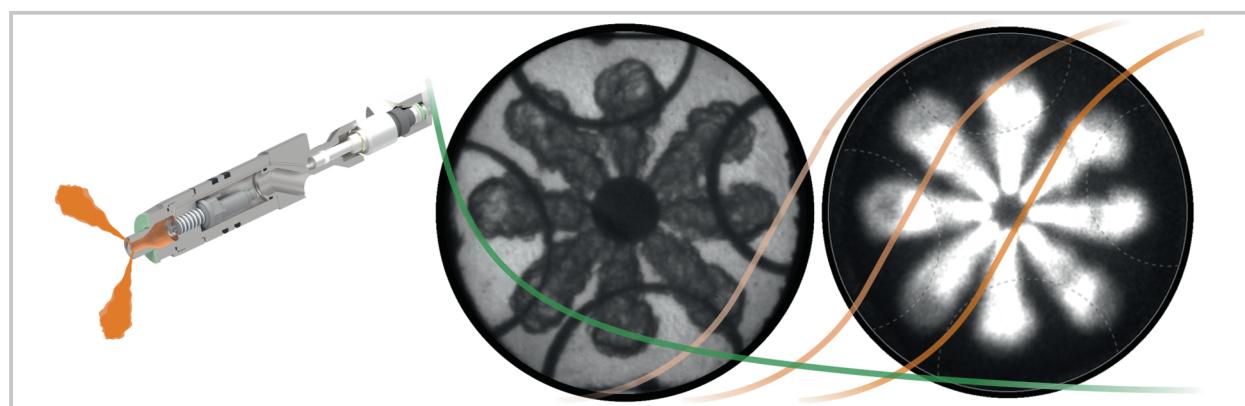


Jan Wichmar

Untersuchung der Zündung von Biogas in einem optisch zugänglichen Motor mit aktiver Vorkammer

Berichte aus dem ITV · Band 04/2024
Herausgeber: Friedrich Dinkelacker



Berichte aus dem ITV

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Technische Verbrennung
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

Zugleich: Dissertation,
Leibniz Universität Hannover, 2024

Zitierweise / Recommended citation:

Wichmar, Jan:
Untersuchung der Zündung von Biogas in einem optisch
zugänglichen Motor mit aktiver Vorkammer;
Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2024
TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen: Berichte
aus dem ITV, Band 04/2024
ISBN: 978-3-95900-989-8

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das
des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen
Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2024
An der Universität 2 ◆ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ◆ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss-verlag.de ◆ mail: info@tewiss-verlag.de

ISBN 978-3-95900-989-8
ISSN 2366-567X

Herstellung: Druckteam, Hannover
Printed in Germany

Untersuchung der Zündung von Biogas in einem optisch zugänglichen Motor mit aktiver Vorkammer

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing)

genehmigte Dissertation

von

Jan Wichmar, M. Sc.

2024

1. Referent: Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

Institut für Technische Verbrennung (ITV)

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing

Professur für Fluidsystemtechnik (FST)

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 09.07.2024

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Verbrennung der Universität Hannover. Zwischen dem Beginn der erfolgreichen Experimente und der Verteidigung lagen zwar nur zwölf Monate, doch diese basieren auf dreieinhalb Jahren intensiver Vorbereitung, die sowohl von ersten Erfolgen als auch von vielen Rückschlägen geprägt war. Diese Zeit hat mir eindrucksvoll gezeigt, dass jedem Ergebnis zahlreiche Probleme und Herausforderungen vorausgehen, die es zu meistern gilt. All diese Erfahrungen haben nicht nur diese Arbeit ermöglicht, sondern waren auch entscheidend für meine persönliche und fachliche Weiterentwicklung.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker, der mir das Vertrauen entgegengebracht hat, zunächst im Bereich der Abgasnachbehandlung und später in der gasmotorischen Verbrennung zu arbeiten, und mich in letzterem auch bei meiner Doktorarbeit unterstützt hat. Ebenso danke ich Prof. Dr. Michael Wensing dafür, dass er sich als Zweitprüfer bereit erklärt hat. Der Forschungsagentur Nachwachsende Rohstoffe bin ich dankbar für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts „Minderung von Treibhausgas-relevanten Emissionen in Biogasmotoren“.

Für die intensive Unterstützung möchte ich mich bei meinem Kollegen Philipp Borken sowie bei Lukas Link und Daniel Bill bedanken, die mich und den Prüfstand über lange Zeit als Studenten begleitet haben. Hauke Hansen danke ich für seine Hilfe bei offenen Fragen und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Im intensiven Endspurt dieser Dissertation war der Austausch mit meinen Mitstreitern Paul Zimmermann und Max Kaiser von großem Wert, wofür ich ebenfalls sehr dankbar bin. Mein Dank gilt auch dem technischen Personal des ITV, das eine wesentliche Unterstützung beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Prüfstandes geleistet hat. Ebenso danke ich allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am ITV, die ich über die Jahre kennengelernt habe und von denen ich viel lernen durfte.

Abschließend möchte ich meiner Familie und besonders meiner Frau Fátima und unserem Sohn von Herzen danken. Ihre Geduld und Unterstützung während der gesamten Zeit, und besonders in der turbulenten Endphase, haben die Fertigstellung dieser Arbeit überhaupt erst möglich gemacht.

Hannover, im September 2024

Jan Wichmar

Kurzfassung

Die Nutzung erneuerbarer Energien wie Strom und Wärme aus Biogas spielt eine entscheidende Rolle bei der Umstellung auf ein nachhaltiges Energiesystem. Die Verbesserung der Effizienz und die Reduktion von Emissionen sind weitere Maßnahmen auf dem Weg zur Erreichung der gesetzten Klimaziele. Bei der Nutzung von Biogas in Blockheizkraftwerken bietet sich ein mageres Brennverfahren an, um insbesondere die Stickoxide bei gleichzeitig hoher Effizienz zu reduzieren. Die Zündung mittels aktiver Vorkammer bietet diesbezüglich großes Potenzial, jedoch fehlt in Bezug auf Biogas noch eine ausreichende Datenbasis.

Aufgrund vieler Einflussfaktoren ist die Zündung mittels aktiver Vorkammer ein komplexer und anspruchsvoller Prozess. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Untersuchung des Brennverfahrens in Bezug auf grundlegende Auslegungsparameter und deren Auswirkung auf das Potenzial und die Betriebsgrenzen der Vorkammerzündung mit Biogas.

Um dies zu untersuchen, wurden umfangreiche Experimente an einem optisch zugänglichen Motor mit einem Biogas mit 60 Prozent Methananteil als Brenngas und verschiedenen Vorkammervarianten durchgeführt. Die simultane Aufzeichnung von Schlieren und OH*-Eigenleuchten während der Verbrennung ermöglicht wertvolle Erkenntnisse zur Entflammung des Hauptbrennraums durch die Vorkammerfackeln. Die Experimente wurden in die Untersuchung der Vorkammerzündung mit und ohne Entzündung des Hauptbrennraums unterteilt. Vergleichend wurde auch der Einfluss der Biogasqualität unter Verwendung von reinem Methan als Basisfall untersucht.

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Verbrennungsstabilität über breite Bereiche und einen positiven Einfluss des Differenzdruckes auf die Brenndauer. Es wurden zwei parameterabhängige Betriebsgrenzen für die Vorkammerzündung identifiziert. Bei Erreichen der Magergrenze des Hauptbrennraumes nimmt die Verbrennungseffizienz aufgrund der verlangsamten Flammenausbreitung sukzessive ab. Die Verlöschgrenze ist durch das Verlöschen der Fackelstrahlen bei Überschreiten eines kritischen Differenzdruckes definiert. Durch die gezielte Auswahl der Vorkammer- und Betriebspараметer kann ein Optimum zwischen beiden Grenzen erreicht werden. Ein zentraler Parameter hierfür ist das Vorkammerluftverhältnis, das im fetten Bereich die Verlöschgrenze zu höheren kritischen Drücken verschiebt und in Kombination mit dem Bohrungsquerschnitt die resultierenden Differenzdrücke bestimmt.

Schlagwörter: aktive Vorkammer, Biogas, optischer Motor

Abstract

„Investigation of the Ignition of Biogas in an Optically Accessible Engine with Active Pre-Chamber“

The use of renewable energies such as electricity and heat from biogas plays a crucial role in transitioning to a sustainable energy system. Improving efficiency and reducing emissions are additional measures on the path to achieving set climate goals. When utilizing biogas in cogeneration plants, a lean combustion process is recommended to reduce nitrogen oxides while maintaining high efficiency. The use of active pre-chamber ignition shows great potential in this regard, but there is currently a lack of sufficient data specifically related to biogas.

Due to numerous influencing factors, active pre-chamber ignition is a complex and challenging process. This study focuses on investigating the combustion process in terms of fundamental design parameters and their impact on the potential and operational limits of pre-chamber ignition with biogas.

To examine this, extensive experiments were conducted on an optically accessible engine using biogas with 60 percent methane content as the fuel and various pre-chamber configurations. Simultaneous recording of schlieren and OH* chemiluminescence during combustion provides valuable insights into the ignition of the main combustion chamber by the pre-chamber jets. The experiments were divided into investigations of pre-chamber ignition with and without ignition of the main combustion chamber. Additionally, the influence of biogas quality was compared using pure methane as a baseline case.

The results show very good combustion stability over wide ranges and a positive influence of pressure difference on combustion duration. Two parameter-dependent operational limits for pre-chamber ignition were identified. Upon reaching the lean limit of the main combustion chamber, combustion efficiency gradually decreases due to slowed flame propagation. The extinction limit is defined by the extinguishing of the jet flames upon exceeding a critical pressure difference. By selectively choosing pre-chamber and operating parameters, an optimum between both limits can be achieved. A key parameter for this is the pre-chamber air ratio, which shifts the extinction limit to higher critical pressures in the rich region and, in combination with the nozzle cross-section, determines the resulting pressure differences.

Keywords: active pre-chamber, biogas, optically accessible engine

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung.....	IV
Abstract.....	V
Nomenklatur.....	VIII
Abkürzungen	IX
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen.....	5
2.1 Gasmotorische Verbrennung.....	5
2.2 Magerverbrennung	6
2.3 Zündung und Verbrennung.....	10
2.4 Vorkammerzündung	13
3 Stand der Forschung	18
3.1 Die Vorkammerzündung im Allgemeinen	20
3.2 Bewertungsgrößen des Brennverlaufes	21
3.3 Auslegungsparameter	25
3.3.1 Vorkammergeometrie	26
3.3.2 Luftverhältnis	29
3.3.3 Ansteuerzeiten	30
3.3.4 Drehzahl	31
3.4 Optische Untersuchungen an Vorkammern.....	31
3.5 Zwischenfazit und Zielsetzung.....	33
4 Methodik	35
4.1 Der Transparentmotor.....	35
4.2 Die Vorkammer	37
4.3 Optische Messtechnik	38

4.4	Beschreibung ausgewählter Messparameter	44
4.5	Aufbereitung motorischer Daten.....	47
4.6	Aufbereitung optischer Daten	51
5	Experimentelle Untersuchungen am Transparentmotor.....	58
5.1	Vorstellung der Vorkammern und Messparameter	58
5.2	Experimentelle Vorkammeruntersuchungen	61
5.2.1	Ergebnisse der Referenzvorkammer	62
5.2.2	Ergebnisse der Vorkammercavariationen	73
5.2.3	Zwischenfazit Vorkammeruntersuchungen.....	82
5.3	Experimentelle Hauptkammeruntersuchungen	83
5.3.1	Ergebnisse der Referenzvorkammer	86
5.3.2	Ergebnisse der Vorkammercavarianten	99
5.3.3	Zwischenfazit der Vorkammercavariation	114
5.4	Erweiterter Magerbetrieb.....	116
5.4.1	Zwischenfazit Erweiterter Magerbetrieb.....	119
5.5	Vergleichende Untersuchungen mit Methan	119
5.5.1	Zwischenfazit Hauptkammerverbrennung mit Methan	126
6	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	127
	Literatur- und Quellenverzeichnis	136
A.1	Messtechnik- und Optikkomponenten	145
A.2	Injectorkalibrierung für Biogas und Methan.....	147
A.3	Vorkammerergebnisse der Vorkammer n8d13	148
A.4	Hauptkammerergebnisse der Vorkammer n8d13	149
	Betreute studentische Arbeiten	151
	Lebenslauf	152

Nomenklatur

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α_{10}	°KW	10 Prozent Brennstoffumsatzpunkt
α_{50}	°KW	50 Prozent Brennstoffumsatzpunkt
α_{90}	°KW	90 Prozent Brennstoffumsatzpunkt
α_{0-10}	°KW	Entzündungsdauer
α_{0-90}	°KW	Brenndauer (0-90 Prozent)
α_{10-90}	°KW	Brenndauer (10-90 Prozent)
ε	-	Verdichtungsverhältnis
η_{th}	-	therm. Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses
κ	-	Isentropenexponent
λ_{HK}	-	Hauptkammer-Luftverhältnis
λ_{VK}	-	Vorkammer-Luftverhältnis
λ_{VK}^*	-	korrigiertes Vorkammer-Luftverhältnis
μ	-	Mittelwert
σ	-	Standardabweichung
$\varphi \mid \phi$	°KW	Kurbelwinkel
$\varphi \Delta p_{max} \mid \phi \Delta p_{max}$	°KW	Position des maximalen Differenzdruckes
A_{ges}/V	mm ² /mm ³	Bohrungfläche-zu-Volumen-Verhältnis
s_L	m/s	laminare Flammengeschwindigkeit
s_T	m/s	turbulente Flammengeschwindigkeit
u'	m/s	turbulente Schwankungsgeschwindigkeit
p	bar	Druck
Δp	bar	Differenzdruck zwischen Vorkammer und Brennraum
Δp_{max}	bar	maximaler Differenzdruck
p_{mi}	bar	indizierter Mitteldruck
Q	J	Wärme
T	K	Temperatur
V	m ³	Volumen

$VarK$	-	Variationskoeffizient
v_{Fackel}	m/s	Fackelausbreitungsgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	maximale Fackelausbreitungsgeschwindigkeit
v_{norm}	m/s	normierte Fackelausbreitungsgeschwindigkeit
ZVZ_{ind}	°KW	indizierter Zündverzug
ZVZ_{opt}	°KW	optischer Zündverzug

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
BHKW	Blockheizkraftwerk
COV	Coefficient of Variation
CVCC	Constant Volume Combustion Chamber
DOI	Duration of Injection
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EOI	End of Injection
HK	Hauptkammer
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PSC	Partially Stratified Combustion
RCM	Rapid Compression Machine
SOI	Start of Injection
TKE	Turbulente kinetische Energie
TJI	Turbulent Jet Ignition
VK	Vorkammer
ZVZ	Zündverzug
ZZP	Zündzeitpunkt