# Control of Soot Formation in Laminar Flames by Magnetic Fields and Acoustic Waves

# Regelung der Rußbildung in laminaren Flammen mittels Magnetfeldern und akustischer Anregung

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

vorgelegt von

Agnes Jocher

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Heinz Günter Pitsch
Associate Professor Guillaume Legros, Ph. D.

Tag der mündlichen Prüfung: 24.02.2017

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Berichte aus der Energietechnik

**Agnes Jocher**

# Control of Soot Formation in Laminar Flames by Magnetic Fields and Acoustic Waves

Shaker Verlag
Aachen 2017

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2017
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 978-3-8440-5200-8
ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

# Acknowledgments

Within the framework of a jointly supervised Ph. D., the numerical part of the present work was carried out at the Institute for Combustion Technology, RWTH Aachen University and the experiments at the Institut Jean le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie/ Paris06, Sorbonne Universités.

First, I wish to thank both my advisers Associate Professor Guillaume LEGROS and Professor Heinz PITSCH for their valuable suggestions, support and guidance. Their experience in experimental and numerical research allowed the successful completion of this combined work. Also, I wish to thank the members of my defense committee Professor Wolfgang SCHRÖDER, Professor Pierre SAGAUT, Professor Thomas GOMEZ, and Professor Andreas KEMPF. Further, I wish to thank both research groups for the valuable discussions and the helpful comments and suggestions. Especially, I want to cite here Jérôme BONNETY, Muhammad KASHIF, Hugo DUTILLEUL, and Jean-Marie CITERNE and all my fellow graduate students.

Financial support from the Université franco-allemande/Deutsch-Französische Hochschule and funding from the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) for the Clean Sky Joint Technology Initiative under project DREAMCODE grant n° 620143 are gratefully acknowledged.

# Publications

This thesis is mainly based on the following research and publications in scientific journals and international conferences:

- Jocher A., Bonnety, J., Pitsch, H., Gomez, T., and Legros, G., *Magnetic Control of Flame Stability: Application to Oxygen Enriched and Carbon Dioxide Diluted Sooting Flames.* To be submitted.

- Jocher A., Bonnety, J., Pitsch, H., Gomez, T., and Legros, G., *Non-reacting low density jets exposed to a magnetic field.* To be submitted.

- Jocher A., Bonnety, J., Pitsch, H., Gomez, T., and Legros, G., *Combustion instability mitigation by magnetic fields.* Under review.

- Jocher A., Foo, K. K., Sun, Z., Dally, B., Pitsch, H., Alwahabi, Z., and Nathan, G., *Impact of acoustic forcing on soot evolution and temperature in ethylene-air flames.* **Proceedings of the Combustion Institute**, 36(1), pp.781-788. 2017.

- Jocher A., Bonnety, J., Pitsch, H., Gomez, T., and Legros, G., *Dual magnetic effects on soot production in partially premixed flames.* **Proceedings of the Combustion Institute**, 36(1), pp.1377-1385. 2017.

- Jocher, A., Pitsch, H., Gomez, T., and Legros, G., *Modification of sooting tendency by magnetic effects.* **Proceedings of the Combustion Institute**, 35(1), pp.889-895. 2015.

# Abstract

In the present work light is shed on soot formation processes and combustion stability in laminar coflow flames influenced by magnetic field gradients and acoustic forcing. Both influences have been assessed experimentally and numerically.

First, the CIAO in-house code's ability to predict soot volume fraction fields, applying detailed chemistry and the Hybrid Method of Moments in the volume-surface description is assessed in a steady coflow flame. Then, pulsating sooting flames at 20 and 40 Hz were studied. Conclusions on the coupling of flow forcing, flame temperature, and peak soot volume fraction are drawn. The findings can be used to improve future soot models, especially, regarding the different time scales of gas phase chemistry, the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons, and soot coupled with unsteady flows. To investigate soot formation under magnetic field gradients, a Santoro type burner is used. The measurement techniques applied in the course of this thesis are high-speed luminosity measurements, Background Oriented Schlieren (BOS) and one- and two-color Modulated Absorption/Emission (MAE) techniques. The magnetic field impact on soot formation was first studied experimentally in steady laminar non-premixed and partially premixed flames. A magnetic scaling of soot production similar to the known scaling with oxygen was documented for the non-premixed flames. For certain conditions, a trend reversal could be observed in the partially premixed flames. Furthermore, it is shown experimentally and reproduced computationally that a magnetic field gradient can stabilize a spontaneously oscillating non-premixed flame. A local inviscid stability analysis based on the results of the direct numerical simulation is presented for the observed flame, to investigate the flame's response to small perturbations of the mean velocity, temperature, fuel and oxygen mass fraction profiles under magnetic field exposure. The magnetic field is found to reduce the perturbations' growth rate. The study is completed by identifying a domain where naturally oscillating flames can be stabilized and controlled by magnetic field gradients.

# Übersicht

Ziel dieser Arbeit ist es, Rußbildungsprozesse unter dem Einfluss von Magnetfeldgradienten und akustischer Anregung experimentell und numerisch zu untersuchen. Zuerst wurde mittels eines parallelisierten In-House-Codes (CIAO) und Direkter Numerischer Simulation (DNS) der Rußvolumenbruch in einer stationären, laminaren Freistrahlflamme mit detaillierter Chemie und dem Hybrid Method of Moments Modell berechnet und das Ergebnis mit Literaturdaten verglichen. Darauf aufbauend wurden zwei Versuchsreihen (20 und 40 Hz) akustisch angeregter Flammen untersucht und Schlussfolgerungen bezüglich der zeitlichen Interaktion von Strömung, Flammentemperatur und Rußbildung gezogen. Um den Einfluss von Magnetfeldern auf Rußbildungsprozesse experimentell zu untersuchen wurde ein Freistrahlbrenner zwischen den Spulen eines Elektromagneten platziert. Die Flamme wurde dann unter Verwendung folgender Messtechniken charakterisiert: Hochgeschwindigkeitsmessungen der Lichtintensität der Flamme, Background Oriented Schlieren (BOS) Messungen und Extinktionsmessungen mit einer und zwei Wellenlängen. Zuerst wurde der Einfluss von Magnetfeldgradienten auf Rußbildungsprozesse experimentell an stationären nicht vorgemischten und teilweise vorgemischten laminaren Flammen untersucht. Mit aufgeprägtem Magnetfeld konnte ein größerer integrierten Rußvolumenbruch, ähnlich wie bei der Erhöhung des Sauerstoffanteils im Oxidator dokumentiert werden. Für bestimmte Bedingungen konnte eine Abnahme des integrierten Rußvolumenbruches in den teilweise vorgemischten Flammen beobachtet und anhand einer thermo-chemischen Kopplung in der Impulsgleichung erklärt werden. Des weiteren wurde beobachtet dass eine flackernde, nicht vorgemischte Flamme mithilfe eines Magnetfeldgradienten stabilisiert werden kann. Diese Beobachtung wurde numerisch reproduziert. Eine lokale nicht viskose Stabilitätsanalyse deutet an, dass die Wachstumsrate kleiner aufgeprägter Störungen durch einen aufgebrachten Magnetfeldgradienten reduziert werden kann. Die Arbeit schließt mit der experimentellen Feststellung eines Bereiches in dem flackernde Flammen durch einen Magnetfeldgradienten geregelt werden können.

# Résumé

Cette thèse consiste en l'étude expérimentale et numérique des processus de formation des particules de suie au sein des flammes laminaires non-pré-mélangées et partiellement prémélangées sous l'influence d'un champ magnétique ou d'une stimulation acoustique.

Dans une première étape, la capacité du code CIAO à prédire la fraction volumique de suie dans une flamme axisymétrique est étudiée. Les résultats de la simulation numérique directe (DNS) sont en bon accord avec les champs expérimentaux obtenus par Incandescence Induite par Laser (LII) et fournis par l'Université d' Adelaïde, ainsi qu'avec les données de la littérature. Par la suite, deux flammes subissant une stimulation acoustique ont été étudiées. Les fréquences de forçage sont de 20 et 40 Hz avec modulation de débit du combustible de 50%. Bien que la fraction volumique de suie dans la flamme stationnaire soit correctement prédite, la formation de la poche de suie qui écrête périodiquement la partie supérieure de la flamme oscillante ne peut pas être reproduite de façon satisfaisante en utilisant le modèle de suie pré-existant dans le code CIAO. En outre, le pic de fraction volumique de suie est surestimé d'un facteur deux dans le cas de la fréquence de 20 Hz par rapport à la mesure LII. Enfin, il est observé expérimentalement et numériquement qu'à 20 Hz, le pic de fraction volumique de suie ainsi que celui de la température suivent la modulation du débit de combustible avec un déphasage de l'ordre de quelques millisecondes, alors que ce déphasage tend vers zéro pour une excitation de 40 Hz. Ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer les modèles de suie futurs, en particulier concernant les différentes échelles temporelles de la chimie en phase gazeuse, et la formation d'hydrocarbures polyaromatiques (PAH) et de suie couplée avec des flux transitoires.

Pour étudier la formation des particules de suie sous l'influence de gradients de champ magnétique, un brûleur de type Santoro est utilisé. Les techniques de mesure utilisées dans le cadre de cette thèse sont l'imagerie directe à haute cadence, la technique Background Oriented Schlieren (BOS) et la méthode d'Absorption/Emission Modulée (MAE). L'influence du champ

magnétique sur la formation de suie a été tout d'abord étudiée expérimentalement dans les flammes laminaires stables. Une augmentation de la fraction volumique de suie intégrée a été mise en évidence lorsque le gradient de champ magnétique est ascendant. Cette augmentation est similaire à celle résultant d'une hausse de la teneur en oxygène dans l'écoulement oxydant. Par la suite, la distribution de température des particules de suie et celle de la fraction volumique de suie ont été mesureées dans des flammes partiellement prémélangées sous l'influence d'un gradient de champ magnétique. Les paramètres pilotant l'effet magnétique sont identifiés. Une analyse de stabilité linéaire locale appliquée à l'écoulement non-visqueux est présentée pour une flamme sous l'influence de la perturbation magnétique envisagée, ce afin dévaluer le taux d'amplification potentielle des perturbations de la vitesse moyenne, de la température des gaz et des fractions massiques en oxygène et en éthylène. Le gradient de champ magnétique provoque alors une réduction du taux d'amplification. De fait, l'étude est complété par l'identification d'un domaine où les flammes qui oscillent naturellement peuvent être stabilisées et contrôlées par des gradients de champ magnétique. L'effet observé varie avec les fractions molaires en $CO_2$, $O_2$ et $N_2$ dans l'écoulement oxydant. En conclusion, les différents additifs que sont $CO_2$ et $N_2$ permettent de modifier non seulement les conditions thermiques, mais aussi la distribution de concentration en particules de suie et par conséquent la stabilité de la flamme lorsque la flamme est en sus exposée à un gradient de champ magnétique.

# Contents

**Acknowledgments** **III**

**Publications** **V**

**Abstract** **VII**

**Übersicht** **VIII**

**Résumé** **IX**

**1 Introduction** **1**
1.1 Soot Production . . . . . 2
1.1.1 Modeling . . . . . 3
1.1.2 Experimental Studies . . . . . 5
1.1.3 Carbon Dioxide Addition . . . . . 6
1.2 Magnetic Fields . . . . . 8
1.3 Outline of the Thesis . . . . . 10

**2 Spatial and Time-Resolved Measurements in Laminar, Sooting, Coflow Flames** **13**
2.1 Experimental Setup . . . . . 13
2.1.1 Burner Configuration . . . . . 13
2.1.2 Magnetic Field Generation . . . . . 14
2.2 Optical Diagnostic Techniques . . . . . 16
2.2.1 Luminosity Measurements . . . . . 16
2.2.2 Background Oriented Schlieren Technique . . . . . 16
2.2.3 One-Color Modulated Absorption and Emission Technique . . . . . 19
2.2.4 Two-Color Modulated Absorption and Emission Technique . . . . . 24

**3 Direct Numerical Simulations of Sooting Coflow Flames 27**
3.1 Soot Formation in Steady Flames . . . . . 27
3.2 Magnetic Field Modeling . . . . . 34

**4 Non-Reacting Low Density Flows Exposed to Magnetic Fields 40**
4.1 Magnetic Field Impact on Laminar Flows . . . . . 41
4.2 Magnetic Stabilization of a Self-Excited Oscillating Jet . . . . 45

**5 Steady, Sooting, Coflow Flames 47**
5.1 Sooting Tendency Modification by Magnetic Effects . . . . . 47
5.1.1 Optical Diagnostics . . . . . 48
5.1.2 Assessment of the Magnetic Effect . . . . . 49
5.1.3 Magnetic Scaling of Soot Production . . . . . 54
5.2 Dual Magnetic Effects on Soot Production in Partially Premixed Flames . . . . . 56
5.2.1 Flames and Experimental Setup . . . . . 56
5.2.2 Soot Temperature and Volume Fraction Fields . . . . . 58
5.2.3 Parameters Governing the Magnetic Effects . . . . . 63

**6 Time-Varying Flames 69**
6.1 Impact of Acoustic Forcing on Soot Production . . . . . 70
6.1.1 Numerical Setup and Methods . . . . . 70
6.1.2 Start-up Transient Analysis . . . . . 71
6.1.3 Comparison with Experiments . . . . . 72
6.1.4 Soot and Temperature Evolution . . . . . 77
6.1.5 Transient PAH Formation . . . . . 80
6.2 Magnetic Mitigation of Combustion Instability and Emission . 82
6.3 Magnetic Control of Flame Stability: Application to Oxygen Enriched and Carbon Dioxide Diluted Sooting Flames . . . . . 94
6.3.1 Experimental Configuration and Data Processing . . . 95
6.3.2 Initial Observations . . . . . 96
6.3.3 Combined Effects of Additives and Magnetic Gradient on Soot Production . . . . . 102
6.3.4 Stabilization Pathways with Additives and Magnetic Field . . . . . 108

**7 Conclusions 114**

**Appendix 118**

**Bibliography 120**