

**Methode der laser-induzierten Lumineszenz
zur experimentellen Analyse des Stofftransportes
in laminar-welligen Flüssigkeitsfilmen**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
André Schagen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Modigell
Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Bardow

Tag der mündlichen Prüfung: 28.08.2014

Berichte aus der Verfahrenstechnik

André Schagen

**Methode der laser-induzierten Lumineszenz
zur experimentellen Analyse des Stofftransportes
in laminar-welligen Flüssigkeitsfilmen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3602-2

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrenstechnik im Lehr- und Forschungsgebiet Mechanische Verfahrenstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich von Herzen danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Modigell. Er hat diese Arbeit ermöglicht und wissenschaftlich betreut, und er stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite.

Herrn Professor Dr.-Ing. André Bardow möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferats, sein tiefgehendes Interesse an dieser Arbeit und seine wertvollen Anregungen danken.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen für die stets sehr gute Zusammenarbeit, den kritischen und inspirierenden fachlichen und nicht-fachlichen Diskussionen und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt meinem langjährigen Zimmerkollegen Thomas Feja.

Dank gilt auch meinen studentischen Mitarbeitern, insbesondere Robert Hupe, Oliver Hampe, Christoph Mevenkamp, Harald Gerigk, Christoph Ballhaus und Oliver Lex für ihren großen Einsatz und ihre Unterstützung.

Den Mitarbeitern des Instituts aus dem Labor, der Werkstatt und dem Sekretariat, insbesondere Maria-Louisa Fischöder, danke ich für ihr stets hilfreiches Engagement.

Der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung der Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 540 *Modellgestützte experimentelle Analyse kinetischer Phänomene in mehrphasigen fluiden Reaktionssystemen*. Allen Kollegen aus dem SFB 540 danke ich für die erkenntnisreiche Zeit und die intensive Zusammenarbeit. Hier gilt mein Dank insbesondere Faruk Al-Sibai, Ansgar Leefken, Slava Lel und Georg Dietze.

Mein herzlichster Dank geht an meine Frau Alexandra und an meine Söhne, Leonard und Julius, für ihre unentbehrliche Unterstützung, Geduld und Zuversicht.

Leverkusen, im Dezember 2014

André Schagen

für

Alexandra, Leonard und Julius

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Nomenklatur	V
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Grundlagen der Filmströmung	3
2.1.1 Nußeltischer Flüssigkeitsfilm	3
2.1.2 Wellige Filmströmung	5
2.2 Stofftransport in Filmströmungen	14
2.3 Folgerungen für die vorliegende Arbeit	17
3 Methode der laser-induzierten Lumineszenz	19
3.1 Physikalische Grundlagen der Lumineszenz	19
3.1.1 Anregung und Deaktivierung elektronischer Zustände	20
3.1.2 Kinetik photophysikalischer Prozesse	23
3.1.3 Löschung elektronischer Anregungszustände	25
3.2 Diacetyl als optischer Indikator	26
3.3 Technische Ausführungen des Messsystems	31
3.4 Mathematisches Modell der Signalgenerierung	35
3.4.1 Herleitung eines allgemeinen Modells	35
3.4.2 Modellierung des Fluoreszenzsignals	38
3.4.3 Modellierung des Phosphoreszenzsignals	39
3.5 Grundlegende Messungen am Stoffsystem	40
3.5.1 Fluoreszenz	40
3.5.2 Phosphoreszenz	42
4 Signalrekonstruktion	51
4.1 Grundlagen inverser Probleme	51
4.2 Direktes Problem	54
4.2.1 Sensitivitätsanalyse	56
4.3 Signalmrückführung	62
4.3.1 Numerische Untersuchungen an glatten Signalen	63
4.3.2 Konfidenz bei künstlich verrauschten Signalen	69

5 Untersuchungen zum Transport in Flüssigkeitsfilmen	77
5.1 Versuchsanlage	77
5.2 Validierung der Messmethode	79
5.3 Stofftransport in welligen Flüssigkeitsfilmen	82
5.3.1 Oberflächenstruktur und Hydrodynamik	82
5.3.2 Stofftransport in Einzelwellen	88
5.4 Wärmetransport in welligen Flüssigkeitsfilmen	95
5.5 Modell der effektiven Diffusion	100
6 Zusammenfassung und Ausblick	109
Literaturverzeichnis	111