

# **Erzeugung und Zerfall gedehnter Laminarstrahlen im Schwerfeld**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Dr.-Ing.**  
vom Fachbereich Chemietechnik der Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Stefan Schneider  
aus  
Essen

Tag der mündlichen Prüfung: 04.03.2002

1. Gutachter: Prof. Dr. techn. P. Walzel
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. W. Merzkirch

Dortmund 2002

Schriftenreihe Mechanische Verfahrenstechnik

Band 4

**Stefan Schneider**

**Erzeugung und Zerfall gedehnter  
Laminarstrahlen im Schwerfeld**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Schneider, Stefan:*

Erzeugung und Zerfall gedehnter Laminarstrahlen im Schwerfeld/  
Stefan Schneider. Aachen : Shaker, 2002

(Schriftenreihe Mechanische Verfahrenstechnik ; Bd. 4)

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-0220-X

Copyright Shaker Verlag 2002

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-0220-X

ISSN 1618-2855

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Apparatechnik der Universität Gesamthochschule Essen sowie am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Dortmund.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. techn. P. Walzel bedanken, der die Anregung zu dieser Arbeit gegeben hat und mich während meiner gesamten Tätigkeit fachlich unterstützte. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr. rer. nat. W. Merzkirch.

Ein besonderer Dank gilt auch den Technikern beider Lehrstühle, die einen großen Anteil zum experimentellen Aufbau meiner Versuchsanlagen beigetragen haben. Darüber hinaus möchte ich mich ganz besonders bei Michael Schneider bedanken, der mich im Rahmen seiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft sehr bei der Durchführung und Auswertung meiner Versuche unterstützt hat. Ein großer Dank gilt auch Hendrik Wilhelm, der im Rahmen seiner Diplomarbeit an der vorliegenden Arbeit mitgewirkt hat und sich dabei weit über das Übliche hinaus engagiert hat und somit zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Dass mir die Tätigkeit an den Lehrstühlen stets so viel Spaß gemacht hat, lag vor allem an dem tollen Arbeitsklima und dem freundschaftlichen Umgang untereinander, aus dem sich mit der Zeit so manche private Freundschaft entwickelt hat.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Frau, die mich nicht nur in fachlicher Hinsicht unterstützt hat, sondern durch die mir auch immer wieder bewusst wurde, dass das private Glück wichtiger als aller wissenschaftlicher Erfolg ist.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>7</b>
1.1 Mechanismen des Strahlzerfalls.....	8
1.2 Zielsetzung .....	11
<b>2 Grundlagen der Strahlbildung und des Zerfalls.....</b>	<b>15</b>
2.1 Strahlbildung und Strahlzerfall an lotrechten Düsen .....	15
2.1.1 Abtropfen.....	15
2.1.2 Tropfenbildung durch laminaren Strahlzerfall .....	17
2.1.3 Zerfallszeit.....	23
2.1.4 Strahlkontur und Tropfengröße bei gedehnten Flüssigkeitsstrahlen.....	25
2.2 Strahlbildung an profilierten Platten .....	41
2.2.1 Grundlagen der Gerinneströmung .....	43
2.2.2 Grundlagen der Plattenströmung .....	47
2.2.3 Lamellenbildungsgrenze an profilierten Platten .....	48
2.3 Verhalten von Gerinneströmungen bei Nichtbenetzung.....	53
<b>3 Versuchsaufbau und –durchführung .....</b>	<b>57</b>
3.1 Untersuchung an lotrechten Düsen .....	57
3.1.1 Versuchsaufbau .....	57
3.1.2 Versuchsparameter und – durchführung.....	60
3.2 Untersuchung an sinusförmig geformten Platten .....	66
3.2.1 Versuchsaufbau .....	66
3.2.2 Versuchsparameter und – durchführung.....	68

3.3 Untersuchung des Verhaltens von Gerinneströmungen bei Nichtbenetzung .....	72
3.3.1 Versuchsaufbau .....	72
3.3.2 Stoffwerte der verwendeten Zinn-Wismut-Legierung.....	75
3.3.3 Versuchsparameter und – durchführung.....	80
<b>4 Versuchsauswertung und Versuchsergebnisse .....</b>	<b>82</b>
4.1 Ergebnisse zur Untersuchung der Strahlbildung und des Zerfalls an lotrechten Düsen.....	82
4.1.1 Strahlkontur .....	83
4.1.2 Zerfallslänge.....	90
4.1.3 Tropfengröße.....	99
4.2 Ergebnisse zur Untersuchung der Strahlbildung an profilierten Platten .....	113
4.2.1 Lamellenbildung .....	113
4.2.2 Tropfengröße.....	122
4.3 Ergebnisse zur Untersuchung von Gerinneströmungen bei Nichtbenetzung.....	127
4.3.1 Verwendete Kennzahlen .....	127
4.3.2 Tropfengröße.....	127
4.3.3 Zerfallslänge.....	138
<b>5 Zusammenfassung .....</b>	<b>141</b>
<b>6 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>144</b>

## Symbolverzeichnis

A	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
a	[m]	Amplitudenhöhe
B	[m]	Plattenbreite
D	[m]	Düsendurchmesser
E	[J]	Energie
d	[m]	Strahldurchmesser, Tropfendurchmesser
d <sub>50,3</sub>	[m]	volumetrisch gemittelter Tropfendurchmesser
d <sub>h</sub>	[m]	hydraulischer Durchmesser
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Halbachse eine Ellipsoiden
h <sub>f</sub>	[m]	hydraulische Querschnittstiefe
F <sub>σ</sub>	[N]	Kontraktionskraft
f	[Hz]	Frequenz
I <sub>0</sub>	[-]	hyperbolische Besselfunktion
K <sub>0</sub>	[-]	hyperbolische Besselfunktion
k	[1/m]	Wellenzahl
L	[m]	Länge
m	[kg]	Masse
ṁ	[kg/s]	Massenstrom
P	[W]	Leistung
p	[Pa]	Druck
R, r	[m]	Radius
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	[m]	Hauptkrümmungsradien
t	[s]; [°C]	Zeit; Temperatur

$Q_3$	[-]	Verteilungssumme
$U$	[m]	benetzter Umfang
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$\bar{v}$	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$x, y, z$	[m]	Raumkoordinaten
$\alpha$	[°]; [1/s]	Neigungswinkel; Wachstumsrate der Störung
$\delta$	[m]	Flüssigkeitshöhe
$\zeta$	[m]	Abweichung der Strahloberfläche von der idealerweise zylinderförmigen Strahlkontur
$\eta$	[Pa s]	dynamische Viskosität
$\Theta$	[°]	Randwinkel
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\lambda_R$	[-]	Rohrreibungszahl
$\nu$	[m <sup>2</sup> s]	kinematische Viskosität
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[N/m]	Oberflächenspannung
$\Phi$	[m <sup>2</sup> /s]	Geschwindigkeitsfunktion

### Dimensionslose Kennzahlen

$$a^* = a \cdot \left( \frac{\rho \cdot g}{\sigma} \right)^{1/2} \quad \text{dimensionslose Amplitudenhöhe}$$

$$Bo = \frac{D^2 \cdot \rho \cdot g}{\sigma} \quad \text{Bond-Zahl}$$

$$d_{50,3}^* = d_{50,3} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot g}{\sigma}}$$

dimensionsloser volumetrisch gemittelter

Tropfendurchmesser

$$d_s^* = d_s \left( \frac{\rho \cdot g}{\sigma} \right)^{1/2}$$

dimensionsloser Strahldurchmesser

$$Fr = \frac{v^2}{D \cdot g}$$

Froude-Zahl

$$L_z^* = L_z \cdot \left( \frac{\rho \cdot g}{\sigma} \right)^{0,5}$$

dimensionslose Zerfallslänge

$$Oh = \eta / \sqrt{\sigma \cdot \rho \cdot D}$$

Ohnesorge-Zahl

$$Re = v \cdot D \cdot \rho / \eta$$

Reynolds-Zahl

$$\dot{V}^* = \dot{V} \cdot \left( \frac{g^3 \cdot \rho^5}{\sigma^5} \right)^{1/4}$$

dimensionsloser Volumenstrom

$$We = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot D}{\sigma}$$

Weber-Zahl

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{a}$$

dimensionslose Wellenlänge

$$\eta^* = \eta \cdot \left( \frac{g}{\rho \cdot \sigma} \right)^{1/4}$$

Viskositäts-Kennzahl

## Indizes

0 Bezogen auf den Düsenaustritt ( $y = 0$ )

D Düse

dyn dynamisch

g Gas

ges gesamt

Grenz Grenzfall

hin	hinten
kin	kinetisch
Krit	Kritisch
L	laminar, Flüssigkeit
max	maximal
min	minimal
nat	natürlich
opt	optimal
pot	potenzielle
S/L	Fest/Flüssig
S	Festkörper, Strahl
T	turbulent
ung	ungedehnt
v	Verweil
vor	vorne
w	Welle
z	Zerfall
$\sigma$	Oberflächenbildung