

# Untersuchung zum Einfluss der Düseninnenströmung auf die Stabilität von flächigen Flüssigkeitsstrahlen

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Kai Heukelbach**  
aus Offenburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Tropea
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Janicka
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Marengo
Tag der Einreichung:	24. Januar 2003
Tag der mündlichen Prüfung:	29. April 2003

Darmstadt 2003  
D 17

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Darmstadt, den 24. Januar 2003

Kai Heukelbach

Forschungsberichte Strömungslehre und Aerodynamik

Band 4

**Kai Heukelbach**

**Untersuchung zum Einfluss  
der Düseninnenströmung auf die Stabilität  
von flächigen Flüssigkeitsstrahlen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Heukelbach, Kai:*

Untersuchung zum Einfluss der Düseninnenströmung auf die Stabilität von flächigen Flüssigkeitsstrahlen / Kai Heukelbach.

Aachen : Shaker, 2003

(Forschungsberichte Strömungslehre und Aerodynamik ; Bd. 4)

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2003

ISBN3-8322-1623-5

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1623-5

ISSN 1610-3114

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 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

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der TU-Darmstadt. Dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit. Ohne sein Vertrauen in die grundsätzliche Machbarkeit der Experimente mit der Laser Doppler Messtechnik wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka danke ich für die Übernahme des Koreferats und sein wertvolles Mitwirken im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Fluidzerstäubung und Sprühvorgänge“.

Auch Prof. Dr.-Ing. Marco Marengo danke ich für die Übernahme des Koreferats. Seine frühere Mitarbeit am Fachgebiet hat mir den Einstieg in das Projekt unendlich erleichtert. Natürlich bleiben die Tage im Kreise seiner Familie in Italien für immer unvergessen.

Dr.-Ing. Nils Damaschke gilt mein besonderer Dank. Seine Freundschaft half, das Arbeiten niemals als eine Last zu empfinden, sondern stets als eine angenehme Unterhaltung. Die entlosen kritischen, aber doch konstruktiven, Diskussionen waren wert über den Bereich der Messtechnik hinaus eine Bereicherung meiner täglichen Arbeit.

Dr.-Ing. Holger Nobach danke ich für die Bereitstellung nützlicher Auswerteverfahren zur Analyse der Laser Doppler Daten. Seine geduldige und unermüdliche Einweisung in die Geheimnisse von L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X sind der Schlüssel für das Gesamtformat dieser Arbeit.

Dr. rer. nat. Hubert Marschall stand mir stets als kompetenter und geduldiger Ansprechpartner in allen Fragen zur Strömungslehre zur Seite, wofür ich ihm herzlich danke.

Dr.-Ing. Suad Jakirlić möchte ich für die äußerst hilfreichen Erläuterungen in allen Fragen zu turbulenten Strömungen danken. Seine ergänzenden numerischen Berechnungen, deren Ergebnisse hier leider nicht in ihrer Vielzahl aufgenommen werden konnten, haben viel zu dem Verständnis der Düseninnenströmungen beigetragen.

Dr.-Ing. Ilja Roisman danke ich für begeisterte Diskussionen und eine Vielzahl von Anregungen, mit denen man ohne weiteres eine ganze wissenschaftliche Karriere verbringen kann. Ihm und seiner Familie wünsche ich für die Zukunft in Israel alles Gute.

Dr.-Ing. Markus Klein gilt mein Dank für die Überlassung der Daten aus der direkten numerischen Simulation, die das Gesamtbild dieser Arbeit vervollständigen. Die gemeinsamen Konferenzbesuche gehörten stets zu den Höhepunkten meines wissenschaftlichen Wirkens.

Dipl.-Ing. Tobias Michel und Sebastian Fehl danke ich für ihr Mitwirken im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeit am Fachgebiet. Manche ihrer Ideen und Ergebnisse sind

mit in diese Arbeit eingeflossen.

Frau Ilona Kaufhold danke ich für den Bau der Düsen und ihre unendliche Geduld, die immer neuen unmöglichen Wünsche wahr werden zu lassen.

Ebenso danke ich Herrn Heinrich Resch, der mit seinem erfahrenen Rat die experimentellen Arbeiten schon zu Anfang auf den richtigen Weg gebracht hat.

Für das Auffinden so mancher Stilblüte möchte ich mich bei Frau Monika Stohr-Leopold und Frau Yvonne Lieke bedanken.

Meinen Eltern gebührt jedoch der größte Dank. Ihr Glaube an einen Erfolg der Arbeit, bevor auch nur das erste Wort geschrieben war, ist mir stets eine große Stütze gewesen. Ohne auch nur im Geringsten zu übertreiben, kann ich sagen, dass ohne sie diese Arbeit nie zustande gekommen wäre.

Darmstadt, den 17. Januar 2003

Kai Heukelbach



4.1.2.4	Einfluss mechanischer Schwingungen . . . . .	47
4.2	Bildgebende Messungen . . . . .	50
4.2.1	Analyse von Längenskalen . . . . .	51
4.2.2	Gewinnung von Geschwindigkeitsinformationen . . . . .	52
4.3	Mechanisches Abtastverfahren . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>57</b>
5.1	Charakterisierung der Düseninnenströmung . . . . .	57
5.1.1	Düse A . . . . .	57
5.1.2	Düse B . . . . .	65
5.1.3	Düse C . . . . .	71
5.1.4	Düse D . . . . .	72
5.1.5	Düse E . . . . .	72
5.1.6	Düse F . . . . .	75
5.2	Charakterisierung der Filmstabilität . . . . .	76
5.2.1	Wasserfilm A . . . . .	77
5.2.2	Wasserfilm B . . . . .	80
5.2.3	Wasserfilm C . . . . .	82
5.2.4	Wasserfilm D . . . . .	83
5.2.5	Wasserfilm E . . . . .	84
5.2.6	Wasserfilm F . . . . .	85
5.3	Analyse der Stabilität der Flüssigkeitsfilme . . . . .	86
5.3.1	Einfluss der Grenzschicht . . . . .	86
5.3.2	Einfluss der Turbulenz . . . . .	90
5.3.3	Beurteilung der Stabilität und des Zerfalls der Flüssigkeitsfilme . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>95</b>
<b>A</b>	<b>Druckverlustbeiwerte der Düsen</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Berechnungen zur Empfangsoptik</b>	<b>101</b>
<b>C</b>	<b>Ergänzende Strahlaufnahmen</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>