

# **Laserbasierte Untersuchung der Flamme-Wand-Interaktion**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Markus Mann**

aus Siegen

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler |
| Mitberichterstatter:        | Prof. Dr. rer. nat. C. Schulz   |
| Tag der Einreichung:        | 30. April 2013                  |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 12. Juni 2013                   |

Darmstadt 2013

D17

**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.

**Mann, Markus:**

Laserbasierte Untersuchung der Flamme-Wand-Interaktion  
ISBN 978-3-86376-048-9

**Alle Rechte vorbehalten**

1. Auflage 2013, Göttingen

© Optimus Verlag

URL: [www.optimus-verlag.de](http://www.optimus-verlag.de)

Printed in Germany

Papier ist FSC zertifiziert (holzfrei, chlorfrei und säurefrei,  
sowie alterungsbeständig nach ANSI 3948 und ISO 9706)

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

# Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Stipendiat und Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik an der TU Darmstadt in den Jahren 2009 bis 2013. Daher gilt mein besonderer Dank dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. Andreas Dreizler für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen und Freiheit bei der Gestaltung dieser Arbeit. Die ausgezeichneten Rahmenbedingungen ermöglichten es, die Promotion in der angestrebten Zeit zu vollenden. Zahlreiche fruchtbare Diskussionen zeugten von hohem Interesse an dieser Arbeit und trugen wesentlich zum ihrem Gelingen bei.

Weiterhin gilt mein aufrichtiger Dank Herrn Prof. Dr. Christoph Schulz für die Übernahme des Korreferates und das damit zum Ausdruck gebrachte Interesse an meiner Arbeit. Die eingebrachten Ideen und Impulse haben zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Dr. Christopher Klierer möchte ich für die gemeinsam durchgeführte Messkampagne in den Sandia National Laboratories, Livermore, USA, bedanken und die Gastfreundschaft, die ich während dieser Zeit erfahren durfte. Die dort gewonnen Erkenntnisse haben großes Potential für zukünftige Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Flamme-Wand-Interaktion und darüber hinaus.

Meinen Kollegen am Fachgebiet – genauer müsste man sagen: an den Fachgebieten EKT und RSM – danke ich für die großartige Arbeitsatmosphäre und die Unterstützung, die mir wiederfahren ist. Darunter möchte meine Mitstreiter der wandnahen Verbrennung MSc. Elias Baum, Dr.-Ing. Thilo Kissel, MSc. Christopher Jainski und Dr.-Ing. Jan Brübach besonders hervorheben. Ein ganz herzlicher Dank gilt den Weggefährten erster Stunde, Bürokollegen und -Nachbarn Dipl.-Ing. Philipp Trunk und Dipl.-Ing. Jens Herrmann, mit denen ich auf dienstlichen und privat unternommenen Weltreisen viele tolle Erlebnisse verbinde, die mir noch lange in guter Erinnerung bleiben mögen. Herrn Dipl.-Ing. Andreas Ludwig danke ich für seine Unterstützung im Labor und insbesondere für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Stellvertretend für das Team der mechanischen Werkstatt danke ich Herrn Roland Berntheisel für die Anregung zu zahlreichen Detailverbesserungen verbunden mit der Fertigung der Prüfstandskomponenten.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die uneingeschränkte Unterstützung während der Schul- und Studienzeit, die mir diesen Weg überhaupt erst möglich gemacht hat. Bei meinen Freunden und den Kameraden des THW OV Wörrstadt bedanke ich mich für die gute Zeit und den erfrischenden Ausgleich zu meiner wissenschaftlichen Tätigkeit.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Freundin Stefanie Geis, die viele Entbehrungen still ertragen hat und für die liebevolle Unterstützung, die sie mir zu Teil werden ließ.

Mainz, Juni 2013

Markus Mann

Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit  
einem Schlußpunkt, sondern mit einem Fragezeichen.

Hermann Hesse

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1      | Hintergrund und Motivation . . . . .                                 | 1         |
| 1.2      | Stand der Forschung . . . . .                                        | 3         |
| 1.2.1    | Flamme-Wand-Interaktion . . . . .                                    | 3         |
| 1.2.2    | Laserbasierte Verbrennungsdiagnostik . . . . .                       | 5         |
| 1.3      | Struktur der Arbeit . . . . .                                        | 8         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen von Verbrennung und Flamme-Wand-Interaktion</b>        | <b>9</b>  |
| 2.1      | Grundlegende Begriffe der Verbrennung . . . . .                      | 10        |
| 2.2      | Bilanzgleichungen . . . . .                                          | 11        |
| 2.3      | Reaktionskinetik und Reaktionsmechanismen . . . . .                  | 14        |
| 2.4      | Turbulenz . . . . .                                                  | 16        |
| 2.5      | Grenzschichten . . . . .                                             | 18        |
| 2.6      | Stationäre eindimensionale Vormischflammen . . . . .                 | 19        |
| 2.6.1    | Frei propagierende Vormischflammen . . . . .                         | 19        |
| 2.6.2    | Stagnationsflammen . . . . .                                         | 21        |
| 2.7      | Turbulente Vormischverbrennung . . . . .                             | 22        |
| 2.8      | Flamme-Wand-Interaktion . . . . .                                    | 25        |
| 2.8.1    | Laminare Flamme-Wand-Interaktion . . . . .                           | 25        |
| 2.8.2    | Turbulente Flamme-Wand-Interaktion . . . . .                         | 29        |
| <b>3</b> | <b>Messtechnische Methodik</b>                                       | <b>31</b> |
| 3.1      | Grundlagen der Spektroskopie . . . . .                               | 31        |
| 3.1.1    | Elektrodynamik . . . . .                                             | 31        |
| 3.1.2    | Klassische Wellenoptik . . . . .                                     | 32        |
| 3.1.3    | Quantenmechanik . . . . .                                            | 33        |
| 3.2      | Kohärente anti-Stokes Raman-Spektroskopie . . . . .                  | 43        |
| 3.2.1    | Grundprinzip des CARS-Prozesses . . . . .                            | 43        |
| 3.2.2    | Theoretischer Hintergrund . . . . .                                  | 45        |
| 3.2.3    | Rovibronische CARS-Thermometrie am N <sub>2</sub> -Molekül . . . . . | 48        |
| 3.2.4    | Auswertung . . . . .                                                 | 51        |
| 3.2.5    | Charakterisierung des Messsystems und Messungenauigkeiten . . . . .  | 53        |
| 3.2.6    | Ultrakurzpuls-Rotations-CARS . . . . .                               | 56        |
| 3.3      | Spektroskopischer Nachweis von Kohlenstoffmonoxid . . . . .          | 61        |
| 3.3.1    | Kohlenstoffmonoxid . . . . .                                         | 61        |
| 3.3.2    | Laserinduzierte Fluoreszenz . . . . .                                | 62        |
| 3.3.3    | Versuchsaufbau . . . . .                                             | 67        |
| 3.3.4    | Auswertung . . . . .                                                 | 69        |

|          |                                                             |            |
|----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.5    | Charakterisierung des Messsystems . . . . .                 | 71         |
| 3.4      | Particle Image Velocimetry . . . . .                        | 76         |
| 3.4.1    | Grundlagen . . . . .                                        | 76         |
| 3.4.2    | Experimenteller Aufbau . . . . .                            | 79         |
| 3.4.3    | Auswertung . . . . .                                        | 80         |
| 3.4.4    | Charakterisierung des Messsystems . . . . .                 | 82         |
| 3.5      | Planare Laserinduzierte Fluoreszenz am OH-Radikal . . . . . | 83         |
| 3.5.1    | Grundlagen der Ein-Photon-LIF . . . . .                     | 83         |
| 3.5.2    | Struktur und Nachweis von OH . . . . .                      | 84         |
| 3.5.3    | Detektion der chemischen Hauptreaktionszone . . . . .       | 84         |
| 3.5.4    | Versuchsaufbau . . . . .                                    | 85         |
| 3.5.5    | Charakterisierung des Messsystems . . . . .                 | 86         |
| 3.5.6    | Auswertung . . . . .                                        | 87         |
| 3.5.7    | Flammenpropagation . . . . .                                | 90         |
| 3.6      | Bestimmung der Flammengeschwindigkeit . . . . .             | 91         |
| <b>4</b> | <b>Messobjekt</b>                                           | <b>93</b>  |
| 4.1      | Flamme-Wand-Interaktions-Brenner . . . . .                  | 93         |
| 4.2      | Stationäre Betriebsweise . . . . .                          | 94         |
| 4.3      | Verlöschende Betriebsweise . . . . .                        | 96         |
| 4.3.1    | Zündsystem . . . . .                                        | 96         |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion</b>                            | <b>99</b>  |
| 5.1      | Stationäre Betriebsweise . . . . .                          | 99         |
| 5.1.1    | Temperatur und CO-Konzentration . . . . .                   | 99         |
| 5.1.2    | Enthalpie- und Wärmestrom . . . . .                         | 104        |
| 5.1.3    | 1D-Temperaturprofile . . . . .                              | 106        |
| 5.1.4    | Flammenpropagation . . . . .                                | 107        |
| 5.2      | Transiente Flamme-Wand-Interaktion . . . . .                | 108        |
| 5.2.1    | Temperatur, Löschabstände, Enthalpieentzug . . . . .        | 108        |
| 5.2.2    | Thermokinetischer Zustand in Wandnähe . . . . .             | 114        |
| 5.2.3    | Flammenpropagation gegen feste Oberflächen . . . . .        | 116        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                         | <b>121</b> |