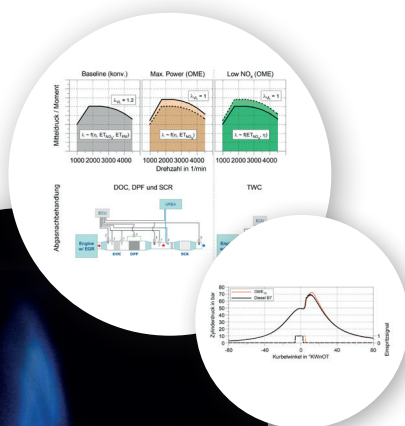


Beitrag zum optimalen Betrieb eines Verbrennungsmotors mit dem potentiell klimaneutralen Kraftstoff Oxymethylenether



Beitrag zum optimalen Betrieb eines Verbrennungsmotors mit dem potentiell klimaneutralen Kraftstoff Oxymethylenether

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

Dissertation

von

Markus Münz, M.Sc.

aus Limburg a. d. Lahn

Berichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch
Tag der Einreichung:	11.05.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	15.07.2020

Darmstadt 2020

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 15

Markus Münz

**Beitrag zum optimalen Betrieb eines
Verbrennungsmotors mit dem potentiell
klimaneutralen Kraftstoff Oxymethylenether**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7544-1

ISSN 2365-3795

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Das Wichtigste ist, dass man nicht aufhört zu fragen.

Albert Einstein



Vorwort des Autors

In der aktuellen Diskussion ist die Zukunft der Mobilität stark in den Fokus der öffentlichen Debatte geraten. Ressourceneinsatz, Klimarelevanz und Umweltschutz gewinnen dabei völlig zu Recht zunehmend an Bedeutung. An dieser Stelle bedanke ich mich ausdrücklich bei meinem Doktorvater und Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt, Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl, der mir in den letzten fünf Jahren eine Promotion in diesem spannenden und hoch aktuellen Forschungsbereich ermöglicht hat. Sein Weitblick für zukünftige Entwicklungen, die mir übertragenen Freiräume mit eigenen Motorenprüfständen und einem Versuchsfahrzeug, das Vertrauen in meine Arbeit sowie zahlreiche fachliche Diskussionen mit verschiedensten Schwerpunkten waren wichtige Voraussetzungen für die hier vorliegende wissenschaftliche Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch des Karlsruher Instituts für Technologie aufrichtig für die Übernahme des Koreferats meiner Dissertation und für sein wertvolles Interesse an meiner Arbeit.

Wissenschaftliches Arbeiten ist nicht immer einfach, hat nicht immer eine klare Vorgehensweise und ist nicht immer von Erfolg gekrönt. Umso wichtiger sind Kollegen, die zu jeder Zeit ein offenes Ohr für Diskussionen haben, Unterstützung bei Messkampagnen leisten oder Umbauarbeiten am Motorenprüfstand ohne Zögern ermöglichen. Bei diesen Kollegen möchte ich mich in aller Form, nicht zuletzt auch für das fantastische Arbeitsklima, bedanken. Insbesondere den Kollegen Alexander Mokros, Philipp Demel, Friedemar Knost, Deborah Schmidt, Johannes Hipp und Mikula Thiem sowie den ehemaligen Kollegen Alexander Feiling, Sebastian Fischer, Sebastian Martin und Hauke Maschmeyer gilt mein ausdrücklicher Dank für eine langjährige, immer offene und vertrauensvolle, aber auch sehr erfolgreiche Zusammenarbeit. Weiterhin gilt mein Dank den Werkstattmitarbeitern und dem Elektroniklabor des Instituts. In besonderer Weise danke ich an dieser Stelle Herrn Christoph Halscheidt, der jede meiner elektrotechnischen Ideen umgesetzt und durch eigene Ideen verbessert hat.

Darüber hinaus möchte ich den vielen Studierenden, die unter meiner Betreuung ihre Abschlussarbeit geschrieben oder als studentische Hilfskraft für mich gearbeitet haben, explizit danken. Jede/r Einzelne hat zur Entstehung dieser Doktorarbeit mit Überzeugung und Engagement beigetragen. Mein besonderer Dank gilt Herrn David Töpfer, der mit unermüdlichem Einsatz die Umsetzung der entwickelten Konzepte vorangetrieben und im Rahmen seiner Masterarbeit an deren Entwicklung mitgewirkt hat.

Ein Dank, der eigentlich nicht in Worte zu fassen ist, gilt meiner Familie. Ihr habt mich ohne jeglichen Zweifel immer ermutigt, mein Studium ermöglicht und mich in der Zeit meiner Promotion mit ganzer Kraft unterstützt. Ihr hattet Geduld und viel Verständnis für meine Arbeit. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

Bensheim, im Mai 2020

Markus Münz



Abstract

Sustainability, climate and environmental neutrality are three key objectives for the research and development of new technologies. Given the evident potential of the transport sector to address all of the above-mentioned targets, it is consequently used as basis for the investigations of this present thesis. Energy sources for the transport sector have a central influence on the resulting pollutant and CO₂ emissions of the entire sector. Due to the current and continuing relevance of vehicles powered by internal combustion engines in the future, the synthetically produced, potentially CO₂-neutral PtL fuel oxymethylene ether (OME) will be investigated in this thesis. The potential of traditional engine technology in combination with the presented fuel to contribute to before mentioned target values is analyzed by two different test systems taking into account various possibilities for the industrial introduction of OME in vehicle applications.

Mixtures (blends) of conventional diesel fuel and OME are analyzed in a specifically selected test vehicle. The chosen test vehicle largely corresponds to its current application standard. Overall, it can be shown on the basis of the investigations carried out that mixtures with up to 50 vol.-% OME have no disadvantages with regard to vehicle dynamics ("normal driving"). Furthermore, a significant reduction of particulate number emissions is observed with simultaneously increased nitrogen oxide emissions. This is largely attributed to the almost soot-free combustion of OME and the unadapted engine control. Regarding particle number emissions, environmental neutrality is exemplarily demonstrated in an inner-city area. In contrast, CO₂ emissions are discussed based on two different assessment approaches. Given CO₂-neutrality for OME, CO₂ emissions can be reduced accordingly depending on the content of OME within the blend.

For the use case of OME as a pure fuel - assumption: CO₂-neutral - new operating strategies are defined and substantiated on the basis of various preliminary studies. In particular, the elimination of the conflict between simultaneously low nitrogen oxide and particulate emissions due to the use of OME is considered as well as the stoichiometric engine operation. Furthermore, a new operating strategy with the aim of minimizing nitrogen oxide emissions ("Low NO_x" strategy with a three-way-catalyst as exhaust gas aftertreatment system) is developed and specified in the form of two (load) control concepts - quantity and quality control. These are ported to the functional frame of the engine control unit and subsequently tested on a single-cylinder research engine. The basic functionality of the developed operating strategy with the associated control concepts in combination with the selected exhaust gas aftertreatment system is confirmed by measurements on the engine test bed showing, among other things, minimal nitrogen oxide concentrations in the exhaust gas.



Kurzfassung

Nachhaltigkeit, Klimaneutralität und Umweltneutralität sind drei wesentliche Zielgrößen für die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien. Der Verkehrssektor besitzt nachweislich das Potential, alle genannten Zielgrößen zu adressieren und wird als Grundlage für die Untersuchungen dieser Arbeit genutzt. Die Energieträger für den Verkehrssektor haben einen zentralen Einfluss auf die resultierenden Schadstoff- und CO₂-Emissionen des gesamten Sektors. Aufgrund der derzeitigen und auch in Zukunft weiterhin hohen Relevanz von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen wird im Rahmen dieser Arbeit der synthetisch hergestellte, potentiell CO₂-neutrale PtL-Kraftstoff Oxymethylenether, kurz OME, untersucht. Mit diesem Kraftstoff werden unter Berücksichtigung verschiedener Einführungspfade die motorischen Potentiale hinsichtlich der genannten Zielgrößen und anhand von zwei Versuchsträgern erforscht.

Mischungen (Blends) aus konventionellem Dieselmotorkraftstoff und OME werden in einem speziell dafür ausgewählten Versuchsfahrzeug analysiert. Das Versuchsfahrzeug entspricht dabei weitestgehend dem Serienstand. Insgesamt kann auf Basis der durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass für Mischungen mit bis zu 50 Vol.-% OME keine Nachteile hinsichtlich der Fahrzeugdynamik („normales Fahren“) resultieren. Weiterhin wird eine signifikante Reduktion der Partikelanzahlemissionen bei gleichzeitig erhöhten Stickoxidemissionen festgestellt. Dies wird maßgeblich auf die nahezu rußfreie Verbrennung von OME und die nicht angepasste Motorsteuerung zurückgeführt. Hinsichtlich der Partikelanzahlemissionen wird Umweltneutralität im innerstädtischen Bereich exemplarisch demonstriert. Im Kontext der Treibhausgasemissionen wird die Emission von CO₂ auf Basis von unterschiedlichen Bewertungsansätzen diskutiert. Unter Voraussetzung einer CO₂-Neutralität von OME können dementsprechend CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des OME-Blendanteils reduziert werden.

Für die Nutzung von OME als Reinkraftstoff – Annahme: CO₂-neutral – werden auf Basis verschiedener Voruntersuchungen neuartige Betriebsstrategien definiert und konkretisiert. Dabei werden insbesondere der Aufbruch des Zielkonflikts zwischen gleichzeitig niedrigen Stickoxid- und Partikelemissionen mit OME sowie der stöchiometrische Motorbetrieb berücksichtigt. Darauf aufbauend wird eine neuartige Betriebsstrategie mit dem Ziel möglichst geringer Stickoxidemissionen (Strategie „Low NO_x“ mit Drei-Wege-Katalysator als Abgasnachbehandlungssystem) ausgearbeitet und in Form von zwei (Last-) Regelungskonzepten – Quantitäts- und Qualitätsregelung – konkretisiert. Diese werden in den Funktionsrahmen des Motorsteuergeräts überführt und an einem Einzylinderforschungsmotor erprobt. Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der entwickelten Betriebsstrategie mit den dazugehörigen Regelungskonzepten in Kombination mit dem ausgewählten Abgasnachbehandlungssystem wird am Motorenprüfstand unter anderem mit minimalen Stickoxidkonzentrationen im Abgas bestätigt.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	xi
Formelverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis.....	xv
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xix
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1 Grundlagen.....	9
2.1.1 Verbrennungsmotorische Kenngrößen	9
2.1.2 Kraftstoffspezifische Kenngrößen.....	14
2.1.3 Wirkungsgradkette eines Verbrennungsmotors.....	16
2.1.4 Dieselmotorische Verbrennung	18
2.1.5 Emissionsentstehung bei der dieselmotorischen Verbrennung	21
2.2 Stand der Technik.....	31
2.2.1 Konventionelle Kraftstoffe für die dieselmotorische Verbrennung.....	31
2.2.2 Zukünftige Kraftstoffe für die dieselmotorische Verbrennung	37
2.2.3 Treibhausgas- bzw. CO ₂ – Neutralität des Verkehrssektors	42
2.2.4 Ausgewählte technische Konzepte	43
3 Zielsetzung der Arbeit	46
4 Versuchsmethodik und untersuchte Kraftstoffe.....	48
4.1 Untersuchte Kraftstoffe	48
4.1.1 Überblick	48
4.1.2 Dieselmotorkraftstoff	49
4.1.3 Oxymethylenether (OME).....	50

4.1.4	Diesel-/OME-Blends	52
4.2	Einzylinderforschungsmotor (SCRE)	55
4.2.1	Abgasrückführung	59
4.2.2	Motorsteuerung.....	60
4.2.3	Gesamtsystem, Prüfumgebung und Messtechnik	67
4.2.4	Messmethodik	70
4.3	Demonstratorfahrzeug (D-FZG)	71
4.3.1	Fahrzeugbeschreibung	72
4.3.2	Umrüstung und Adaption des Demonstratorfahrzeugs	73
4.3.3	Messtechnik	74
4.3.4	Messdurchführung und Kraftstoffwechsel	76
5	Analyse von Diesel-/OME-Blends in einem Versuchsfahrzeug.....	79
5.1	Voruntersuchungen.....	79
5.2	Potentialbewertung verschiedener Diesel-/OME-Blends.....	81
5.2.1	Datenbasis.....	81
5.2.2	Dynamikbewertung und Zuverlässigkeit im realen Straßenverkehr.....	82
5.2.3	Emissionsverhalten hinsichtlich verschiedener Schadstoffe	85
5.2.4	CO ₂ – Emissionen	93
5.3	Zusammenfassende Potentialbewertung	99
6	OME als Reinkraftstoff mit neuartiger VKM-Betriebsstrategie	100
6.1	Voruntersuchungen.....	100
6.2	Entwicklung einer neuartigen Betriebsstrategie mit OME.....	106
6.2.1	Definition der Betriebsstrategie	106
6.2.2	Konkretisierung der ausgewählten Betriebsstrategie „Low NOx“	119
6.2.3	Umsetzung in neuartige (Last-) Regelungskonzepte.....	125
6.2.4	Implementierung in den bestehenden Funktionsrahmen.....	130
6.3	Ergebnisse aus Versuchen am Motorenprüfstand	140
6.3.1	Regelgüte der beiden (Last-) Regelungskonzepte.....	140
6.3.2	Exemplarischer Lastschnitt mit Betriebsstrategie „Low NOx“	142

6.3.3	Abgasreinigung mittels Drei-Wege-Katalysator	145
6.3.4	Bewertung des indizierten Wirkungsgrads	150
6.3.5	Analyse eines synthetischen Lastsprungs	153
6.4	Zusammenfassende Potentialbewertung	154
7	Zusammenfassung und Ausblick	156
	Literaturverzeichnis.....	161
	Liste der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten studentischen Arbeiten	180
	Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit	182
	Werdegang.....	185



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Treibhausgasemissionen und Anteil des Straßenverkehrs daran in Deutschland von 1990-2017 (Eigene Darstellung, Daten aus [4]).....	2
Abbildung 1.2: CO ₂ -Emissionen von neu zugelassenen Fahrzeugen (links oben), Anteil an neu zugelassenen Fahrzeugen in der Flotte (links mittig), jährliche Fahrleistung der PKW (links unten) und kumulierte Emissionen des Straßenverkehrs bzw. der PKWs (rechts). (Eigene Darstellung auf Basis von [4–9]).....	3
Abbildung 1.3: Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen der Fahrzeugflotte (gelb) und von neu zugelassenen Fahrzeugen (grün). (Eigene Darstellung auf Basis von [5–7, 9])....	4
Abbildung 1.4: Mittlere PM ₁₀ - und NO ₂ -Konzentrationen (Jahresmittelwerte) in Deutschland. (Eigene Darstellung auf Basis von [13–15]).....	6
Abbildung 1.5: Jahresmittelwerte (2019) der NO ₂ -Konzentrationen verschiedener Messstationen in Deutschland. (Eigene Darstellung auf Basis von [13, 17]).	6
Abbildung 1.6: Schwefeldioxidemissionen des Verkehrs bezogen auf das Jahr 1995 und den Verkehrsaufwand in Deutschland. (Eigene Darstellung auf Basis von [7, 26, 27]).....	8
Abbildung 2.1: Geometrische Kenndaten nach [29].	10
Abbildung 2.2: Darstellung des thermischen Wirkungsgrads η_{th} für den Gleichraumprozess in Abhängigkeit des Verdichtungsverhältnisses ε für verschiedene Isentropenexponenten κ [43].	16
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Brennstoffumsetzungsgrads η_u für verschiedene Luft-/Kraftstoffverhältnisse λ [43].	17
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Wirkungsgradkette eines Verbrennungsmotors.	17
Abbildung 2.5: Umwandlungskette - Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor [31].	18
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Luft-/Kraftstoffverhältnisses in der Umgebung eines Kraftstofftröpfchens [30].	19
Abbildung 2.7: Qualitative Darstellung des Heizverlaufs einer typischen dieselmotorischen Verbrennung [31].	20
Abbildung 2.8: Beispielhafte Darstellung der Rußbildung und -oxidation für die dieselmotorische Verbrennung [60].	24
Abbildung 2.9: Rußbildung im Dieselmotor – Elementarkohlenstoffhypothese [63].	25
Abbildung 2.10: Beispielhafte Darstellung des planaren PAK Wachstums mittels HACA-Mechanismus [65].	26
Abbildung 2.11: Beispielhafte Darstellung der Rußenstehung mittels HACA-Mechanismus aus aromatischen Kraftstoffanteilen [65].	27
Abbildung 2.12: Beispiel für die Morphologie eines Diesel-Rußpartikels [68].	27

Abbildung 2.13: Trimodale Partikelgrößen- und Partikelmasseverteilung eines exemplarischen Verbrennungsmotors [71].	29
Abbildung 2.14: Zielkonflikt zwischen gleichzeitig niedrigen Partikel- und Stickoxidemissionen (NO_x) für verschiedene verbrennungsmotorische Technologiestände, nach [75].	30
Abbildung 2.15: Übersicht der Biokraftstoffe und deren Herstellungsrouten ([77], erweitert durch [30]).	32
Abbildung 2.16: Vergleich von exemplarischen Emissionsanteilen für Dieseldieselkraftstoff und HVO [84].	34
Abbildung 2.17: Beispielhafte Darstellung des Stickoxid-/Partikelzielkonflikts für Diesel, HVO und einen Blend der beiden Kraftstoffe für einen Betriebspunkt bei $n=2000 \text{ 1/min}$ und $\text{BMEP} = 2 \text{ bar}$ [85].	35
Abbildung 2.18: Exemplarische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Stickoxid- und Partikelemissionen für Diesel und OME [131].	40
Abbildung 2.19: Geschwindigkeitsprofil (a), Stickoxid- (b) und Partikel- (c) Emissionen im WLTC für Diesel und einen Diesel-/OME-Blend mit und ohne Anpassung der Motorsteuerung [137].	42
Abbildung 2.20: Ansätze zur CO_2 -neutralen Herstellung von Kraftstoffen [141].	43
Abbildung 2.21: Abgasrückführung (EGR) und Äquivalenzverhältnis $\phi = 1\lambda$ im Konzept von Ogawa et al. [134].	44
Abbildung 2.22: Einfluss von Verbrennungsluftverhältnis (λ) und Sauerstoffkonzentration im Einlasskanal (O_2 intake manifold) auf die Stickoxidkonzentration im Abgas [142].	45
Abbildung 3.1: Denkbare Einführungspfade von OME auf Basis von Beidl et al. [143].	46
Abbildung 4.1: Siedeverlauf von Diesel B7, OME _{1b} und OME ₃₋₆ .	51
Abbildung 4.2: Cetanzahl, Dichte, kinematische Viskosität und Schmierfähigkeit für verschiedene Diesel-/OME-Blends.	53
Abbildung 4.3: Anteil an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen, Flammpunkt, Wassergehalt und Schwefelgehalt für verschiedene Diesel B0-/OME-Blends.	54
Abbildung 4.4: Heizwerte für verschiedene Diesel B7-/OME-Blends.	55
Abbildung 4.5: SCRE EVO II Zylinderkopf im CAD (links) und am Motorenprüfstand (rechts).	57
Abbildung 4.6: SCRE EVO II Klappensysteme für Auslass- (links) und Einlasskanäle (rechts).	57
Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der eingesetzten AGR-Strecke (ohne Messstellen).	59
Abbildung 4.8: Überblick Funktionsrahmen - Aufteilung in die Tasks und deren Gruppen.	61

Abbildung 4.9: Überblick Funktionsrahmen – Funktionslogik mit Momenten-Pfad, Assistenz-Pfad und zentralem Bussystem.	62
Abbildung 4.10: Motorstart und Umschaltung der Betriebsmodi. (①: Modus „0“, Stopp; ②: Modus „1“ - Motorstart; ③: Modus „3“ - Leerlaufregelung; ④: Modus „2“ - Momentenregelung).	64
Abbildung 4.11: Signalfluss „Momenten-Pfad“.	65
Abbildung 4.12: Ausgangsmodell „AGR“.	66
Abbildung 4.13: Gesamtsystem „SCRE – Motorenprüfstand“.	67
Abbildung 4.14: Gesamtübersicht des SCRE-Aufbaus einschließlich der Darstellung einiger Messstellen.	68
Abbildung 4.15: Neuzulassungen nach Fahrzeugsegment von 2013 bis 2019. (Daten aus [9]).	71
Abbildung 4.16: Neuzulassungen (2016) nach Fahrzeugsegment für Hersteller A in Deutschland (Daten aus [147]).	72
Abbildung 4.17: Demonstratorfahrzeug mit Abgasmesstechnik.	72
Abbildung 4.18: Motorraum des Versuchsfahrzeugs mit Zusatzsteuergerät sowie entsprechender Verkabelung.	74
Abbildung 4.19: Übersicht der Messtechnik im Versuchsfahrzeug.	75
Abbildung 4.20: RDE-Strecke in Kartendarstellung (links) mit Höhenprofil und exemplarischem Geschwindigkeitsverlauf (rechts).	77
Abbildung 5.1: RDE-Fahrten mit Diesel B7 (schwarz) und OME ₃₋₆ (orange).	80
Abbildung 5.2: Dynamikbewertung – Relative Häufigkeitsverteilung von RPA und $v_{a_{pos}}$	83
Abbildung 5.3: Dynamikbewertung – RPA und $v_{a_{pos}}$ (95 % Perzentil) für Diesel B7 und Diesel O50, Mittelwerte und Standardabweichungen.	84
Abbildung 5.4: Dynamikbewertung – Exemplarische Beschleunigung.	84
Abbildung 5.5: Normierte Partikelanzahlemissionen für alle (RDE-) Messungen der drei Messkampagnen.	86
Abbildung 5.6: Normierte Stickoxidemissionen für alle (RDE-) Messungen der drei Messkampagnen.	87
Abbildung 5.7: Abhängigkeit der Partikelanzahlemission von der Partikelfilterbeladung in Messkampagne II „Emissionen“.	89
Abbildung 5.8: Randbedingungen der bewerteten Warmstarts aus Messkampagne II.	90
Abbildung 5.9: Stickoxid- (links) und Partikelanzahlemissionen (rechts) der bewerteten Warmstarts aus Messkampagne II.	91
Abbildung 5.10: Mittlere Partikelanzahlemission im innerstädtischen Anteil der RDE-Strecke.	93
Abbildung 5.11: Theoretische Betrachtung der zu erwartenden CO ₂ -Emissionen von Diesel-/OME-Blends.	96

Abbildung 5.12: Vergleich von konventioneller und erweiterter Betrachtung der gemessenen CO ₂ -Emissionen für Theorie und Messungen mit Diesel-/OME-Blends.	97
Abbildung 6.1: Vergleich der Zylinderdruckverläufe und Einspritzsignale für Diesel B7 (schwarz) und OME _{1b} (orange) in BP V1.	100
Abbildung 6.2: Vergleich der Heizverläufe (links) und der Heizfunktionen (rechts) für Diesel B7 (schwarz) und OME _{1b} (orange) in BP V1.	101
Abbildung 6.3: Variation des Verbrennungsschwerpunkts MFB ₅₀ in Betriebspunkt BP V1 – Indizierter Mitteldruck, Abgastemperatur, Spitzendruck, Stickoxidemissionen und Partikelanzahlemissionen.	104
Abbildung 6.4: Zusammenhang zwischen Stickoxid- (NO _x) und Partikelanzahlemissionen (PN) für Diesel B7 und OME _{1b} in verschiedenen Betriebspunkten am SCRE EVO I.	105
Abbildung 6.5: Betriebspunktübersicht für die exemplarische Bewertung des stöchiometrischen Motorbetriebs mit OME _{1b} .	108
Abbildung 6.6: Emissionsbetrachtung „stöchiometrischer Motorbetrieb“ – Rohemissionen Kohlenwasserstoff- (HC-), Kohlenstoffmonoxid- (CO-) und Stickoxid (NO _x -) Emissionen sowie Korrelation zwischen λ_{Sonde} und $\lambda_{Brettschneider}$.	109
Abbildung 6.7: Emissionsbetrachtung „stöchiometrischer Motorbetrieb“ – Rohkonzentrationen gesamte Kohlenwasserstoffe (HC_{tot}), Methan ($HCCH_4$) sowie Kohlenwasserstoffe ohne Methan ($HCNM$, nicht-Methan).	110
Abbildung 6.8: Emissionsbetrachtung „stöchiometrischer Motorbetrieb“ – Rohkonzentrationen unverbrannter Kraftstoff (OME1) und Formaldehyd (CH_2O).	112
Abbildung 6.9: Spitzendruck ($p_{Zyl,max}$), maximaler Druckgradient (R_{max}), Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks (σ_{IMEP}) und Verbrennungsschwerpunkt (MFB ₅₀).	113
Abbildung 6.10: Brenndauer und Abgastemperatur (T_3).	114
Abbildung 6.11: Zylinderdruckverlauf, Einspritztiming, Heizverlauf und Heizfunktion für die Betriebspunkte ①, ② und ③.	115
Abbildung 6.12: Mögliche Betriebsstrategien eines Verbrennungsmotors mit OME und dazugehörige Abgasnachbehandlungssysteme.	117
Abbildung 6.13: Funktionsprinzip der „thermodynamischen Drosselklappe“.	121
Abbildung 6.14: Initiale Validierung der „thermodynamischen Drosselklappe“ an zwei Betriebspunktreihen (IMEP-3 und IMEP-5 aus Tabelle 6.7).	122
Abbildung 6.15: Methodik zur Definition des Betriebspunktparameters „ λ “ für die Betriebsstrategie „Low NO _x “.	123
Abbildung 6.16: Beispielhafte Betriebspunkte (Mitteldruck, Verbrennungsluftverhältnis und Stickoxidrohmissionen) für die Betriebsstrategie „Low NO _x “.	124
Abbildung 6.17: Grundprinzip der Qualitätsregelung im Kontext der Betriebsstrategie „Low NO _x “.	127

Abbildung 6.18: Grundprinzip der Quantitätsregelung im Kontext der Betriebsstrategie „Low NOx“.	129
Abbildung 6.19: Integration der Qualitätsregelung in den bestehenden Funktionsrahmen.	130
Abbildung 6.20: Qualitätsregelung – λ -Vorsteuerung. (Eingangsparameter: 1: Luftmasse, 2: Kraftstoffmasse, 3: Stöchiometrischer Luftbedarf, 4: Sollwert Verbrennungsluftverhältnis (aus Betriebsstrategie), 5: Temperatur vor AGR-Gebläse, 6: Druck vor AGR-Gebläse, 7: Druck nach AGR-Gebläse)	132
Abbildung 6.21: Qualitätsregelung – λ -Regelung. (Eingangsparameter: 1: Sollwert Verbrennungsluftverhältnis, 2: Istwert Verbrennungsluftverhältnis, 3: Aktivierungsbit AGR-Regelung)	133
Abbildung 6.22: Qualitätsregelung – Sollwertvorgabe AGR. (Eingangsparameter: 1: Sollwert AGR-Gebläsedrehzahl aus Vorsteuerung, 2: Sollwert AGR-Gebläsedrehzahl aus Regelung)	134
Abbildung 6.23: Qualitätsregelung – Zuordnung einer Kraftstoffmasse. (Eingangsparameter: 1: Sollwert indiziertes Motormoment, 2: Aktuelle Motordrehzahl, 3: Sollwert Kraftstoffmasse aus dynamischer Regelung (siehe Abbildung 6.21))	135
Abbildung 6.24: Integration der Quantitätsregelung in den bestehenden Funktionsrahmen.	136
Abbildung 6.25: Quantitätsregelung – λ -Vorsteuerung und Sollwertvorgabe Kraftstoffmasse. (Eingangsgrößen: 1: Luftmasse, 2: stöchiometrischer Luftbedarf, 3: Sollwert Verbrennungsluftverhältnis, 4: λ -Korrekturfaktor aus λ -Regelung)	137
Abbildung 6.26: Quantitätsregelung – Betriebsstrategie und Vorsteuerung AGR-Rate. (Eingangsgrößen: 1: Motordrehzahl, 2: Sollwert indiziertes Motormoment, 3: Luftmasse)	138
Abbildung 6.27: Vergleich Qualitäts- und Quantitätsregelung – Gemessenes (λ_{Sonde}) und vorgegebenes (λ_{soll}) Verbrennungsluftverhältnis sowie dessen Fehler (λ_{Fehler}).	140
Abbildung 6.28: Vergleich Qualitäts- und Quantitätsregelung – Standardabweichung des Verbrennungsluftverhältnisses ($\sigma\lambda$).	141
Abbildung 6.29: Exemplarische Ausführung der Betriebsstrategie „Low NOx“ an den Lastschnitten BPs LS1 (links) und BPs LS2 (rechts)	143
Abbildung 6.30: Maximaler Spitzendruck ($p_{Zyl,max}$), maximaler Druckgradient (R_{max}), Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks ($\sigma IMEP$) und Verbrennungsschwerpunkt (MFB_{50}) für den Lastschnitt BPs LS1.	144
Abbildung 6.31: Abgastemperatur (T_3), Emissionen – Partikelanzahl (PN), Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannter Kraftstoff ($OME1$) und Methan (CH_4) für den Lastschnitt BPs LS1.	145

Abbildung 6.32: Konvertierungsraten des genutzten Drei-Wege-Katalysators für Methan (CH_4), unverbrannten Kraftstoff ($OME1$), Kohlenstoffmonoxid (CO), nicht-methan Kohlenwasserstoffe ($HCNM$) und Formaldehyd (CH_2O) in Abhängigkeit von der stationär eingeschwungenen Abgastemperatur (T_3) mit $\lambda \geq 1$.	146
Abbildung 6.33: Exemplarische Darstellung der Stickoxidkonvertierung am Drei-Wege-Katalysator, resultierende Stickoxidkonzentration und -emission nach Katalysator (NO_x) sowie Partikelanzahlemissionen in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis (λ).	147
Abbildung 6.34: Partikelgrößenverteilung mit OME_{1b} und Diesel B0 für zwei Lastpunkte.	148
Abbildung 6.35: Mittlerer Partikeldurchmesser für die Betriebspunkte BPs LS1.	149
Abbildung 6.36: Partikelgrößenverteilung vor und nach Abgasnachbehandlungssystem (AGN) für OME_{1b} bei 3.5 bar indiziertem Mitteldruck (IMEP).	150
Abbildung 6.37: Indizierter Wirkungsgrad (η_i) für eine Vielzahl von Messungen mit OME_{1b} am SCRE in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis (λ).	151
Abbildung 6.38: Indizierter Wirkungsgrad (η_i) und CO-Rohemission für die BPs L1 und LS1 mit OME_{1b} am SCRE in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis (λ).	151
Abbildung 6.39: Hochrechnung des indizierten Wirkungsgrades ($\eta_i, HD, est.$) auf Basis vereinfachter Modellannahmen.	152
Abbildung 6.40: Lastsprung ohne AGR, mit Quantitäts- und mit Qualitätsregelung.	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Partikelrelevante Grenzwerte der EURO VI Norm (Schwere Nutzfahrzeuge, [72]) und der EURO 6 Norm (PKW, [73]).	29
Tabelle 2.2: Ausgewählte Kraftstoffeigenschaften nach DIN EN 590 [76].	31
Tabelle 2.3: Übersicht Kraftstoffnormen (aus [76, 80, 83]).	36
Tabelle 2.4: Literaturübersicht „Zukünftige Kraftstoffe“.	37
Tabelle 2.5: Eigenschaften von OME _n für n = 1, ..., 6 [121, 122].	39
Tabelle 4.1: Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit genutzten Kraftstoffe.	48
Tabelle 4.2: Ausgewählte Kraftstoffeigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit genutzten konventionellen Dieseldieselkraftstoffe.	49
Tabelle 4.3: Ausgewählte Kraftstoffeigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit genutzten OME.	50
Tabelle 4.4: Technische Daten Grundmotor – SCRE.	56
Tabelle 4.5: Technische Daten - SCRE (Nebenaggregate/-systeme).	58
Tabelle 4.6: Nomenklatur der Steuergrößen.	63
Tabelle 4.7: Mögliche Betriebsmodi mit dem genutzten Funktionsrahmen.	63
Tabelle 4.8: Eingesetzte Abgasmesstechnik am SCRE.	69
Tabelle 4.9: Technische Daten des Demonstratorfahrzeugs.	73
Tabelle 4.10: Exemplarische Anforderungen und Randbedingungen für RDE-Messungen.	76
Tabelle 5.1: Datenbasis Potentialbewertung Diesel-/OME-Blends (WS: Warmstart, KS: Kaltstart).	82
Tabelle 5.2: Berechnung der Masse an CO ₂ pro Liter Brennstoff.	94
Tabelle 5.3: Übersicht der CO ₂ -Emissionen.	98
Tabelle 6.1: Grundverständnis der Verbrennung von OME - Betriebspunkte BP V1 und BP V2.	102
Tabelle 6.2: Betriebspunktübersicht zur Bewertung des stöchiometrischen Motorbetriebs.	107
Tabelle 6.3: Messpunktvergleich (BP ①, ② und ③) - HC-, CO- und NO _x -Rohemissionen.	110
Tabelle 6.4: Messpunktvergleich (BP ①, ② und ③) – Kohlenwasserstoffkonzentrationen.	111
Tabelle 6.5: Unverbrannter Kraftstoff (OME ₁) und Formaldehyd (CH ₂ O).	112
Tabelle 6.6: Thermodynamische Größen für die BP ①, ② und ③.	115
Tabelle 6.7: Betriebspunktreihen zur initialen Validierung der "thermodynamischen Drosselklappe".	122
Tabelle 6.8: Übersicht der verschiedenen (Last-) Regelungskonzepte.	126
Tabelle 6.9: Betriebspunkte "Low NO _x " (exemplarisch).	142



Formelverzeichnis

Formel 2.1.....	9
Formel 2.2.....	10
Formel 2.3.....	10
Formel 2.4.....	10
Formel 2.5.....	11
Formel 2.6.....	11
Formel 2.7.....	11
Formel 2.8.....	11
Formel 2.9.....	12
Formel 2.10.....	12
Formel 2.11.....	13
Formel 2.12.....	13
Formel 2.13.....	13
Formel 2.14.....	13
Formel 2.15.....	14
Formel 2.16.....	14
Formel 2.17.....	14
Formel 2.18.....	14
Formel 2.19.....	16
Formel 2.20.....	16
Formel 2.21.....	22
Formel 4.1.....	60
Formel 5.1.....	95
Formel 5.2.....	95
Formel 5.3.....	95
Formel 5.4.....	96
Formel 6.1.....	152



Abkürzungsverzeichnis

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR / EGR	Abgasrückführung / Exhaust Gas Recirculation
BEV	Battery Electric Vehicle deutsch: Batterieelektrisches Fahrzeug
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchGV	Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes
BioKraftQuG	Biokraftstoffquotengesetz
BMEP	Break Mean Effective Pressure deutsch: effektiver Mitteldruck
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BOI	Begin of Injection deutsch: Einspritzbeginn
BP	(Motor-) Betriebspunkt
BtL	Biomass-to-Liquid
CAD	Computer Aided Design
CLD	Chemolumineszenzdetektor
CN	Cetane Number deutsch: Cetanzahl
CPC	(Kondensations-) Partikelzähler
CtL	Coal-to-Liquid
CWtL	Carbondioxide and Water to Liquid
D-FZG	Demonstratorfahrzeug
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Dieselmotorkraftstoff
DOC	Diesel Oxidation Catalyst deutsch: Diesel-Oxidations-Katalysator

DPF	Diesel-Partikel-Filter
ECU	Engine Control Unit deutsch: Motorsteuergerät
EFM	Exhaust Flow Meter
EN	Europäische Norm
ET	Engineering Target deutsch: Entwicklungsziel
FAME	Fatty acid methyl ester deutsch: Fettsäuremethylester
FFKM	Perfluorkautschuk
FID	Flammenionisationsdetektor
FKM	Fluorkautschuk
FMEP	Friction Mean Effective Pressure deutsch: Reibmitteldruck
FT	Fischer-Tropsch
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
FUP	Fuel Pressure, deutsch: Kraftstoffdruck
GtL	Gas-to-Liquid
HACA	Hydrogen-Abstraction-C ₂ H ₂ -Addition
HD	Hochdruck
HFRR	High Frequency Reciprocating Rig deutsch: Schmierfähigkeit
HVO	Hydrogenated Vegetable Oil deutsch: Hydriertes Pflanzenöl
iLUC	indirect Land Use Change deutsch: indirekte Landnutzungsänderung
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure deutsch: indizierter Mitteldruck
ISC	Idle Speed Controller deutsch: Leerlaufregler

KS	Kaltstart
KW	Kurbelwinkel
LNT / NSC	Lean NOx Trap / NOx-Speicher-Katalysator
LS	Lastschnitt
Ma.-%	Massenprozent
Max.	Maximum
MFB	Mass Fraction Burned deutsch: Verbrannter Massenanteil
MFB5	5 % Mass Fraction Burned deutsch: Brennbeginn
MFB50	50 % Mass Fraction Burned deutsch: Verbrennungsschwerpunkt
MFB95	95 % Mass Fraction Burned deutsch: Brennende
Min.	Minimum
MPST	Motorenprüfstand
MSC	Maximum Speed Controller deutsch: Drehzahlbegrenzung
NEDC	New European Driving Cycle deutsch: Neuer Europäischer Fahrzyklus
nOT	nach oberem Totpunkt
OBD	On Board Diagnose
OSC	Operation Speed Controller deutsch: Drehzahlregler
OT	Oberer Totpunkt
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PEMS	Portable Emission Measurement System deutsch: Portables Emmissionsmesssystem
PHEV	Plugin Hybrid Electric Vehicle deutsch: Plugin-Hybridfahrzeug

PKW, Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter deutsch: Partikelmasse
PMP	Particle Measurement Programme
PN	Particulate Number deutsch: Partikelanzahl
PtL	Power-to-Liquid
RDE	Real-Driving-Emission
RME	Rapsmethylester
RPA	Relative Positive Acceleration
SCR	Selective Catalytic Reduction deutsch: Selektive katalytische Reduktion
SCRE	Single Cylinder Research Engine deutsch: Einzylinderforschungsmotor
SUV	Sports Utility Vehicle
THG	Treibhausgas
TWC	Three-Way-Catalyst deutsch: Drei-Wege-Katalysator
UREA	Harnstoff
UT	Unterer Totpunkt
VKM	Verbrennungskraftmaschine bzw. Verbrennungsmotor
Vol.-%	Volumenprozent
VL	Volllast
vOT	vor oberem Totpunkt
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World-wide Harmonized Transient Cycle
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
WS	Warmstart
ZV	Zündverzug

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
C_{factor}	-	Anzahl an Kohlenstoffatomen im Kalibriergas
D	mm	Durchmesser, Bohrung
D_p	nm	elektrischer Mobilitätsdurchmesser
H_{CV}	-	Atomverh. Wasserstoff/Kohlenstoff im Kraftstoff
H_u	MJ/kg	unterer Heizwert
M	kg/mol	Molare Masse
M_d	Nm	Motormoment
M_{soll}	Nm	Vorgabewert Motormoment
O_{CV}	-	Atomverh. Sauerstoff/Kohlenstoff im Kraftstoff
P	kW	Leistung
Q	J	Wärme
R	J/kgK	spezifische Gaskonstante
T	°C	Temperatur
V	m ³	Volumen
$\dot{V}$	m ³ /h	Volumenstrom
V_c	m ³	Kompressionsvolumen
V_h	m ³	Hubvolumen
W_k	J	Arbeit am Kolben
b	g/kWh, g/kWh _i	spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	ppm, %	Konzentration
e	g/kWh, g/km	Emission
k_λ	%	Korrekturfaktor Kraftstoffmasse
L_{Sto}	kg/kg	Stöchiometrischer Luftbedarf
m	kg	Masse



Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
n	1/min	Drehzahl
p	bar	Druck
$\dot{q}$	J/°KW	momentane Wärmefreisetzung
s	mm	Hub
v	km/h	Geschwindigkeit

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	%	Fahrpedalposition
β	kg/l	Massenkonzentration
ε	-	Verdichtungsverhältnis
η	-, %	Wirkungsgrad
γ	-	molarer Anteil
κ	-	Isentropenexponent
λ	-	Verbrennungsluftverhältnis
λ_{Pl}	-	Pleuelstangenverhältnis
ν	-	Betrag der stöchiometrischen Zahl
φ	°KW	Kurbelwinkel
φ_{OME}	Vol.-%	Volumetrischer Blendanteil an OME
ϕ	-	Äquivalenzverhältnis
π_p	-	Druckverhältnis
ϱ	kg/m ³	Dichte
σ	individuell	Standardabweichung
ξ	%, M.-%	Massenanteil
ζ	kg/kg	Massenverhältnis

Indizes

Zeichenfolge	Bezeichnung
<i>B</i>	Brennstoff
<i>e</i>	effektiv
<i>eq</i>	equivalent, deutsch: äquivalent
<i>erw.</i>	erweitert
<i>est.</i>	estimated, deutsch: geschätzt
<i>g</i>	Güte
<i>i</i>	indiziert oder Aufzählungsparameter
<i>konv.</i>	konventionell
<i>L</i>	Luft
<i>m</i>	mechanisch
<i>meas.</i>	measured, deutsch: gemessen
<i>neutr</i>	neutral
<i>NM</i>	nicht Methan
<i>norm</i>	normiert
<i>pos</i>	positiv
<i>Qual.</i>	Qualitätsregelung
<i>Quan.</i>	Quantitätsregelung
<i>ref</i>	Referenz
<i>Stö.</i>	stöchiometrisch
<i>th</i>	thermisch
<i>tot</i>	total
<i>u</i>	Umsetzung
<i>Vor. bzw. pre</i>	Vorsteuerung
<i>Zyl.</i>	Zylinder

Chemische Symbole und Summenformeln

Symbol/Summenformel	Bezeichnung
<i>2-MTHF</i>	2-Methyltetrahydrofuran
<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>C₂H₂</i>	Acetylen bzw. Ethin
<i>CH₂O</i>	Formaldehyd
<i>CH₄</i>	Methan
<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>DME</i>	Dimethylether
<i>DNBE</i>	Di-n-Butylether
<i>H / H₂</i>	Wasserstoffradikal / Wasserstoff
<i>H₂O</i>	Wasser
<i>HC</i>	Kohlenwasserstoff
<i>HCN</i>	Cyanwasserstoff
<i>N / N₂</i>	Stickstoffradikal / Stickstoff
<i>N₂O</i>	Distickstoffoxid (umgangssprachlich Lachgas)
<i>NO</i>	Stickstoffmonoxid
<i>NO₂</i>	Stickstoffdioxid
<i>NO_x</i>	Stickoxide
<i>O / O₂</i>	Sauerstoffradikal / Sauerstoff
<i>OME</i>	Oxymethylenether
<i>POMDME</i>	Polyoxymethylendimethylether
<i>THC</i>	Total Hydrocarbons, deutsch: Gesamte Kohlenwasserstoffe