

Franziska Seitz

Characterization of the re-ignition process by hot free jets with the focus on mixing

– An experimental investigation –

**Characterization of the re-ignition process by
hot free jets with the focus on mixing
- An experimental investigation -**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte Dissertation
von
Franziska Seitz

Hauptberichter:

Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Maas

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Henning Bockhorn

Tag der mündlichen Prüfung:

06. September 2019

Berichte aus dem Maschinenbau

Franziska Seitz

**Characterization of the re-ignition process
by hot free jets with the focus on mixing**

– An experimental investigation –

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7184-9

ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

◇
Für
Guan, der
mein Leben
so viel besser macht.
Für meinen Papa, der
immer an mich glaubt.
Und meine Mama,
die immer für
mich da
ist.
◇

VORWORT

Jemand hat mir einmal gesagt, dass es nicht wichtig wäre, wie lange man für seine Doktorarbeit benötigen würde, sondern dass das Entscheidende wäre, was man in dieser Zeit lernt. Und jetzt, am Ende meiner Promotion kann ich dem nur zustimmen. Ich habe in den letzten Jahren so viel gelernt. Fachlich, von den Menschen mit denen ich zusammen arbeiten durfte. Zwischenmenschlich habe ich gelernt, wie wichtig es ist, Menschen um mich zu haben, die mir auf ganz unterschiedliche Art und Weise helfen die Päckchen zu tragen, die das Leben für jeden von uns bereit hält. Die wichtigste Lektion war jedoch die, dass am Ende immer alles gut wird.

Die vorliegende Arbeit wurde im Fachbereich „Explosionsschutz in der Energietechnik“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig in enger Kooperation mit dem Institut für technische Thermodynamik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich Dr.-Ing. Robert Schießl und Dr.-Ing. Detlev Markus für ihre fachliche Betreuung der Arbeit danken. Robert, Dir danke ich für den oft stundenlangen fachlichen Austausch am Telefon und Deine unermüdliche Neugierde, die mich immer wieder aufs Neue motiviert und angetrieben hat. Detlev, Dir möchte ich dafür danken, dass Du Dir trotz Deines randvollen Terminkalenders immer Zeit für meine Anliegen genommen und mir die Freiheit gegeben hast mich auf mein Promotionsthema zu konzentrieren.

Meinem Doktorvater, Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Maas danke ich für seine wertvollen fachlichen Anmerkungen zu meiner Arbeit und dafür, dass er mir die Jahre meiner Doktorandenzeit ermöglicht hat. Prof. Dr.-Ing. Henning Bockhorn, danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie Prof. Dr.-Ing. Xu Cheng für die Übernahme des Vorsitzes und die sympathische Leitung meines Promotionskolloquiums.

Ein herzlicher Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen aus den „Explosionsschutz“-Fachbereichen 3.5, 3.6 und 3.7 der PTB für ihre tatkräftige Unterstützung bei den kleinen und großen Herausforderungen der letzten Jahre.

Insbesondere möchte ich Dir, Michael (Paul), für die technische Unterstützung bei der Zählung der Laser danken.

Steffi, Dir ein großes Dankeschön für die Versorgung mit Keksen, Deinen Programmier-Support und die lustigen Momente auch wenn uns beiden gerade nicht zum Lachen war.

Jens, Dir danke ich herzlich dafür, dass Du mich an Deiner Elite-Ausbildung hast teilhaben lassen und mir die Physik hinter so vielen Dingen mit Deiner unermüdlichen Faszination und Freude näher gebracht hast.

Stefan, mein Dank geht an Dich für Deine stets offene Bürotür nebenan und die konstruktiven fachlichen Diskussionen und Gespräche über Gott und die Welt. Da wir jetzt keine Kollegen und Büronachbarn mehr sind, freue ich mich umso mehr, dass Du mir als guter Freund erhalten bleibst.

Meinen Mit-Doktoranden Lennart Meyer, Thomas Meye, Asghar Ghorbani und

Johann-Robert Kummer danke ich für die strategischen Tee- bzw. Kaffee-Diskussionen, die Squash-Runden zum Abschalten, sowie die Einblicke in die Welt der Simulationen.

Ich danke all meinen Kolleginnen und Kollegen von der Sicherheitstechnik, die mich sehr freundlich aufgenommen haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Euch, Carsten, Mario und Michael (Hau) danke ich für Eure breitgefächerte Unterstützung, in Form von diversen Leihgaben, der Fertigung von Komponenten für meinen Versuchsaufbau, der Beratung bei der Auswahl der richtigen O(hr)-Ringe und technischem Support, wenn die neue Gasanlage wieder mal deutlich nach der üblichen Arbeitszeit der meisten Kollegen eine Fehlermeldung generiert hatte.

Für ihre engagierte Mitarbeit an dieser Arbeit im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten danke ich meinen ehemaligen Studenten Simon Pischon, Bastian Druschinski, Eike Häusler, Florian Koch und Corinna Steens. Marina Wendt danke ich für ihre gewissenhafte Unterstützung bei der Durchführung der Zündversuche.

Außerhalb meines Arbeitsumfeldes haben zahlreiche Menschen durch ihren Glauben an mich und ihre beständige Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Kerstin, Dir danke ich herzlich für die obwohl fachfremden aber oft erstaunlich hilfreichen Diskussionen über die verschiedensten Aspekte meiner Forschung. Maria und Evy, Euch danke ich für Eure Motivation und erfrischende Sicht auf das Leben. Sebastian, mein Dank gilt Dir für die manchmal durchaus nötige Ablenkung sowie Deine einzigartig rationale Sicht auf so manche Dinge.

Ich möchte an dieser Stelle auch all den Menschen, hier insbesondere meiner Oma, danke sagen, die all die Jahre mitgefiebert haben und sich so herzlich und ehrlich mit mir gefreut haben, als diese Arbeit fertig war.

Meinen Lektoren und Korrekturlesern danke ich für ihre Sorgfalt und die Zeit, die sie sich dafür genommen haben.

Gian-Raffaele, mein herzlichster Dank geht an Dich für Deine unermüdliche Unterstützung in allen großen und kleinen Lebenslagen und dafür, dass Du mich immer noch liebst, auch wenn ich mich manchmal selber an die Wand klatschen könnte.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, Sieglinde und Gerhard Seitz, die immer Vertrauen in mich hatten und mich schon mein ganzes Leben dazu ermutigen, das zu tun, was ich für richtig halte und mir den Rücken stärken, auch wenn der Gegenwind besonders stürmisch ist.

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR 1447 „Physicochemical-based Models for the Prediction of Safety-relevant Ignition Processes“ finanziell gefördert.

Papier ist zwar geduldig aber auch begrenzt. Aus diesem Grund möchte ich an dieser Stelle allen Menschen meinen Dank aussprechen, die nicht explizit in den vorangegangenen Zeilen erwähnt wurden, jedoch ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Franziska Seitz
Stralsund im September 2019

ABSTRACT

This study focuses on experimentally investigating the role of mixing in the re-ignition process by hot exhaust gas jets that might accidentally emerge from flameproof enclosures into a near stoichiometric hydrogen-air mixture. The main focus was laid on characterizing the initial outflow conditions and studying their influence on the flow field of the free jets. This information can be used to improve type testing in the field of explosion protection and to refine numerical mixing models. Experimental mixing studies on hot reactive flow systems are however subject to numerous temperature dependent effects that hamper the measurement signals. For this reason, studies on non-reacting isothermal helium-nitrogen jets were additionally conducted to develop and verify measurement strategies that are in the following applied to experimental investigations of hot exhaust gas jets. The measurements on hot exhaust gas jets were performed in a specially designed model setup of a flameproof enclosure that was optimised for application of non-invasive laser-based diagnostic techniques. The gaps are cylindrical in shape and are further named nozzles.

First, the initial outflow conditions of the hot jets were characterized and their influence on the re-ignition process investigated using high-speed schlieren imaging. The determination of the initial jet flow conditions was based on the systematic variation of three main parameters that have been identified in previous studies to primarily influence the likelihood of re-ignition by hot exhaust gas jets. These parameters are the location of pre-ignition within the flameproof enclosure, the gap diameter and the gap length. Here, nozzle diameters in the range of $d = 0.6 \text{ mm} - 1.4 \text{ mm}$ and nozzle lengths of 25 mm, 50 mm and 70 mm were tested. The mixing field of the free jets was studied using planar laser-induced fluorescence (PLIF) of the tracer molecule nitric oxide (NO). However, the LIF signal is strongly affected by pressure and temperature variations as well as gas composition. A quantitative determination of the mixing field requires to account for these issues. In a first step, measurement strategies are developed and verified on transient isothermal non-reacting jets first. These strategies are then adapted accordingly and applied to hot reacting exhaust gas jets. Here, a LIF signal, that depends solely on mixture fraction, called signal fraction (F_{LIF}^*), was obtained. From the signal fraction images, mixture fraction values were deduced based on an experimentally determined conversion curve, that accounts for self-quenching of the tracer molecule NO.

Within this work, it was confirmed by an extensive parametric study, that an increase in nozzle diameter leads to more re-ignition events. Long nozzles with $l = 70 \text{ mm}$ however, lead to higher re-ignition frequencies and lower safe diameters if the initial jet velocity is in the range of the speed of sound, leading to an underexpanded free jet. It was further shown, that the jet outflow velocity is primarily influenced by the pre-ignition location within the enclosure and correlates to the pressure ratio across the nozzle at time of jet exit. Here, the maximum jet tip velocity approaches a constant value if the pressure ratio across the nozzle reaches supercritical conditions.

Jet outflow velocities that are in the range of the speed of sound were observed to lead to re-ignition in one or multiple isolated areas in the shear layer of the jet stem close to the nozzle. For nominally identical initial jet conditions, re-ignition can occur in one case but not in another. The images of signal fraction depict, that investigation of the mixing field alone does not explain this behaviour. Possible reasons for these results and observations are discussed in this work.

KURZFASSUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Mischungsvorgänge auf die Wiederzündung eines Wasserstoff-Luft Gemisches durch heiße Abgasfreistrahlen, die aus einem Gehäuse der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“ austreten. Hierbei liegt der Fokus zum einen auf der Charakterisierung und Beschreibung der anfänglichen Ausströmbedingungen der Freistrahlen, zum anderen wird ihr Einfluss auf das sich ausbildende Strömungsfeld untersucht. Die Ergebnisse können dazu verwendet werden, die Bauartprüfung im Explosionsschutz zu verbessern und vorhandene numerische Modelle weiterzuentwickeln. Die experimentelle Untersuchung der Mischungsvorgänge in heißen reagierenden Strömungen unterliegt jedoch zahlreichen temperaturabhängigen Effekten, die das Messsignal zum Teil erheblich beeinflussen. Um diese Einflüsse zu minimieren, werden zunächst Untersuchungen an nicht reagierenden, isothermen Helium-Stickstoff-Freistrahlen durchgeführt. Diese Experimente dienen dazu, Messstrategien zu entwickeln und sie auf ihre Anwendbarkeit in heißen, reaktiven Freistrahluersuchungen zu überprüfen. Im nächsten Schritt werden diese Strategien zur Untersuchung heißer Abgasfreistrahlen angewendet.

Hierzu wurde eine eigens dafür entwickelte Testkammer, die ein Modell eines druckfest gekapselten Gehäuses darstellt und die für die Anwendung nicht-invasiver, laseroptischer Messtechniken bei der Untersuchung von Explosionsvorgängen optimiert wurde, verwendet. Die hier untersuchten Spalte sind zylindrisch und werden im Folgenden als Düsen bezeichnet.

Zuerst werden die anfänglichen Ausströmbedingungen der heißen Freistrahlen charakterisiert und deren Einfluss auf den Wiederzündprozess mittels des Hochgeschwindigkeitsschlierenverfahrens bildgebend untersucht. Durch eine systematische Variation der Ausströmbedingungen der einzelnen Freistrahlen, wird der Einfluss des Strömungsfeldes auf die Häufigkeit der beobachteten Wiederzündungen untersucht. Die Ausströmbedingungen werden durch Variation der drei Versuchsparmeter Ort der Zündung innerhalb des Gehäuses, Düsendurchmesser und -länge verändert. Die untersuchten Düsendurchmesser variieren von 0.6 mm bis 1.4 mm, die Düsenlängen betragen 25 mm, 50 mm und 70 mm.

Das Mischungsfeld der Freistrahlen wird mit Hilfe der planaren laserinduzierten Fluoreszenz (PLIF) des Tracermoleküls NO untersucht. Hierbei hängt das gemessene LIF-Signal von den vorherrschenden Druck- und Temperaturbedingungen, sowie der Gaszusammensetzung ab. Bei einer quantitativen Bestimmung der Mischungsvorgänge müssen diese Einflüsse bekannt sein und berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden Messstrategien zunächst in isothermen, nicht reagierenden Freistrahlen entwickelt und auf ihre Anwendbarkeit bei der Untersuchung von heißen, reagierenden Freistrahlen überprüft. Im nächsten Schritt werden diese Strategien auf die Untersuchung von reagierenden Freistrahlerströmungen angewandt. Infolgedessen ergibt sich ein LIF-Signal, Signalbruch *“signal fraction”* (F_{LIF}^*) genannt, das ausschließlich vom Mischungsbruch abhängt. Ausgehend von den Signalbruch-

Bildern wird der Mischungsbruch mit Hilfe einer gemessenen Umrechnungskurve bestimmt, welche den Einfluss der Selbstlöschung des Fluoreszenzsignals des Tracermoleküls auf das LIF-Signal berücksichtigt.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Parameterstudie bestätigt die bereits aus der Literatur bekannte Beobachtung, dass eine Vergrößerung des Düsendurchmessers die Wahrscheinlichkeit für eine Wiedierzündung erhöht. Des Weiteren steigt die Anzahl der beobachteten Wiedierzündungen je länger die Düsen sind, wenn die Austrittsgeschwindigkeit des Freistrahls im Bereich der Schallgeschwindigkeit liegt und sich somit im Anschluss ein unterexpandierter Freistrahlaufbildet. In diesem Fall verringert sich der sichere Düsendurchmesser deutlich.

Zudem wird gezeigt, dass die Freistrahlauftrittsgeschwindigkeit in erster Linie vom Zündort innerhalb des druckfest gekapselten Gehäuses abhängt, folglich dem Druckverhältnis zwischen dem Gehäuse und der Umgebung zum Zeitpunkt des Freistrahlauftritts. Die maximale Geschwindigkeit der Freistrahlauftrittsfront nähert sich einem konstanten Wert an, sobald das Druckverhältnis zum Zeitpunkt des Freistrahlauftritts überkritische Werte annimmt. Bei Austrittsgeschwindigkeiten, die sich im Bereich der Schallgeschwindigkeit befinden, wurden Wiedierzündungen in einem oder mehreren isolierten Bereichen in der Scherschicht der Freistrahlauftriebe in unmittelbarer Düsennähe beobachtet. Unter nominell identischen Anfangsbedingungen kann ein Freistrahlauftrieb eine Wiedierzündung initiieren, während beim nächsten Experiment bzw. Freistrahlauftrieb keine Wiedierzündung stattfindet. Die Bilder des Signalbruches zeigen, dass dieses Verhalten durch die alleinige Untersuchung des Mischungsfeldes nicht hinreichend erklärt werden kann. Mögliche Gründe für die genannten Ergebnisse und Beobachtungen werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert.

PUBLICATIONS

Parts of the content and modified versions of some figures in this work have previously been published within the following publications.

REVIEWED JOURNAL PUBLICATIONS

- 2018** Effects of nozzle geometry on the reignition by hot gas jets (Franziska Seitz, Detlev Markus, Holger Grosshans and Robert Schießl), *In Combustion Science and Technology*, volume 191(2), pp. 296-310, 2019.
- 2017** Ignition by hot free jets (Franziska Seitz, Robert Schießl and Detlev Markus), *In Zeitschrift für Physikalische Chemie*, volume 231, pp. 1737-1771, 2017.

CONFERENCE PAPERS

- 2018** Studies on reacting gas jets by planar laser-induced fluorescence (Franziska Seitz, Jens Brunzendorf, Detlev Markus, Holger Grosshans and Robert Schießl), *In 12th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*, 2018.
- 2017** Re-ignition by hot free gas jets - A parameter study (Franziska Seitz, Robert Schießl and Detlev Markus), *In 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 2017.
- 2017** Parametric study of ignition process by hot free jets (Franziska Seitz, Robert Schießl and Detlev Markus), *In Digital Proceedings 8th European Combustion Meeting*, 2017.
- 2015** Evaluation strategies for LIF-based measurements of the mixing field in a transient free jet (Franziska Seitz, Robert Alexander Schießl and Detlev Markus), *In Proceedings 7th European Combustion Meeting*, 2015.
- 2014** Laser-based investigations of transient turbulent free jets: Cold flow studies of mixing (Franziska Seitz, Robert Alexander Schießl, Detlev Markus and Ulrich Maas), *In Proceedings 16th International Symposium on Flow Visualization*, 2014.
- 2013** Experimental and Numerical Investigation of Transient Variable-density Free Jets (Franziska Seitz, Asghar Ghorbani, Robert Alexander Schießl, Detlev Markus and Ulrich Maas), *In Proceedings 6th European Combustion Meeting*, 2013.

2013 Experimentelle und numerische Untersuchungen von Zünddurchschlägen (Franziska Seitz, Asghar Ghorbani, Detlev Markus, Robert Alexander Schießl and Ulrich Maas), *In BAM-PTB-Kolloquium*, 2013.

CONTENTS

1	INTRODUCTION	1
1.1	Motivation	1
1.2	State of research	4
1.3	Aim of this study and strategy	5
2	FUNDAMENTALS	7
2.1	Explosion dynamics in an enclosure	7
2.1.1	Combustion process	7
2.1.2	Explosion pressure in a closed vessel of simple geometry	8
2.2	Factors influencing re-ignition	11
2.2.1	Explosive atmosphere	11
2.2.2	Location of pre-ignition source	12
2.2.3	Enclosure and gap	12
2.3	Turbulent jet flows	15
2.3.1	Statistically stationary jets	16
2.3.2	Transient jets	17
2.3.3	Mixture fraction and concentration distribution	18
2.3.4	Supersonic free jets (at nozzle exit)	19
2.3.5	Statistical description of mixing	20
2.4	Re-ignition by hot turbulent jets	22
2.5	Schlieren imaging	24
2.6	Planar laser-induced fluorescence (PLIF)	24
2.6.1	Principle	25
2.6.2	Linear regime	27
2.6.3	Quenching	29
3	EXPERIMENTS AND PROCEDURE	31
3.1	Optical diagnostics	31
3.1.1	Schlieren setup	31
3.1.2	NO-PLIF setup	32
3.2	Test chambers	36
3.2.1	Non-reacting isothermal jets	36
3.2.2	Reacting hot jets	37
3.3	Gas supply	39
3.3.1	Non-reacting isothermal jets	39
3.3.2	Reacting hot jets	40
3.4	Triggering and timing	42
3.4.1	Non-reacting isothermal jets	42
3.4.2	Reacting hot jets	43
3.5	Experimental procedure	44
3.5.1	Non-reacting isothermal jets	44
3.5.2	Reacting hot jets	45

3.5.3	LIF signal quenching curve	46
3.6	Preliminary investigations for quantitative LIF	47
3.6.1	Excitation wavelength	47
3.6.2	Transmittance and reflectance properties of optical components	50
3.6.3	Laser energy variation and sheet alignment	51
4	DATA ANALYSIS AND IMAGE POST PROCESSING	53
4.1	Pressure ratio across the nozzle	53
4.2	Jet tip velocities from schlieren images	54
4.3	Determination of jet tip velocities from LIF images	55
4.4	Location of first self sustaining flame front	55
4.5	From LIF signal to mixture fraction	56
4.5.1	Requirements for LIF image post-processing	57
4.5.2	Principle of LIF image post-processing	57
4.5.3	Image post-processing procedure	59
4.5.4	Accounting for self-quenching of the tracer molecule NO	62
5	RESULTS: CHARACTERISTICS OF RE-IGNITION PROCESS BY HOT FREE JETS	65
5.1	Free jet generation and exit conditions	65
5.1.1	Pressure traces over time in pre-ignition chamber	65
5.1.2	Time from pre-ignition to jet exit from the nozzle	66
5.1.3	Pressure ratio across the nozzle at time of jet exit Π_{nozzle}	68
5.2	Jet tip velocities	70
5.2.1	Influence of pressure ratio across the nozzle at time of jet exit	70
5.2.2	Influence of nozzle dimensions	71
5.2.3	Dependency of the maximum jet tip velocity on Π_{nozzle}	73
5.3	Re-ignition frequencies	75
5.4	Location of re-ignition	79
5.4.1	Influence of pressure ratio across the nozzle	81
5.4.2	Influence of nozzle length	82
5.4.3	Influence of nozzle diameter	84
5.4.4	Wall inlet vs. tube inlet	84
5.5	Summary and conclusion	88
6	RESULTS: MIXING IN NON-REACTING FREE JETS	91
6.1	Conversion of LIF images into mixture fraction maps	91
6.1.1	Suitability study of mixture fraction model	91
6.1.2	Accounting for self-quenching of the tracer molecule NO	94
6.2	Jet tip velocities	98
6.3	Statistics on mixing in transient variable density jets	98
6.3.1	Mean values and standard deviation of signal and mixture fraction	100
6.3.2	Probability density functions and beta approximation	104
6.4	Summary and conclusion	109
7	RESULTS: MIXING IN REACTING FREE JETS	111
7.1	Preliminary investigations for quantitative LIF	111
7.1.1	Calculating LIF signal fraction	111
7.1.2	Necessity and impact of adding nitric oxide as LIF tracer	113

7.2	Axial and radial profiles of signal fraction	117
7.2.1	Variation of nozzle diameter	117
7.2.2	Variation of jet exit velocity	120
7.2.3	Variation of the nozzle length	124
7.3	Summary and conclusion	127
8	SUMMARY AND CONCLUSIONS	129
8.1	Summary	129
8.2	Conclusions	130
8.3	Proposals for further research	132
	Bibliography	135
	Appendices	143
A1	QUENCHING OF A FLAME IN A NARROW TUBE	145
A2	PRELIMINARY INVESTIGATIONS FOR QUANTITATIVE LIF	147
A3	HOT JET RE-IGNITION FACILITY (HJIF)	151
A4	ELECTRICAL TRIGGERING AND TIMING	155
A5	CALCULATING THE SPEED OF SOUND	157
A6	PARAMETERS OF BETA FITS TO DESCRIBE PDFS	159