flüssigkeitsmassenstrom. Das Produkt des Zerstäubungsvorganges ist also ein Tropfenkollektiv, welches als Sprüh bzw. Spray bezeichnet wird. Weisen die im Sprüh befindlichen Tropfen alle einen identischen Tropfendurchmesser auf, so spricht man von einer monodispersen Tropfengrößenverteilung. In einem solchen Fall ist die gesamte Sprayeigenschaft durch Angabe eines einzelnen Tropfendurchmessers x hinreichend genau charakterisiert. Die meisten technischen Zerstäuber und Düsen liefern jedoch einen Spray, welcher verschieden große Tropfen enthält. Liegen in einem solchen Fall lediglich Angaben über einen einzigen charakteristischen Tropfendurchmesser vor, so kann die Sprayeigenschaft nicht vollständig beschrieben werden. Vielmehr sind zusätzliche Informationen notwendig, um beispielsweise Stoff- und Wärmeübergangsberechnungen ausreichend genau durchzuführen. Dank verfügbarer berührungs- und beeinflussungsfreier laseroptischer Methoden zum Messen der vollständigen Tropfengrößenverteilungen können diese wichtigen Daten jedoch relativ leicht ermittelt werden.

1.2 Der monodisperse Sprüh

Die wesentlichen Merkmale des monodispersen Sprühs lassen sich durch die Angabe eines einzigen Tropfendurchmessers berechnen. In der Praxis interessiert besonders die von einem Sprüh insgesamt erzeugte Flüssigkeitsoberfläche A_s . Diese lässt sich bei monodispersen Sprühs leicht berechnen, wie das folgende Beispiel zeigt. Aus einem mit Flüssigkeit gefüllten und geneigten Becherglas lösen sich im Erdschwerefeld gleich große Tropfen ab, Abb. 1-1. Der einzelne Tropfen ist charakterisiert durch seinen Durchmesser x , seine Oberfläche A , sein Volumen V und seine Masse m . Die im Becherglas verbleibende Flüssigkeit

besitzt die freie Oberfläche A_0 . Diese ist lediglich vom Durchmesser des Becherglases abhängig. Es wird zudem vorausgesetzt, dass die sich ablösenden Tropfen eine Kugelform aufweisen, also keine Deformationen zeigen.

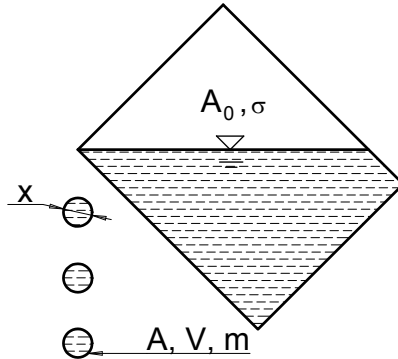


Abb. 1-1:
Abtropfen aus einem Becherglas.

Bezeichnet m_0 die gesamte im Becherglas zu Anbeginn des Abtropfvorganges befindliche Flüssigkeitsmasse, so resultiert hieraus bei einer vollständigen Entleerung eine Anzahl n an einzelnen Tropfen von

$$n = \frac{6 \cdot m_0}{\pi \cdot \rho \cdot x^3} [-] \quad (1-1)$$

Die insgesamt erzeugte reaktive Flüssigkeitsoberfläche beträgt demzufolge

$$A_S = n \cdot A = \frac{6 \cdot m_0}{\rho \cdot x} [m^2] \quad (1-2)$$

Beispiel 1.1: Ein Becherglas mit einem Durchmesser von $D = 100 \text{ mm}$ sei mit einer Flüssigkeitsmasse an Wasser von $m_0 = 3 \text{ kg}$ gefüllt. Diese Masse werde vollständig zu gleich großen Tropfen mit einem Durchmesser von $x = 0,5 \text{ mm}$ zerteilt. Die Dichte ρ des Wassers betrage $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Die Oberfläche des einzelnen Tropfens beträgt

$$A = \pi \cdot x^2 = \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2 = 78,5 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}. \quad (1-3)$$

Erzeugt werden

$$n = \frac{6 \cdot 3}{\pi \cdot 1000 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^3} = 45,8 \cdot 10^6 \text{ [-]} \quad (1-4)$$

einzelne Tropfen. Diese bilden in ihrer Gesamtheit eine Flüssigkeitsoberfläche von

$$A_S = \frac{6 \cdot 3}{1000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 36 \text{ [m}^2\text{]}. \quad (1-5)$$

Im Vergleich hierzu wies die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Becherglas lediglich einen Betrag von

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]} \quad (1-6)$$

auf. Insgesamt konnte durch das Erzeugen von monodispersen Tropfen mit einem Durchmesser von $x = 0,5$ mm die ursprünglich vorhandene freie Flüssigkeitsoberfläche deutlich vergrößert werden; im vorliegenden Fall um den Faktor 4615.

Um einzelne Tropfen auszubilden und somit die freie Oberfläche der Flüssigkeit zu vergrößern, muss dem System eine bestimmte Energie bzw. Arbeit zugeführt werden. Diese dient dazu, die wirksame Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit zu überwinden. In guter Näherung gilt für die aufzubringende Arbeit

$$W_\sigma = \sigma \cdot (A_S - A_0) \approx \sigma \cdot A_S \text{ [N} \cdot \text{m]}. \quad (1-7)$$

1.3 Gängige Zerstäuberbauarten

Düsen und Zerstäuber dienen dazu, der zu zerstäubenden Flüssigkeit die zum Ausbilden des Sprühs benötigte Energie zuzuführen. Je nach

Art der Energiezufuhr unterscheidet man zweckmäßigerweise in folgende Zerstäuberbauarten.

- **Einstoff-Druckdüsen.** Die zu zerstäubende Flüssigkeit wird der Düse unter einem bestimmten Druck zugeführt. Dieser wird genutzt, um der Flüssigkeit beim Austritt aus der Düsenmündung eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit aufzuprägen.
- **Zweistoff- bzw. pneumatische Düsen.** Energielieferant bei diesen Düsen ist ein mit hoher Geschwindigkeit strömendes Gas oder Dampf. Üblicherweise ist die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit bei diesen Düsen sehr gering.
- **Mechanische Zerstäuber.** Die zu zerstäubende Flüssigkeit wird beispielsweise durch mechanische Schwingungen beschleunigt. Ebenso kommen häufig rotierende Scheiben zum Einsatz, welche mit der Flüssigkeit beaufschlagt werden und dieser eine Geschwindigkeit aufprägen.
- **Sonderzerstäuber.** Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise Prall- und Elektrozerstäubungsverfahren. In der industriellen Anwendung sind derartige Sonderzerstäuber nur vereinzelt anzutreffen.

Die Wahl der jeweiligen Zerstäuberbauart zur Lösung einer bestimmten Aufgabe hängt von einer Vielzahl verschiedener Anforderungen und Randbedingungen ab. Die gewünschte Feinheit des erzeugten Tropfengrößenspektrums spielt ebenso eine wichtige Rolle wie der zu zerstäubende Flüssigkeitsvolumenstrom und die rheologischen Eigenschaften des Fluids selbst.

1.4 Stoffeigenschaften von Fluiden

Flüssigkeiten und Gase, zusammenfassend als Fluide bezeichnet, unterscheiden sich durch spezifische Eigenschaften, welche beispielsweise ihr Fließverhalten charakterisieren. Bereits aus Erfahrung ist bekannt, dass Wasser aus einer bestimmten Bohrung und unter definiertem Druck anders ausströmt als ein zäher Honig. Diese Stoffeigenschaften von Fluiden spielen in der Zerstäubungstechnik eine eminent wichtige Rolle. Nicht nur die strömungstechnische Dimensionierung der Düsen steht in einem direkten Zusammenhang mit den spezifischen Fluideigenschaften; bereits die Wahl der in Betracht kommenden Zerstäuberbauart ist maßgeblich von den Stoffeigenschaften der zu zerstäubenden Flüssigkeit abhängig. Im Bereich der Zerstäubungstechnik ist insbesondere die

Flüssigkeitsviskosität η , die Flüssigkeitsdichte ρ und die Oberflächenspannung σ von Bedeutung.

1.4.1 Die Viskosität

Unter der Viskosität oder Zähigkeit einer Flüssigkeit versteht man ihr Vermögen, einer aufgezwungenen Formänderung einen bestimmten Widerstand entgegen zu setzen. Besonders zähflüssige Fluide wie bspw. Bitumen können sich unter bestimmten Umständen annähernd wie ein Festkörper verhalten.

Zwischen der **dynamischen** Viskosität η und der **kinematischen** Viskosität ν besteht der physikalische Zusammenhang,

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]. \quad (1-8)$$

Zur Definition der dynamischen Viskosität η denke man sich eine zwischen zwei sehr großen Platten eingeschlossene Flüssigkeitsschicht, welche homogen sei und zudem keine Temperaturgradienten aufweist, Abb. 1-2.

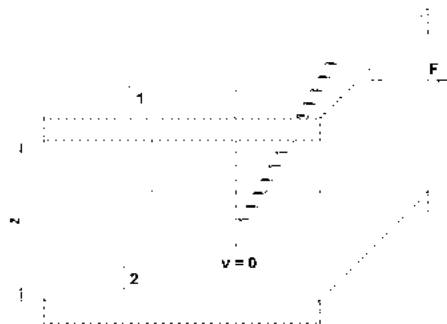


Abb. 1-2:
Homogene Flüssigkeitsschicht
zwischen zwei großen Platten.

Die untere und mit '2' bezeichnete Platte befinde sich in Ruhe, die obere mit '1' gekennzeichnete bewege sich mit der Geschwindigkeit v nach rechts. Der Abstand zwischen den beiden Platten beträgt z . Die Geschwindigkeit der eingeschlossenen Flüssigkeit unmittelbar an den Plattenoberflächen selbst ist identisch mit den Plattengeschwindigkeiten.

Zwischen den beiden Platten bildet sich demzufolge ein lineares Geschwindigkeitsprofil aus. Damit die obere Platte mit der konstanten Geschwindigkeit v bewegt werden kann, ist eine kontinuierliche Kraft F aufzuwenden. Zwischen dieser Kraft F , der Geschwindigkeit v und dem Plattenabstand z besteht die Proportionalität

$$F \sim \frac{v}{z} [\text{N}] \quad (1-9)$$

Die Kraft F kann als Produkt aus der tangentialen Schubspannung τ und der Plattenfläche A dargestellt werden. Als Proportionalitätsfaktor in der Gleichung 1-9 dient die dynamische Viskosität η , sodass sich folgender Zusammenhang ergibt.

$$F = \tau \cdot A = \eta \cdot A \cdot \frac{v}{z} [\text{N}] \quad (1-10)$$

Führt man das Geschwindigkeitsgefälle D ein,

$$D = \frac{v}{z} \left[\frac{1}{\text{s}} \right], \quad (1-11)$$

so gilt für die dynamische Viskosität η ,

$$\eta = \frac{\tau}{D} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s} \right] \quad (1-12)$$

Besteht zwischen der Schubspannung τ und dem Geschwindigkeitsgefälle D ein linearer Zusammenhang, Abb. 1-3, so handelt es sich um eine so genannte newtonsche Flüssigkeit.

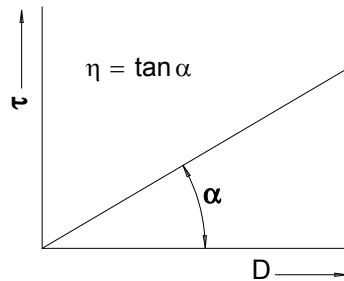


Abb. 1-3: Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ und dem Geschwindigkeitsgefälle D newtonscher Fluide.