
Emissionsminderung am Nutzfahrzeugdieselmotor durch optimierte Prozessführung und synthetische Kraftstoffe

Vom Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Magnus Schmitt

aus Hünfeld

Berichterstatter:	Prof. Dr.-techn. C. Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. P. Eilts
Tag der Einreichung:	13.04.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	28.06.2016

Darmstadt 2016

D17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 3

Magnus Schmitt

**Emissionsminderung am Nutzfahrzeugdieselmotor
durch optimierte Prozessführung und synthetische
Kraftstoffe**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4677-9

ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Mein Motor macht immer noch große Fortschritte...“

– Rudolf Diesel, 1895

Vorwort

Die Arbeit entstand vorwiegend während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der TU Darmstadt. Für die Betreuung meiner Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen, sowie die vielen fachlichen Diskussionen danke ich herzlichst Herrn Prof. Dr.-techn. Christian Beidl. Für die Annahme der Mitberichterstattung und die freundliche Unterstützung danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts.

Allen Studenten, die mich durch ihren Einsatz am Motorprüfstand oder durch ihre Abschlussarbeiten unterstützt haben, möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen. Ein besonderes Dankeschön geht an die Studentinnen und Studenten von „Box 6“ für die tolle Zusammenarbeit.

Danke auch an meine Kolleginnen und Kollegen vom Institut VKM. Meinen Bürokollegen danke ich für die Hilfsbereitschaft und die angenehme Zeit. Herrn Dr.-Ing. Sören Müller danke ich herzlichst für die Unterstützung während meiner Zeit am Institut, die konstruktive Kritik und die Korrektur meiner Ausarbeitung.

Ein Teil dieser Arbeit baut auf Untersuchungen auf, die im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens mit der MTU Friedrichshafen GmbH entstanden sind. Der Firma MTU danke ich in diesem Zusammenhang für die technische und fachliche Unterstützung. Dabei möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. C. Gietzelt und Dipl.-Ing. C. Philipp bedanken, die das Projekt hervorragend betreut und die Arbeit an der TU unterstützt haben. Vielen Dank an Herrn Dr.-Ing. U. Dohle für das entgegengebrachte Vertrauen. Für die tolle Zusammenarbeit, die vielen Anregungen und die Bereitstellung des synthetischen Kraftstoffes danke ich Herrn Dr. Eberhard Jacob.

Ein besonderes Dankeschön gebührt meinen Eltern, die mir das Studium und damit auch die Dissertation erst ermöglichten und meiner Freundin Katrin für die Geduld, Liebe und Zweitkorrektur der Arbeit.

Darmstadt, März 2016

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeiten der Optimierung von Dieselmotoren für Industrieanwendungen mit vorwiegend innermotorischen Maßnahmen. Dazu wird ein Motorprüfstand mit einem Prototyp eines zukunftsorientiert ausgerüsteten Industriemotors eingesetzt. An diesem Motor werden die grundsätzlichen Einflussgrößen auf die Verbrennung im Hinblick auf deutlich gesteigerte Abgasrückführungsraten (AGR) und abgesenkte Kühlertemperaturen bis weit unter den Taupunkt untersucht. Ziel ist dabei, die strengsten geforderten Grenzwerte für Stickoxidemissionen von 0,4 g/kWh zu erreichen. Für die Optimierung der Kalibrierung wird die Methodik der statistischen Versuchsplanung (DoE – Design of Experiments) angewendet. Der Motor wird weiter für eine Verwendung mit dem synthetischen Kraftstoff Oxymethylether (OME) untersucht. Durch die rußarme Verbrennung dieses sauerstoffhaltigen Kraftstoffs und die potentiell klimafreundliche Herstellbarkeit bietet sich in dieser Kombination ein interessanter Ansatz für Dieselmotorkonzepte in der Zukunft.

Nach Voruntersuchungen mit dem Grundmotor werden Modifizierungen vorgenommen, um niedrigere Rohemissionen und eine große Bandbreite an Variationsmöglichkeiten realisieren zu können. Dafür wird eine zweistufige Turboaufladung mit elektrischer Klappensteuerung eingesetzt. Damit werden die maximal möglichen Ladedrücke und AGR-Raten angehoben. Ein vergrößerter, wassergekühlter, zweistufiger AGR-Kühler erlaubt AGR-Temperaturen nahe der Umgebungstemperatur. Auf Grund der großen Auswirkung der AGR-Rate auf die Stickoxidemissionen ist dieser Einfluss von besonderem Interesse. Neben Kondensationseffekten in der AGR-Strecke wird auch die Verteilung des rückgeführten Abgases vermessen, sowie die daraus resultierenden Emissionen. Die Verdichtung wird durch geänderte Kolben reduziert, die Injektoren für einen höheren Raildruck ausgelegt. Der maximal zulässige Raildruck wird angehoben. Eine neue Motorsteuerung (ECU) erlaubt den Zugriff über die Applikationssoftware ETAS INCA und damit auch den automatisierten Betrieb über die Software AVL Cameo. Cameo unterstützt bei der Anwendung der statistischen Versuchsplanung zur Optimierung des Verbrennungsmotors.

Mit dem Einsatz der DoE-Methodik werden die Möglichkeiten für das Systemverständnis und die Motoroptimierung erweitert. Die Verstellung der Einflussgrößen, wie beispielsweise der Einspritzbeginn oder Abgasrückführrate, werden auf das absolute Ergebnis, aber auch auf die Wechselwirkung untereinander für den Anwendungsfall betrachtet. Weiterhin wird die Einbeziehung von Umgebungsbedingungen in die Modellbildung untersucht. Die Einwirkung von an diesem Prüfstand nicht beeinflussbaren Störgrößen soll dabei durch das Modell

beschrieben werden. Durch diese Erweiterung des Modells wird ein methodischer Ansatz verfolgt, um den Einfluss von veränderten Umgebungsbedingungen zu kompensieren.

Nach einer abschließenden Analyse werden Handlungsempfehlungen zur Emissionsminderung und dem Einsatz von OME gegeben.

Abstract

This work examines the possibilities of optimization of diesel engines for industrial applications with predominantly internal engine measures. For this purpose an engine testbench is used with a prototype of a future-oriented industrial engine. On this engine the fundamental factors influencing the combustion like a significantly increased exhaust gas recirculation rate (AGR) and lowered cooler temperatures below the dew point are studied. The target is to achieve the most stringent limits for nitrogenoxide emissions by 0.4 g/kWh. To optimize the calibration, the methodology of statistical Design of Experiments (DoE - Design of Experiments) is applied. The engine will be further investigated for use with the synthetic fuel Oxymethylether (OME). By the low-soot combustion of this oxygen-containing fuel and the potentially climate-friendly manufacturability, this combination is an interesting approach for diesel engine concepts in the future.

After preliminary investigations with the basic engine, modifications are made in order to realize lower raw emissions and a wide range of variations. A two-staged turbocharging is used in combination with an electrical flap control. Thus, the maximum possible boost pressures and EGR rates are raised. An enlarged, water-cooled, two-staged EGR-cooler allows temperatures near the ambient temperature. Due to the large impact of the EGR-rate to the nitrogenoxide emissions, this influence is of special interest. In addition condensation effects in the EGR route and the distribution of the recirculated exhaust gas is measured, and so the resulting emissions. The compression is reduced by exchanged pistons. The fuel injectors are adapted to the higher rail pressure. The maximum rail pressure rises by a change in design of the pressure relief valve. A new engine control unit (ECU) allows access via the application software ETAS INCA and thus also automated operation with the software AVL Cameo. Cameo supports the application of automated DoE methodology to optimize the combustion engine.

With the use of the DoE methodology the possibilities for the understanding of the system and the engine optimization is extended. The influencing factors such as the start of injection or the exhaust gas recirculation rate are calculated on the absolute impact, but also on the interaction with each other for the current combustion. Quantifying the effects of these parameters allows a better understanding of the system. Due to the large impact of the EGR rate to the nitrogen oxide emissions the influence is of special interest. In addition to condensation effects in the EGR coolers the distribution of the recirculated exhaust gas and the resulting emissions are measured. Furthermore, the inclusion of non-controllable environmental conditions such as air humidity in the modeling is investigated. With this extension of the model errors through disturbances should be compensated.

After a final analysis recommendations for action to reduce emissions and the use of OME are given.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	vi
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1. Dieselmotorische Verbrennung	3
2.1.1. Einspritzung	3
2.1.2. Ladungsbewegung	4
2.1.3. Zündung und Zündverzug	5
2.2. Emissionen der motorischen Verbrennung	6
2.2.1. Stickoxidbildung	7
2.2.2. Partikelbildung	8
2.3. Innermotorische Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung	11
2.3.1. Abgasrückführung	12
2.4. Abgasnachbehandlungssysteme	15
2.4.1. Drei-Wege- und Oxidationskatalysator	15
2.4.2. NO _x -Speicherkatalysator	16
2.4.3. Partikelfilter	17
2.4.4. SCR-Katalysator	17
2.5. Alternative Kraftstoffe für Dieselmotoren	19
2.6. Oxymethylenether	21
2.6.1. Herstellung von Oxymethylenether	22
2.6.2. Untersuchungen zu Oxymethylenether an Motoren und Fahrzeugen	24
2.7. Gesetzgebung und Zertifizierung	26
2.8. Design of Experiments – Cameo	28

2.8.1. Modellbildung und Überprüfung	31
3. Umfang und Ziel der Arbeit	33
4. Versuchsaufbau und Messtechnik	35
4.1. Prüfstand	35
4.2. Verbrennungsmotor	36
4.2.1. Grundmotor	37
4.2.2. Ausbaustufe 1 – AGR-Kühlung	39
4.2.3. Ausbaustufe 2 - Aufladung	39
4.3. Abgasnachbehandlung	40
4.4. Kühlkreisläufe	41
4.5. Mess- und Prüftechnik	42
4.5.1. Zylinderdruckindizierung	42
4.5.2. Kraftstoffverbrauchsmessung und Konditionierung	43
4.5.3. Abgasmessanlage für NO _x , CO, HC, CO ₂ , O ₂	43
4.5.4. AVL Smoke Meter 415S	44
4.5.5. Partikelzähl- und Partikelgrößenmessgerät TSI SMPS und CPC	45
4.5.6. AVL Particle Counter 489	45
4.5.7. Teilstromverdünnungssystem Nano-Tunnel	46
4.5.8. FTIR-Spektrometer AVL Sesam i60	47
4.6. Betrieb des Versuchsmotors	48
5. Methodisches Vorgehen	50
5.1. „One factor at a time“-Methode	50
5.2. Design of Experiments - Anwendung	51
5.2.1. Modellbildung unter Einbeziehung von Umgebungsbedingungen	52
5.2.2. Multikriterielle Optimierung	59
5.3. Wassermenge und Einfluss	63
6. Untersuchungen mit Dieselkraftstoff	66
6.1. OFAT (Basisuntersuchung)	66
6.2. Kühlung und Wassereinfluss	70

6.3. Ablagerungen im AGR-Kühler	72
6.4. AGR-Verteilung	75
6.5. Erreichbarkeit der Stufe 4 der EU Nonroad-Richtlinie	83
7. Untersuchungen mit Oxymethylenether	85
7.1. Partikelemissionen im Betrieb mit reinem OME 1a	87
7.2. Einfluss des Verbrennungsluftverhältnisses bei OME 1a auf die Verbrennung	93
7.3. Messung gasförmiger Anteile	94
7.4. Verbrauch	96
7.5. Verbrennung - Diesel und OME im Vergleich	100
8. Zusammenfassung und Ausblick	102
9. Literaturverzeichnis	106
Abkürzungen und Formelzeichen	117
Abbildungsverzeichnis	122
Tabellenverzeichnis	124
Formelverzeichnis	125
A. Anhang	126