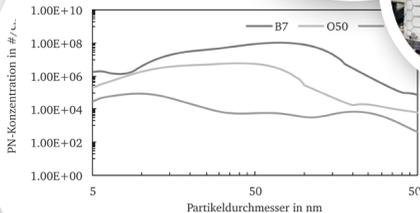
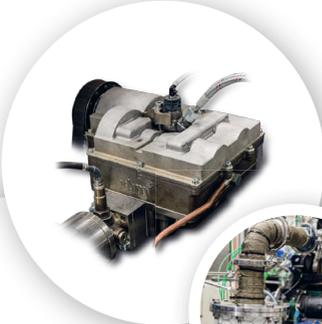


# Beitrag zur Emissionsreduktion durch Mischungen aus OME und Diesel sowie durch moderne Abgasnachbehandlung



Schriftenreihe des Instituts für  
Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe  
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 26



---

# **Beitrag zur Emissionsreduktion durch Mischungen aus OME und Diesel sowie durch moderne Abgasnachbehandlung**

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

genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

**Alexander Mokros, M.Sc.**

aus Darmstadt

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer  
Tag der Einreichung: 29.11.2022  
Tag der mündlichen Prüfung: 15.02.2023

Darmstadt 2023

D17

---



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und  
Fahrzeugantriebe

Band 26

**Alexander Mokros**

**Beitrag zur Emissionsreduktion durch Mischungen  
aus OME und Diesel sowie durch moderne  
Abgasnachbehandlung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9046-8

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

*Das Höchste, wozu der Mensch gelangen kann, ist das Erstaunen.*

Johann Wolfgang von Goethe

---



---

---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt von Januar 2017 bis November 2022.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. Christian Beidl. Diese Arbeit ist erst durch seine Unterstützung, die fachliche Betreuung und das entgegengebrachte Vertrauen ermöglicht worden. Ohne die hervorragende Infrastruktur, die vielen Ideen und Ratschläge und die konstruktiven Diskussionen wäre ein solches Forschungsvorhaben nicht möglich gewesen. Mir wurden stets unbegrenzte Freiheiten zum Auffinden kreativer Lösungen gewährt. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. André Casal Kulzer für das rege Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme der Mitberichterstattung.

Weiterhin bedanke ich mich sehr herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen. Die gegenseitige Unterstützung und die Stimmung im Team haben so manche Durststrecke erträglich gemacht. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen Philipp Demel, Friedemar Knost und Patrick Noone für die konstruktiven Gespräche, das Korrekturlesen und ein stets offenes Ohr. Ein großer Dank gebührt der mechanischen Werkstatt und dem Elektroniklabor des Instituts. Ohne den Einsatz von Marcel Nicolay und seinem Team sowie Christoph Halscheidt wäre die Durchführung meiner experimentellen Arbeiten nicht möglich gewesen.

Gleichfalls bedanke ich mich für die Unterstützung der Studierenden, die durch ihr Mitwirken im Rahmen von Abschlussarbeiten und studentischen Aushilfstätigkeiten zum erfolgreichen Gelingen des Forschungsprojektes und dieser Arbeit beigetragen haben.

Das Forschungsvorhaben C<sup>3</sup>-Mobility bildet die Grundlage meiner Arbeit. Für die finanzielle Förderung und Ermöglichung unseres Teilprojekts bedanke ich mich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Ich danke den Projektpartnern AVL und Umicore für die Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen sowie das Bereitstellen von Komponenten. Ebenso danke ich Herrn Benedikt Heuser für die Projektorganisation sowie die fachliche und persönliche Unterstützung.

Zuletzt gilt der größte Dank meiner Familie und meiner Freundin. Ohne eure bedingungslose Unterstützung wäre ich nie so weit gekommen. Vielen, lieben Dank für alles!

Alexander Mokros

Darmstadt, November 2022



---

---

## Kurzfassung

---

Eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie die kontinuierliche Senkung der Schadstoffemissionen im Verkehrssektor sind zwingend notwendig. Die Europäische Union hat kürzlich einen Entwurf für neue Schadstoffgrenzwerte unter dem Titel Euro 7/VII präsentiert, um Fahrzeugemissionen weiter zu reduzieren und die Luftqualität insbesondere in Städten zu verbessern. Aufbauend auf dem Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 wurden der *European Green Deal* (2019) und anschließend das Programm *Fit for 55* (2021) verabschiedet, um bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 55 % zu senken und bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität in der EU zu erreichen. Die Bundesregierung plant, das Ziel der Klimaneutralität bereits 2045 zu erreichen. Verbrennungsmotoren werden in Zukunft weiterhin für bestimmte Anwendungen eine hohe Relevanz haben. Synthetische Kraftstoffe, die potentiell CO<sub>2</sub>-neutral hergestellt werden, weisen chemische und physikalische Eigenschaften auf, die im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen geringere Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Mischungen, sogenannte Blends, aus Dieseldieselkraftstoff und Oxymethylenether (OME) untersucht. OME ist ein Vertreter von synthetischen, sauerstoffhaltigen Kraftstoffen, der starke Ähnlichkeit zu Dieseldieselkraftstoff aufweist. Sechs Kraftstoffe werden an einem Einzylinderforschungsmotor mit einem NO<sub>x</sub>-Speicheratalysator (NSC) und einem Katalysator zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) untersucht. Zur Durchführung der Untersuchungen wird die Motorsteuerung angepasst. Ihr Funktionsrahmen wird für die flexible Nutzung verschiedener Kraftstoffe adaptiert und um eine Funktionalität zur Dosierung von Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) erweitert. Die definierten Kraftstoffe werden in vier Betriebspunkten untersucht. Teil der Untersuchungen sind die Verbrennungsanalyse sowie die ausführliche Bewertung der Schadstoffemissionen und der Funktionsweise der eingesetzten Katalysatoren. Aus der Verbrennungsanalyse geht hervor, dass die Blends zu Dieseldieselkraftstoff qualitativ vergleichbar verbrennen. Eine niedrige Beimischung von OME zeigt in den untersuchten Punkten kleine Verbesserungen im indizierten Wirkungsgrad. Durch die Beimischung von OME und den Einsatz moderner Abgasnachbehandlungskomponenten werden Schadstoffe signifikant reduziert. In einem qualitativen Vergleich werden mit dem verwendeten Versuchsaufbau und dem definierten Messprogramm Schadstoffemissionen deutlich unterhalb der kommenden Euro VII-Grenzwerte gemessen. Die Beimischung von OME reduziert unter Einbeziehung des Herstellprozesses die CO<sub>2</sub>-Emissionen, sofern die gesamte Prozesskette auf 100% regenerativer (überschüssiger) Energie basiert. Methan- und Lachgasemissionen müssen vermieden werden, um insgesamt keine Treibhausgase zu emittieren.



---

---

## Abstract

---

A significant reduction of greenhouse gas emissions as well as the continuous reduction of pollutant emissions in the transport sector are mandatory. The European Union recently presented a draft for new pollutant limits under the title Euro 7/VII to further reduce vehicle emissions and improve air quality, especially in cities. Following from the 2015 Paris Climate Agreement, the European Green Deal (2019) and subsequently the Fit for 55 programme (2021) were adopted to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030 and achieve climate neutrality in the EU by 2050. The German government plans to reach the goal of climate neutrality as early as 2045. Internal combustion engines will continue to be highly relevant for certain applications in the future. Synthetic fuels, which are potentially produced in a CO<sub>2</sub>-neutral way, have chemical and physical properties that enable lower greenhouse gas and pollutant emissions compared to fossil fuels.

In this work, blends of diesel fuel and oxymethylene ether (OME) are investigated. OME is a representative of synthetic, oxygenated fuels that shows strong similarities to diesel fuel. Six fuels are investigated on a single-cylinder research engine with a NO<sub>x</sub> storage catalyst (NSC) and a selective catalytic reduction (SCR) catalyst. The engine control unit will be adapted to carry out the investigations. Its functional framework will be modified for the flexible use of different fuels and expanded to include a functionality for dosing urea-water solution (UWS). The defined fuels are examined at four operating points. Part of the investigations is the combustion analysis as well as the detailed evaluation of the pollutant emissions and the functioning of the catalytic converters used. The combustion analysis shows that the blends burn in a qualitatively equivalent manner compared to diesel fuel. A low admixture of OME shows small improvements in the indicated efficiency in the points investigated. The admixture of OME and the use of modern exhaust gas aftertreatment components significantly reduce pollutants. In a qualitative comparison, the pollutant emissions measured with the test setup used and the defined measurement programme are significantly below the upcoming Euro VII limits. The admixture of OME reduces CO<sub>2</sub> emissions when the manufacturing process is included, provided that the entire process chain is based on 100% regenerative (surplus) energy. Methane and nitrous oxide emissions must be avoided in order not to emit any greenhouse gases overall.



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xi
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes .....	xvii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation zur Arbeit.....	2
1.2 Konkretisierung der Problemstellung.....	4
1.3 Abgrenzung und Zielsetzung der Arbeit.....	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>7</b>
2.1 Dieselmotorische Verbrennung .....	7
2.1.1 Energiebilanz und allgemeine Verbrennung .....	7
2.1.2 Arbeitsprozess und spezifische Verbrennung .....	8
2.2 Emissionsentstehung bei Dieselmotoren .....	11
2.2.1 Partikel .....	12
2.2.2 Stickoxide .....	14
2.2.3 Kohlenmonoxid .....	15
2.2.4 Kohlenwasserstoffe .....	16
2.2.5 Weitere Schadstoffemissionen .....	17
2.3 Emissionsvermeidung bei Dieselmotoren.....	18
2.3.1 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsvermeidung.....	18
2.3.2 Abgasnachbehandlung.....	20
2.3.3 Sauerstoffhaltige Kraftstoffe .....	24
2.4 Oxymethylenether .....	26
2.4.1 Übergeordnete Anforderungen an zukünftige Kraftstoffe.....	26
2.4.2 Eigenschaften von Oxymethylenether .....	27



2.4.3	Syntheserouten von Oxymethylenether .....	28
2.4.4	Erkenntnisse zur Verbrennung von OME im Kontext der Abgasentstehung und Abgasnachbehandlung .....	30
<b>3</b>	<b>Versuchsträger, Kraftstoffe und Methodik .....</b>	<b>35</b>
3.1	Einzylinderforschungsmotor .....	35
3.1.1	Technischer Aufbau .....	35
3.1.2	Adaption der Motorsteuerung .....	39
3.2	Abgasnachbehandlungssystem .....	43
3.2.1	Technischer Aufbau .....	44
3.2.2	Funktionsentwicklung für die Abgasnachbehandlung .....	46
3.3	Untersuchte Kraftstoffe .....	47
3.4	Messtechnik .....	50
3.4.1	Abgasmesstechnik .....	50
3.4.2	Verbrennungsdiagnostik .....	51
3.4.3	Kraftstoffverbrauchsmessung und -konditionierung .....	52
3.4.4	Sonstige Messtechnik .....	52
3.5	Methodischer Ansatz .....	53
3.5.1	Versuchsdurchführung .....	53
3.5.2	Datenerfassung .....	55
3.5.3	Auswertung .....	55
<b>4</b>	<b>Auswirkungen durch die Beimischung von Oxymethylenether .....</b>	<b>57</b>
4.1	Reproduzierbarkeitsuntersuchungen am Versuchsaufbau .....	57
4.2	Analyse des Verbrennungsverhaltens von OME-Blends .....	66
4.3	Evaluierung der Wechselwirkungen am NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	71
4.3.1	Analyse der Bedingungen vor dem NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	72
4.3.2	Light-Off-Verhalten des NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysators .....	81
4.3.3	Analyse der Partikelemissionen nach dem NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	85
4.3.4	Analyse der gasförmigen Emissionen nach dem NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	

---

4.4	Evaluierung der Wechselwirkungen am SCR-Katalysator.....	93
4.4.1	Analyse der Partikelemissionen nach dem SCR-Katalysator .....	94
4.4.2	Analyse der gasförmigen Emissionen nach dem SCR-Katalysator.....	98
4.5	Bewertung des Motorstartverhaltens mit OME-Blends.....	103
<b>5</b>	<b>Qualitative Einordnung der Erkenntnisse .....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>117</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>129</b>
A	Untersuchte Kraftstoffe .....	129
B	Ergebnisse .....	131
B.1	Reproduzierbarkeitsuntersuchungen .....	131
B.2	Analyse und Bewertung der Thermodynamik .....	132
B.3	Untersuchungen am NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator.....	136
	<b>Verzeichnis der studentischen Arbeiten im Rahmen der Dissertation .....</b>	<b>141</b>
	<b>Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit .....</b>	<b>143</b>
	<b>Werdegang .....</b>	<b>147</b>
	<b>Förderung.....</b>	<b>149</b>