

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Ömer Ünal

Phänomenologische Modellierung der Dieselverbrennung auf homogenem Grundgemisch



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

Ömer Ünal

Phänomenologische Modellierung der Dieselverbrennung auf homogenem Grundgemisch

 Springer Vieweg

Ömer Ünal
Institut für Verbrennungsmotoren
und Kraftfahrwesen
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2019

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-28913-3 ISBN 978-3-658-28914-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28914-0>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Für Erol und Özlem

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fahrzeugantriebe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. M. Bargende, dem Leiter des IVK, für das Initiieren der vorliegenden Arbeit und die Übernahme des Hauptreferats meinen besonderen Dank zukommen lassen. Seine wissenschaftliche und persönliche Betreuung bei der Durchführung sowie den großen Freiraum bei der Gestaltung haben wesentlich zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. K. Boulouchos dem Leiter des Instituts für Energietechnik für die Übernahme des Koreferats und die sehr fruchtbare Zusammenarbeit.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Barba, der als Obmann im Forschungsprojekt stets zu einer produktiven Zusammenarbeit gesorgt hat. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Forschungspartner aus der ETH-Zürich, den Herrn Dr. Srna, Dr. Sushant, Dr. Wright und Siddik für die konstruktive Zusammenarbeit, die zu Erkenntnisgewinn in einem freundlichen Umfeld geführt hat.

Weiterer Dank richtet sich an alle Mitarbeiter des IVK und FKFS, die studentischen Hilfskräfte und Studienarbeiter für die Unterstützung, die zahlreichen Anregungen, die gute Zusammenarbeit und die sehr angenehm kollegiale Arbeitsatmosphäre.

Ganz herzlich danken möchte ich meiner Familie, Memnune, Gülhanım, Özlem und Erol, die mich immer an schweren Zeiten mit Zuversicht und in guten Zeiten mit Teilhabe begleitet haben und damit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ömer Ünal

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Abstract	XXV
Zusammenfassung	XXVII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Konventionelle dieselmotorische Verbrennung	6
2.2 Konventionelle gasmotorische Flammenausbreitung	7
2.3 Selbstzündung	8
2.4 Phänomenologische Verbrennungsmodelle	13
2.4.1 Thermodynamische Grundlagen	13
2.4.2 Modellierung der konventionellen dieselmotorischen Verbrennung	14
2.4.2.1 Einspritzung und Gemischbildung	14
2.4.2.2 Reaktionsrate	17
2.4.3 Modellierung der konventionellen ottomotorischen Verbrennung	19
2.4.4 Modellierung der Selbstzündung	22

3	Messdatenanalyse	25
3.1	Versuchsträger	25
3.2	Versuchsprogramm	28
3.3	Messdatenauswertung	30
3.4	Variation der Substitutionsrate.....	31
3.5	Raildruckvariation.....	36
3.6	Variation des Einspritzzeitpunkts	40
3.7	Variation der AGR-Rate	43
3.8	Variation der Ladelufttemperatur.....	45
3.9	Variation des Luftverhältnisses.....	47
	3.9.1 Zündstrahlverfahren	50
3.10	Propan-Beimischung.....	55
4	Beschreibung des neuen Modellansatzes.....	59
4.1	Umsatz von CNG innerhalb des Dieselstrahls („Entrainment“).....	60
4.2	Berechnung der turbulenten Flammenausbreitung	63
4.3	Berechnung der Volumenverbrennung	65
5	Validierung des neuen Modellansatzes.....	67
5.1	Substitutionsratenvariation	67
5.2	Luftverhältnisvariation.....	70
5.3	Einspritzzeitpunktvariation	72
6	Schlussfolgerung und Ausblick	75
	Literaturverzeichnis.....	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Die Ergebnisse der Prognose für das Jahr 2030 in der anteiligen Aufteilung des Güterverkehrs [1]	2
Abbildung 2.1:	Unterschiedliche Konzepte der Gasmotoren [3].....	3
Abbildung 2.2:	Einteilung der Verbrennungsmodi nach [7, S. 44]	5
Abbildung 2.3:	Unterschiedliche Verbrennungsmechanismen [8].....	5
Abbildung 2.4:	Die phänomenologische Beschreibung einer Dieselkeule [10].....	6
Abbildung 2.5:	Der Zündverzug Methans unter Einfluss von motorischen Variationen [13].....	9
Abbildung 2.6:	Einfluss der Propanbeigabe auf den Zündverzug des Methankraftstoffs bei 100 bar und $\lambda=1$. Die Schwarze Linie gibt den Zündverzug für reines Methan an [13].....	10
Abbildung 2.7:	Darstellung der charakteristischen Zeiten eines Brennverlaufs bei Direkteinspritzung.....	11
Abbildung 2.8:	Rohwerte und Tiefpassgefilterte Werte des Druckverlaufs [Bremsblatt 235, 1800 Upm, 17 bar, $\chi_{\text{Sub}} 54 \%$]	12
Abbildung 2.9:	Anwendung unterschiedlicher Methoden zur Überprüfung einer Selbstzündung	13
Abbildung 2.10:	Dieselkeulenkontur in Abhängigkeit der Luftverhältnissbereiche [20]	16
Abbildung 2.11:	Turbulenzgenerierung durch die Einlassströmung	20
Abbildung 2.12:	Turbulenzgenerierung durch die Quetschströmung.....	20
Abbildung 2.13:	Turbulenzgenerierung durch Einspritzung	20
Abbildung 2.14:	Darstellung einer ottomotorischen Flammenausbreitung mit charakteristischen Größen	21
Abbildung 2.15:	Modellierung der kraftstoffabhängigen Selbstzündung durch die Weisser-Approximation nach [13].....	22