

FUELS JOINT  
RESEARCH GROUP



Band 19

2. Tagung der Fuels Joint Research Group  
am 1. und 2. Juni 2016 in Kloster Banz / Bad Staffelstein

# KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN

Herausgeber: Jürgen Krahl, Axel Munack, Peter Eilts, Jürgen Bünger



Cuvillier Verlag Göttingen



## Kraftstoffe für die Mobilität von morgen





**2. Tagung der Fuels Joint Research Group  
Am 01. Und 02. Juni 2016 in Bad Staffelstein**

# **KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN**

**Herausgeber: Jürgen Krahl, Axel Munack, Peter Eilts, Jürgen Bünger**



**Cuvillier Verlag Göttingen**



### **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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9245-0

eISBN 978-3-7369-8245-1



## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Klimaschutz 2050 – warum Biokraftstoffe einen Beitrag leisten müssen</b>	<b>11</b>
Dieter Bockey	
<b>Auto Fuel Studie 2030</b>	<b>15</b>
Thomas Schlick	
<b>Mobil mit Biokraftstoffen – Stand und Perspektiven</b>	<b>19</b>
Franziska Müller-Langer, Karin Naumann	
<b>The Mobility Challenge</b>	<b>21</b>
Wolfgang Warnecke	
<b>Bedeutung von alternativen Kraftstoffen für den Flugverkehr von Morgen / Alternative Fuels for Tomorrows Air Transport</b>	<b>25</b>
Ralph-Uwe Dietrich	
<b>Fuel Blend Strategies and Interaction of Fuel Components</b>	<b>33</b>
Sebastian Dörr, Kristin Götz	
<b>Diesel R33 – Praxiserfahrung und Potenzial</b>	<b>35</b>
Kristin Götz, Barbara Fey, Jürgen Büniger, Axel Munack, Olaf Schröder, Jürgen Krahl	
<b>Entwicklung von Multikomponentenblends für Dieselmotoren mit hohem regenerativen Anteil bei Verwendung von 1-Alkoholen und Tributylcitrat</b>	<b>39</b>
Kevin Schaper	
<b>Pflanzenöl als Teil eines Energiekonzepts für die Landwirtschaft</b>	<b>47</b>
Peter Pickel	
<b>Rapsöltraktoren auf dem Prüfstand</b>	<b>55</b>
Johannes Ettl, Klaus Thuneke, Peter Emberger, Edgar Remmele	
<b>Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse für eine saubere Verbrennung – Von der Forschung zur Anwendung</b>	<b>61</b>
Benedikt Heuser, S. Heitzig, A. Weinebeck, S. Pischinger, H. Murrenhoff	
<b>Die Einführung neuer Kraftstoffe unter besonderer Berücksichtigung von Nachhaltigkeit, Qualität und Infrastruktur</b>	<b>67</b>
Thomas Garbe	
<b>The Mobility Challenge</b>	<b>69</b>
Wolfgang Warnecke	



<b>CO<sub>2</sub>-reduzierte Kraftstoffe für die nachhaltige Mobilität der Zukunft</b> Gennadi Zikoridse; Claus-Gunter Kummer	<b>73</b>
<b>Chemical and toxicological characterization of (bio)fuel emission from motorized combustion</b> Karl-Werner Schramm, Jürgen Bünger, Barbara Fey, Josie Kunze, Olaf Schröder, Jürgen Blassnegger, Götz Westphal, Axel Munack, Michael Urbanek, Bernhard Geringer Jürgen Krahl	<b>77</b>
<b>The impact of increasing the blend ratio on engine emission associated toxicity</b> Miriam Gerlofs-Nijland, Wendy Vercrujisse, Paul Janssen, Ingeborg Kooter, Aleksandra Jedynska, Paul White, Jürgen Bünger, Gerrit Kadijk, Gertjan Koornneef, Flemming Cassee	<b>83</b>
<b>Sensor zur Erkennung der Kraftstoffqualität</b> Mustafa Eskiner, Michael Rossner, Jürgen Krahl	<b>85</b>
<b>Comparative study of fuel mixtures and their effect on composition of combustion products of Diesel engine</b> Mehdi Bagheri	<b>93</b>
<b>Synthesis of oxymethylene dimethyl ethers (OMEs): soot reducing diesel additives from renewable resources</b> Philipp Haltenort	<b>95</b>
<b>GKI – Gasoline Knock Index Neues Klopfestigkeitsprüfverfahren</b> Johann Hauber, Karl Huber	<b>97</b>
<b>BioFIRe – Biogenic Fuel Ignition Research Motorisches Zündwilligkeitsprüfverfahren</b> Johann Hauber, Karl Huber	<b>99</b>
<b>Untersuchungen zur Schlamm- bildung im Motoröl beim Einsatz biogener Kraftstoffe</b> Markus Knorr, Jürgen Krahl	<b>101</b>
<b>Jatrophaöl-Applikation an einem 2,2 l Common-Rail- Dieselmotor</b> Alexander Koder, Florian Zacherl, Hans-Peter Rabl, Wolfgang Mayer	<b>105</b>
<b>Mikrobiologische Kontamination biogener Brennstoffe</b> Bernd Leuchtle, Wei Xie, Thiemo Zambanini, Simon Eiden, Winfried Koch, Klaus Lucka, Martin Zimmermann, Lars M. Blank	<b>107</b>
<b>Analysis of Adsorbed Bio Gas Tank Technology</b> Conrad Schulz	<b>109</b>



Inhaltsverzeichnis	7
<b>Enhancing the Surface Area of Graphitic Carbon Nitride for Hydrogen Storage</b>	<b>111</b>
Florian Seydel, Amrit Bal, David Stalla, Andrew Gillespie, Adam Smith, Mark Sweany, Mark Lee and Peter Pfeifer	
<b>Kraft der grünen Stadt</b>	<b>113</b>
Tim Zander	
<b>Die Autoren</b>	<b>115</b>







# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

**Politische, ökonomische und technische Randbedingungen**  
Sektionsleitung: Prof. Dr. Jürgen Krahl, Hochschule Coburg





# Klimaschutz 2050 – warum Biokraftstoffe einen Beitrag leisten müssen

---

Dieter Bockey

## 1. Einführung

Im Januar 2016 berichtete die NASA-Behörde, dass der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre 400 ppm nachhaltig übersteigt. Damit hat sich dieser 2014 erstmals gemessene Wert auf diesem Konzentrationsniveau verstetigt. Die Luft wird mit Blick auf die Treibhausgasentwicklung immer dicker, demgegenüber läuft der Weltgemeinschaft die Zeit davon Klimaschutzmaßnahmen global umzusetzen, die diesen Namen auch verdienen. Seit der ersten Klimaschutzkonferenz von Rio de Janeiro im Jahr 1993 ist viel Zeit vergangen. Mit dem Abschluss der Klimakonferenz Anfang Dezember 2015 in Paris liegt ein von 175 Staaten unterzeichnetes und damit völkerrechtlich verbindliches Klimaschutzabkommen vor. Bis 2020 müssen die Unterzeichnerstaaten verbindliche nationale Aktionspläne vorlegen. Mit einem Anteil von über 30 Prozent ist der Verkehrssektor einer der maßgeblichen Verursacher. Bei einem, global gesehen, auch in Zukunft stetig steigendem Verkehrsaufkommen sehen sich sowohl die Fahrzeughersteller als auch die Mineralölwirtschaft vor enormen Herausforderungen gestellt.

Die EU-Regierungschefs hatten im Oktober 2014 die für alle Mitgliedsstaaten verbindlichen Ziele für den Zeitraum bis 2030 vorgegeben: 40 Prozent Treibhausgasminderung und 27 Prozent Anteil an erneuerbare Energien. Die Bundesregierung hat für Deutschland eine Treibhausgasminderung in Höhe von 40 Prozent mit dem Zieljahr 2020(!) beschlossen. Konsequenter geht die Bundesregierung jetzt voran im Rahmen des „Aktionsprogramms Klimaschutz 2020“ ein Maßnahmenpaket auf den Weg zu bringen, das sektorenübergreifend die Grundlage ist für den Klimaschutzplan 2050. Das erklärte Ziel ist das „Treibhausgasneutrale Deutschland“. Ab dem Jahr 2050 müssen, ausgenommen die Landwirtschaft, alle Wirtschaftssektoren auf regenerativen Kohlenstoff und erneuerbare Energien umgestellt haben.

Betont werden muss, dass sich die Experten grundsätzlich einig sind, dass die Maßnahmen etwa in 2030 greifen bzw. eingeführt sein müssen, damit dieses Ziel in 2050 erreicht wird. Politik und vor allem die Wirtschaft stehen also unter erheblichem Zeitdruck. Für den Straßenverkehr kommt herausfordernd hinzu, dass neben der THG-Minderung zugleich steigende und datierte emissionsrechtliche Anforderungen zu erfüllen sind. Vorgaben ohne effiziente und wirksame Kontrolle machen aber offensichtlich wenig Sinn, wie die VW-Affaire bestätigte. Das Image des Dieselmotors hat entsprechend gelitten-. Zugleich wurden und werden die tatsächlichen und damit klimaschutzrelevanten Verbrauchsangaben der PKW-Hersteller hinterfragt.

## 2. Biokraftstoffe sind global eingeführt

Neben der motortechnischen Optimierung zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs ist der Beitrag des Kraftstoffes selbst zur Treibhausgasminderung entscheidend für die Erreichung der Klimaschutzziele. Biokraftstoffe haben sich heute global durchgesetzt. Brasilien war und ist der Vorreiter bei der Verwendung von Biokraftstoffen und hier insbesondere von Bioethanol. In den 1970er Jahren war die Ölkrise die treibende Kraft



für die Markteinführung, in den 1990er Jahren globale Überschüsse bei den wichtigsten Agrarprodukten. Nicht die Klimaschutzdiskussion, sondern die Frage der Ressourcensicherheit, also die Abhängigkeit von Rohölimporten waren die Motivationsgründe. Nichtsdestotrotz wurde 1993 mit der Einführung der Option der Produktion von Raps auf Stilllegungsflächen zur Herstellung von Biodiesel (RME) im wahrsten Sinne des Wortes der Grundstein gelegt für eine bis heute nicht nur hierzulande oder in der EU, sondern global geführte Diskussion bzw. Abstimmung über Nachhaltigkeitsanforderungen, die nicht nur die Treibhausgasbilanz, sondern überdies auch soziale und ökonomische Kriterien umfassen.

Seit den neunziger Jahren und besonders nach der Jahrtausendwende hat die Entwicklung des Biokraftstoffsektors nicht nur in der EU, in den USA oder Brasilien, sondern praktisch alle im Agrarexport führenden Exportnationen wie Kanada, Argentinien, Malaysia, Indonesien, Thailand, Südafrika usw. erheblich an Fahrt aufgenommen. In Abhängigkeit von der Förderkulisse, wurden in Südamerika, USA oder auch in der EU inzwischen für Bioethanol und Biodiesel Marktanteile erreicht, deren weiterer Fortschritt durch die von der jeweiligen Norm des fossilen Kraftstoffs vorgegebenen maximalen Beimischungsanteils begrenzt wird. Motortechnisch gesehen sind höhere Beimischungsanteile möglich. Allerdings haben sich bisher „Flex-fuel-vehicles“ praktisch nur in Brasilien durchgesetzt, aber auch nur deshalb weil die Regierung die Fahrzeughersteller keine „Wahl“ ließ. Hierzulande erlebte die Biodiesel- und Pflanzenölkraftstoff 2007 mit insgesamt über 4 Mio. Tonnen den mengenmäßigen Höhepunkt. Über 13 Prozent des Dieselmotorkraftstoffs wurden damit im Markt ersetzt – eine „Messlatte“ an der sich andere erneuerbare Alternativen orientieren sollten und seither nicht wieder erreicht wurde. Voraussetzung war die Freigabe für die Verwendung von Biodiesel als Reinkraftstoff (B100). Dass auch unter aktuellen emissionsrechtlichen Anforderungen der Reinkraftstoffbetrieb, wenn auch unter bestimmten Wartungsbedingungen (z. B. Halbierung des Ölwechselintervalls) möglich ist, bestätigt die Freigabe des Nutzfahrzeugherstellers SCANIA für EURO 6-Motoren.

Deutschland war in der Biokraftstoffförderung mit der steuerlichen, aber schrittweise reduzierten (Ergebnis der Überkompensationsprüfung) Förderung, sicherlich eine Ausnahme. Die Steuerbegünstigung war die treibende Kraft für diese Entwicklung. Nach Auslaufen der steuerlichen Förderung 2009 und die Umstellung auf eine Beimischungsverpflichtung wurde diese Maßnahme auch in anderen Ländern außerhalb der EU schrittweise eingeführt. So zum Beispiel in Argentinien, Malaysia, Indonesien. Die Einführung einer Beimischungsverpflichtung ist auch politisch gesehen das einfachste Instrument für die Markteinführung von Biokraftstoffen voranzutreiben. Biokraftstoffe wie Bioethanol, Biodiesel, HVO oder auch neu sich in der Entwicklung befindliche „drop-in-Biokraftstoffe“ lassen sich bei vergleichsweise niedrigem Kostenaufwand in bestehende Distributionssysteme, von der Raffinerie bis zur Tankstelle integrieren. Überdies sind die Biokraftstoffe, entsprechend der Freigabe rückwärtskompatibel oder als Reinkraftstoff in geschlossenen Nutzfahrzeugflotten einsetzbar. Diese triviale Feststellung beruht auf der ebenso trivialen Feststellung, dass flüssige Biokraftstoffe, insbesondere aus Pflanzenöl, eben den großen Vorteil einer hohen Energiedichte besitzen und damit auch global gesehen als Rohstoff und Endprodukttransportwürdig sind.



### 3. Biokraftstoffe „Treiber“ der Nachhaltigkeit

Der Rohstoffbedarf für die Bioethanolproduktion aus Getreide oder Biodiesel aus Pflanzenöl macht zwar derzeit nur 3 bzw. 5 Prozent an der globalen Produktion dieser Rohstoffe aus, dennoch steht gerade die Rohstoffproduktion für die Biokraftstoffproduktion in der Kritik bzw. vor richtungsweisenden Herausforderungen, die schließlich auch die grundsätzliche Ausrichtung der Intensität sowie sozio-ökonomische Kriterien der landwirtschaftlichen Produktion betreffen. Mit der Umsetzung der Erneuerbaren Energien-Richtlinie 2009/28/EG in nationales Recht mussten gesetzlich verankerte Nachhaltigkeitskriterien eingeführt werden, die in den Checklisten von aktuell 18 von der EU-Kommission zugelassenen Zertifizierungssystemen verankert sind. Diese vom Anbau bis zur Biokraftstoffherstellung zu beachtende Anforderungen müssen nicht nur in der EU, sondern auch von Rohstoff- bzw. Biokraftstofflieferländern nachgewiesen werden, die in die EU exportieren. Betroffen sind damit global gesehen praktisch alle führenden Exportnationen. Das EU-Recht gibt damit einen Mindestrahmen für die Kontrolle, aber auch für Klimaschutz vorgaben vor. Denn Biokraftstoffe müssen, unabhängig vom Biomasserohstoff, zurzeit eine Treibhausgasminderung von mindestens 35 Prozent im Vergleich zur fossilen Referenz nachweisen und ab 2018 mindestens 50 Prozent. Für Neuanlagen gilt eine Anforderung von 60 Prozent, rückdatiert ab Oktober 2015. Diese Regelung bedeutet, dass mit Blick auf den EU-Markt die 60 Prozent THG-Minderungsvorgabe praktisch eine „Leistungsanforderung“ an die Auftragsvergabe bzw. schließlich Inbetriebnahme der Biokraftstoffanlage darstellt. Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen sind dabei nicht per se besser als markteingeführte Biokraftstoffe, denn der energetische Aufwand zur Herstellung des Biokraftstoffes ist wesentlich höher und überdies ist die Frage der THG-Bilanzierungsmethodik zu prüfen. Bisher gehen bspw. Reststoffe wie Stroh mit den THG-Bilanzwert „0“ g CO<sub>2</sub> in die Treibhausgasrechnung ein. Bei wachsenden Rohstoffströmen wird sich dies ändern, weil die Landwirtschaft diese Rohstoffe mit einer dezidierten Zweckbestimmung verkauft. Dann müssen nach Auffassung von Ökobilanzexperten die internationalen Ökobilanzregeln gelten, die bspw. eine Allokation der Aufwendungen nach dem Masseanteil, aufgeteilt auf den Korn- und Strohanteil, fordern. Besonders diese Fragen und Herausforderungen werden in der vorrangig Technologie und Forschungsförderung betonten Diskussion zur Entwicklung sog. BTL-Kraftstoffe zu wenig oder nicht beachtet. Die markteingeführte Generation Biokraftstoffe sollte angesichts des notwendigen langen Atems in der Forschung und von wenigen Ausnahmen abgesehen, praktisch nicht vorhandenen Investitionsbereitschaft, auch ein Stück weit warnendes Beispiel mit Blick auf die Verlässlichkeit der Politik sein. Die förderrechtlich geltenden Rahmenbedingungen sind zu kurz, vergleichen mit den 20 Jahren der EEG-Förderung bei Biomasse. Bemerkenswert ist, dass bei der Verstromung von Biogas der Nachweis einer positiven Treibhausgasbilanz keine Bedingung für die Förderwürdigkeit ist!

Markteingeführte Biokraftstoffe gehen also nicht nur mit Blick auf die sich noch in der Entwicklung befindlichen „fortschrittlichen“ Biokraftstoffe voran hinsichtlich der internationalen Implementierung von gesetzlich vorgegebenen Anforderungskriterien für den Marktzugang in die EU, sondern generell im Rahmen der sogenannten Bioökonomiestrategie. Auch die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe wird sich hierauf entsprechend einstellen müssen, denn das Klimaschutzziel sieht bei einer Reduzierung der Treibhausgase fossilen Ursprungs auf 95 Prozent in 2050 praktische „Dekarbonisierung“ auch der chemischen Industrie vor. Biokraftstoffe aus Raps, Getreide usw. sind demzufolge auch unter Nachhaltigkeitsaspekten die „Leitprodukte“. Die seit



April 2016 auch formal völkerrechtlich verankerten Klimaschutzziele und Vereinbarungen von Paris stehen jetzt vor der entscheidenden Phase:

Zum einen müssen die Unterzeichnerstaaten national diese Ergebnisse durch die jeweiligen Parlamente anerkennen (ratifizieren) und zum anderen bis 2020 konkrete Aktionspläne zur Treibhausgasminde rung vorlegen, die in der Umsetzung und Ergebnis überprüfbar sein müssen.

Vor diesem Hintergrund ist nicht nachvollziehbar, dass sich die EU gemäß der bestehenden Rechtsgrundlage praktisch aus der Biokraftstoffförderung verabschiedet und damit die Leitfunktion bei der Festlegung von Nachhaltigkeitsanforderungen aufgibt. Länder wie Brasilien oder Indonesien haben demgegenüber bereits angekündigt, dass Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse ein zentrales Element und Beitrag für den Ressourcen- und globalen Klimaschutz sein werden. Insbesondere Brasilien geht hier mit Hinweis auf die lange und stetig gewachsene Biokraftstoffproduktion voran und bekräftigt den Anspruch mit Biokraftstoffen im Wege einer technologieoffenen Förderung und nachhaltigen Erschließung aktueller und neuer Biomassepotenziale das Klimaschutzziel 2050 im Verkehrssektor erreichen zu wollen.

Angesichts der wiederholt auftretenden enormen strukturellen Überschüsse in der landwirtschaftlichen Produktion macht dieser strategische Ansatz auch agrarmarktpolitisch Sinn, um in Zeiten großer Ernten eine Absatzperspektive bedienen und zugleich die ökonomische Struktur im ländlichen Raum absichern zu können. Der Staatengemeinschaft steht aber wohl noch eine kritische Diskussion bevor, die hierzulande und in der EU insbesondere Umweltorganisationen politisch und Medien wirksam auf das Thema Biotopschutz und die Tank/Teller-Diskussion komprimieren. Die Chancen für eine globale Regelung im Sinne eines auch umweltpolitisch und zugleich sozioökonomisch tragfähigen „level-playing-field“ für alle Marktakteur in einem globalisierten und arbeitsteiligen Weltmarkt werden bei dem „Streitthema“ Biokraftstoffe entweder übersehen oder ignoriert. Dieser Diskussion müssen sich in der EU die Kommission und das Europäische Parlament mit Blick auf die förderpolitischen Rahmenbedingungen nach 2020 jetzt sachgerecht und mit der gebotenen Weitsicht stellen. Andernfalls ist zu befürchten, dass die Biokraftstoffproduktion im Lichte der Klimaschutzziele 2050 außerhalb der EU stattfindet und angerechnet wird.



# Auto Fuel Studie 2030

---

Thomas Schlick

## Integrierte Kraftstoff- und Fahrzeugroadmap 2030+

### Zusammenfassung

Roland Berger-Studie: Im Straßenverkehr der EU könnten sich bis 2030 „Well-to-Wheel“-Treibhausgasemissionen um 22 Prozent reduzieren lassen

- Roland Berger-Experten schlagen integrierten Treibstoff- und Fahrzeug-Strategieplan vor
- Zusätzliches Einsparpotenzial bei Treibhausgasemissionen durch angepasste Richtlinien möglich: Konzentration auf Technologien mit den geringsten Kosten für die Gesellschaft und der höchsten Verbraucherakzeptanz
- Regulatorische Überlegungen für die Zeit bis 2030 sollten den Umstieg auf alternative Antriebstechnologien und Treibstoffe weiterführen
- Kosten-effiziente Dekarbonisierung durch marktbasierende Mechanismen für Verkehrskraftstoffe bis 2030 und danach

Mit den gegenwärtigen Richtlinien könnten die „Well-to-Wheel“-Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr in der Europäischen Union wesentlich reduziert werden: von heute 1.100 Megatonnen auf 862 Megatonnen in 2030, und somit die Emissionen in Richtung des Zielniveaus der Europäischen Kommission (-30 Prozent im Jahr 2030 gegenüber 2005) verringern. Eine stärkere Marktdurchdringung optimierter Verbrennungsmotoren in Fahrzeugflotten könnte den größten Beitrag zu dieser Reduktion leisten. Die Markteinführung optimierter Motoren sowie alternativer Treibstoff- und Fahrzeugtechnologien stellt eine bedeutende Herausforderung für die Öl- und Automobilindustrie dar. Zwischen 2010 und 2030 könnte dies zu Mehrkosten für Antriebssysteme von insgesamt 380 bis 390 Milliarden Euro führen. Dies sind Hauptergebnisse einer Bewertung von Treibstoff- und Fahrzeugtechnologien, die Roland Berger im Auftrag von Kraftstofflieferanten und Unternehmen der Automobilbranche<sup>1</sup> durchgeführt hat. Ziel war es, einen integrierten Treibstoff- und Fahrzeug-Strategieplan (Integrated Fuels and Vehicles Roadmap) für 2030+ auszuarbeiten und die für die Allgemeinheit kostengünstigsten Optionen zur Verringerung von Treibhausgasen herauszuarbeiten.

Die gegenwertigen regulatorischen Rahmenbedingungen in der EU zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs müssen für die Zeit nach 2020 aktualisiert werden, um Sicherheit für Investitionen in kohlenstoffarme Fahrzeuge und Treibstoffe zu schaffen. Die Roland Berger-Studie wurde erstellt, um eine sachliche Betrachtung potenzieller Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen zu entwickeln. Gleichzeitig bietet sie

---

<sup>1</sup> Folgende Unternehmen sind Teil der Fahrzeugtreibstoff-Vereinigung (Auto Fuel Coalition): BMW, Daimler, Honda, NEOT/St1, Neste, OMV, Shell, Toyota und Volkswagen.





einen umfassenden Strategieplan unter Berücksichtigung der Machbarkeit aller Treibstoff- und Fahrzeugtechnologien sowie infrastrukturbezogener Aspekte und den erforderlichen regulatorischen Rahmenbedingungen nach 2020.

### **Weiteres Potenzial zur wirtschaftlichen Reduktion von Treibhausgasen bis 2030**

Laut der Roland Berger-Studie ergibt sich zusätzliches Einsparpotenzial durch eine größere Marktdurchdringung hybridisierter Antriebssysteme (18 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030) sowie Nutzung von Treibstoffen mit einem höheren Anteil fortschrittlicher Biokraftstoffe (15 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030). Weiteres Einsparpotenzial bei Nutzfahrzeugen ergibt sich durch die verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen und höhere zulässige Gesamtgewichte sowie aerodynamisch effizientere LKWs. Noch kann das volle Treibhausgasemissionspotenzial dieser Technologien unter den bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen nicht ausgeschöpft werden. Die Kosten der Technologien können unter 100 Euro pro reduzierter Tonne CO<sub>2</sub> liegen. Der Einsatz zugunsten dieser Technologien von Fahrzeughersteller und Treibstoffproduzenten muss durch stärkere Marktsignale vonseiten der Kunden ergänzt werden.

Zur Förderung kosteneffizienter Technologien nach 2020 schlagen die Roland Berger-Experten eine Kombination aus Finanzinstrumenten, Richtlinien und einer verbesserten Informationspolitik gegenüber Kunden vor. Dies beinhaltet Steuervorteile für fortschrittliche Biokraftstoffkomponenten und die Einführung eines CO<sub>2</sub>-basierten Kfz-Steueranteils. Um die Vorteile hybrider Fahrzeuge transparent zu machen, sollten zudem zusätzliche Informationen zu Kosteneinsparungen in bestehende Fahrzeugeffizienzbeschreibungen aufgenommen werden.

### **Unterstützung des Umstiegs auf alternative Energien bis 2030 und danach**

Die Vorteile der gegenwärtigen regulatorischen Rahmenbedingungen, die zur Einführung emissionsarmer und emissionsfreier Fahrzeug- und Treibstofftechnologien führen, sollten die Grundlage für zukünftige Überlegungen bilden, denn sie stellen einen Weg dar, wie Nullemission erreicht werden kann. Trotz erwarteter Kostenoptimierungen im Bereich alternativer Technologien wie beispielsweise Elektroautos, wird deren Anteil am Umsatz bis 2030 unter den gegenwärtigen regulatorischen Rahmenbedingungen nach den Erkenntnissen der Roland Berger-Bewertung relativ gering sein. Nichtsdestotrotz glauben die Experten auch, dass nichttechnische Maßnahmen alle Fahrer zur Reduktion von Emissionen bewegen könnten.

### **Kosteneffiziente Dekarbonisierung durch stärkere Nutzung marktbasierter Mechanismen für Verkehrskraftstoffe**

Die Experten von Roland Berger haben herausgefunden, dass marktbasierende Mechanismen langfristig eine Option zur Ergänzung von CO<sub>2</sub>-Standards, erneuerbaren Treibstoffen und Infrastruktur-Richtlinien für Fahrzeuge darstellen. Sie ermöglichen die Beschaffung finanzieller Mittel zur Förderung neuer Fahrzeug- und Kraftstofftechnologien für minimale Kohlenstoffemissionen durch die Mitgliedsstaaten. Längerfristig könnten diese Mechanismen die wichtigste Treibhausgasreduktions-Richtlinie werden.



*Hier können Sie die Studie herunterladen:  
[www.rolandberger.com/pressreleases](http://www.rolandberger.com/pressreleases)*

*Das 1967 gegründete Unternehmen Roland Berger ist die einzige weltweit führende Beratungsfirma deutschen und europäischen Ursprungs. Mit 2.400 Mitarbeitern in 36 Ländern arbeiten wir erfolgreich an Projekten in allen wesentlichen internationalen Märkten. Unsere 50 Niederlassungen befinden sich an den wichtigsten globalen Wirtschaftsstandorten. Das Beratungsunternehmen ist eine unabhängige Partnerschaftsgesellschaft mit 220 Partnern als ausschließliche Inhaber.*





# Mobil mit Biokraftstoffen – Stand und Perspektiven

---

Franziska Müller-Langer, Karin Naumann

## Abstract

Decarbonizing the transport sector is one of the European Union's (EU) priorities, as GHG emissions from transport in the EU increased by 36% between 1990 and 2007 (and by another 20% by 2012), while non-transport sector emissions decreased 15% over the same period. To reach the GHG targets of the EU's White Paper on Transport, which are to achieve a 20% reduction from 2008 levels by 2030 and a 60% reduction from 1990 levels by 2050, the European Commission is taking a comprehensive view on technology-neutral solutions for decarbonizing the transport sector, as well as addressing electricity and other renewable energy sources. In order to show current status and perspectives of biofuels in concert with other alternatives an overview of the most important biofuel options and their characteristics are given.

## Zusammenfassung

Klimaschutz im Verkehr geht über die heute etablierten Anwendungsfelder hinaus. Neben anderen erneuerbaren Energieträgern stellen Biokraftstoffe einen Weg dar, die Klimagasemissionen im Verkehr zu reduzieren und gleichzeitig fossile Energieträger zu substituieren. In welchem Verkehrssektor sie welche Rolle im Kontext anderer Optionen der Energieeffizienz bzw. erneuerbarer Alternativen einnehmen, wird zunehmend durch die erreichbare Klimaschutzeffizienz bestimmt.

Zu berücksichtigen ist dabei der dynamische Prozess zur Anpassung der rahmengebenden europäischen Gesetzgebung (z. B. EU RED 2009/28/EC, FQD 2009/30/EC, AFID 2014/94/EU, derzeitiger Konsultationsprozess zu RED 2), hinsichtlich der Ziele von Erneuerbaren Energien (EE) und Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Als nationale Umsetzung der EU-Richtlinien RED und FQD bestimmt maßgeblich die THG-bezogene Quote (d. h. Mindestanteil von Biokraftstoffen zur Treibhausgasminderung) die erwartbaren Anteile und damit verbundenen realen THG-Emissionsreduktionen von Biokraftstoffen. Für die Quotenerfüllung bis zum Jahr 2020 in Deutschland ist, vor dem Hintergrund zahlreicher vorhandener Rahmen- und Randbedingungen und deren geplanter Veränderungen, verschiedene Szenarien möglich.

Für die Entwicklungen nach 2020 sind im Kontext der nicht mehr sektorengelassenen Zielvorgaben der EU (27% Erneuerbare Energien bis 2030, 40% THG-Reduktion gegenüber 1990) einerseits, teils aber verbindlichen verkehrsträgerspezifischer Vorgaben in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Emissionen (z.B. Reg. No. 443/2009 und Reg. No. 333/2014) und andere limitierte Emissionen (u.a. EURO 6, neue Messzyklen wie Real Driving Emissions) mit entsprechenden Implikationen auf die verwendeten Kraftstoffe (z.B. über sog. Super Credits im Kontext der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für Fahrzeuge) eine Reihe unterschiedlicher Ansätze denkbar.



Der Beitrag gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der konventionellen und sog. fortschrittlichen Biokraftstofftechnologien, deren technische, wirtschaftliche und umweltbezogene Einordnung sowie deren Perspektiven für die Weiterentwicklung.



# The Mobility Challenge

---

Wolfgang Warnecke

## Abstract

Increasingly stringent emissions legislations globally are forcing the faster growth of electric vehicles and alternative fuels. Fundamentally, there is a limit to the extent the Internal Combustion Engine (ICE) with today's gasoline and diesel based fuels can reduce both local and CO<sub>2</sub> emissions. The question is if and when liquid hydrocarbon fuels will be completely replaced. Alternative Drivevtrains with other fuel options (eg. electric mobility) does not as yet offer the same driving experience that wider society has come to expect, and in many cases electric vehicles are not as clean as the public's perception.

This presentation looks at what are the challenges we need to face in Mobility, but also what could be the energy (fuels) related options possible in the longer term transition.





# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

### **Kraftstoffqualitäten und Drop-In Biokraftstoffe**

Sektionsleitung: Prof. Dr.-Ing. Axel Munack, Thünen-Institut, Braunschweig





# Bedeutung von alternativen Kraftstoffen für den Flugverkehr von Morgen / Alternative Fuels for Tomorrows Air Transport

Ralph-Uwe Dietrich

## Abstract

Future air transport will grow in the coming years with a need to reduce CO<sub>2</sub> emissions. Renewable power together with a green carbon source can be converted to jet fuel using the Power-to-Liquid process. Techno economic process evaluation can discover the cost structure of the jet fuel production and enables the understanding of research needs towards cleaner air transport.

## 1. Einleitung

Die Internationale Air Transport Association (IATA) erwartet einen gemittelten jährlichen Anstieg des weltweiten Flugverkehrs zwischen 4 und 5% [1], wobei ein geringerer durchschnittlicher Anstieg in Deutschland von ca. 3.3 % prognostiziert wird [2]. Trotz laufender Effizienzsteigerungen und Optimierungen im Luftverkehr führt der wachsende Flugverkehr zu einem erhöhten Ausstoß von Treibhausgasen (THG). Die politische Zielsetzung einer langfristigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors sowie die Begrenztheit fossiler Energieträger stehen im Kontrast zur erwarteten Entwicklung im Luftverkehr. Bedingt durch diese Rahmenbedingungen hat sich die IATA auf ein CO<sub>2</sub> neutrales Wachstum ab 2020 verpflichtet und strebt eine Reduktion der vom Luftverkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emmissionen von 50% (Referenzjahr: 2010) bis zum Jahre 2050 an [3]. Die entsprechende Roadmap ist in Abbildung 1 dargestellt.

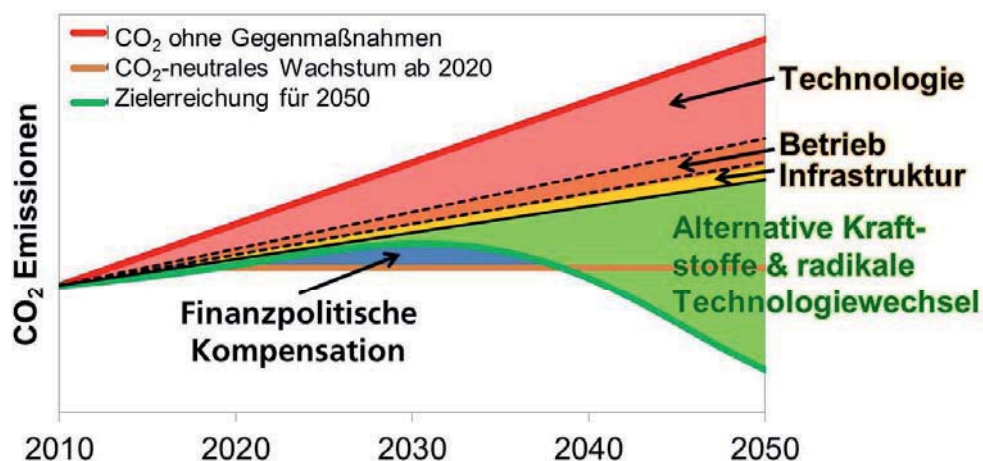


Abbildung 1: Roadmap für die angestrebten CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele der IATA [Quelle: IATA [4]]

Es wird aus Abbildung 1 ersichtlich, dass das langfristige CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel bis zum Jahre 2050 nur durch den Einsatz von alternativen Kraftstoffen und radikalen neuen



technologischen Konzepten (wie z.B. elektrisches Fliegen) erreicht werden kann. Die dadurch erwarteten Emissionseinsparungen (grüne Fläche in Abbildung 1) übertreffen im Jahre 2050 sogar die derzeitigen globalen Gesamtemissionen des Luftverkehrs. Die Einführung radikal neuer Technologien in den Luftfahrtsektor ist in naher Zukunft nicht zu erwarten [5]. Zum einen erfordern die heutigen Ansprüche an Reichweite, Geschwindigkeit und Nutzlast einen Energieträger mit hoher Energiedichte, was den Einsatz von z. B. Alkoholen und Gases (LPG, Wasserstoff) unrealistisch macht und die Bedeutung des elektrischen Fliegens für die nächsten Jahrzehnte in Frage stellt. Darüber hinaus ist eine sichere Speicherung des Kraftstoffes im Flugzeug gefordert, welche die Verwendung von verflüssigten Gasen ausschließt. Zum anderen ist die Luftfahrtindustrie durch lange Entwicklungs- und Lebenszyklen gekennzeichnet, besonders in Hinblick auf neue Flugzeugsysteme. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass Kerosin als Kraftstoff in den kommenden Jahrzehnten abgelöst wird. Daraus ergibt sich, dass alternative Kraftstoffe mit großem Treibhausminderungspotential eingesetzt werden müssen um die geforderten IATA Kohlendioxideinsparungen zu erreichen. Verschiedene alternative Kraftstoffe werden zurzeit mit Hinblick auf ihre Einsatzbarkeit im Luftverkehr untersucht, darunter hydrierte Pflanzenöle und Fette (HVO/HEFA), Farnesan, Alcohol-to-Jet und synthetisches Kerosin aus dem Fischer-Tropsch-Prozess [6] [7] [8]. Neben Fragen zur technischen Einsetzbarkeit der verschiedenen Kraftstoffe sind das technische Potential sowie die Herstellungskosten der einzelnen alternativen Kraftstoffe von besonderem Interesse. Die meisten der zurzeit im ASTM Zertifizierungsverfahren befindlichen alternativen Kraftstoffe basieren auf nachwachsende Nutzpflanzen und biologische Abfallstoffe, wodurch es fraglich ist ob ein signifikanter Anteil des fossilen Kerosins ersetzt werden kann. Nach Berechnungen des DBFZ [23] ist in Deutschland ein maximales Biokraftstoffpotential unter Berücksichtigung von heimischen Energiepflanzen und Landwirtschaftlichen Reststoffen (Stroh) von ca. 150 bis 170 PJ pro Jahr (40-45 % des Kerosinverbrauchs) realistisch. Die Kraftstoffproduktion basierend auf der existierenden Fischer-Tropsch-Technologie im sogenannten Power-to-Liquid (PtL) Verfahren [9] ermöglicht dagegen die Nutzung von Windenergie und anderen erneuerbaren Stromquellen. In wie fern die vorhandenen Energie und Kohlenstoffpotentiale in Deutschland ausreichen um den Kerosinverbrauch in Deutschland mit dem PBtL und PtL Verfahren zu decken, wurde im Rahmen einer detaillierten techno-ökonomischen Bewertung untersucht. Die mehrstufigen, verlustbehafteten Teilprozesse, die für diese Erzeugungsrouten erforderlich sind, und ihre Integration in mögliche Gesamtprozessketten wurden im Detail analysiert. Ein besonderer Fokus lag auf der Identifikation effizienter Prozessverschaltungen und der Bestimmung ihrer Investitions- und Betriebskosten.

## 2. Betrachtete Prozessrouten PtL und PBtL

Abbildung 2 stellt die betrachteten Prozessrouten zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen dar.

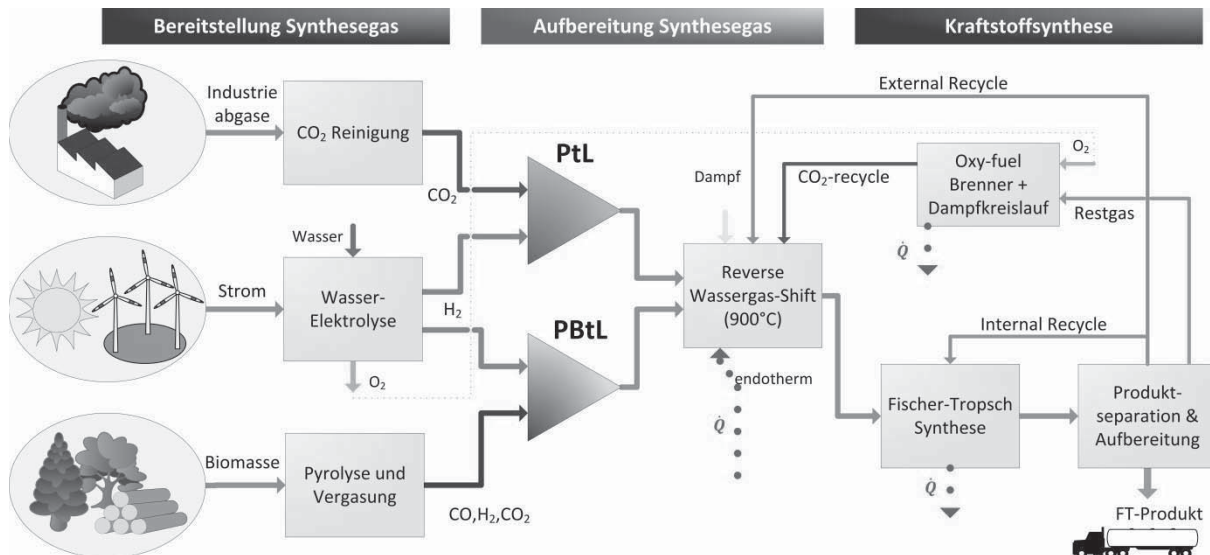
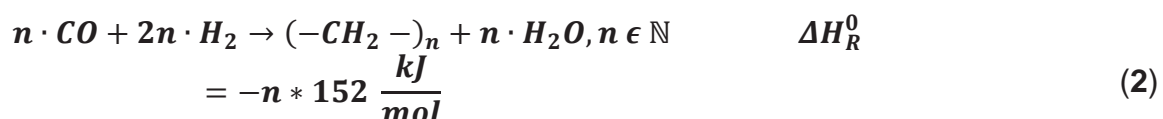


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der untersuchten Fischer-Tropsch Prozessrouten

Zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen in der FT-Synthese wird ein Synthesegas bestehend aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid benötigt. Die Erzeugung des Synthesegases hängt direkt von der betrachteten Wasserstoff- und Kohlenstoffquelle ab. Wasserstoff kann durch Elektrolyse von Wasser in großen Mengen hergestellt werden. Die bekanntesten Elektrolysesysteme sind die Alkalische Elektrolyse, die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse und die Hochtemperatur Elektrolyse (SOEC), wobei der Entwicklungsstand dieser Technologien in der aufgeführten Reihenfolge abnimmt [10]. Eine weitere interessante Wasserstoffquelle stellt die Vergasung von Biomasse da [11]. Zurzeit kann zwischen drei übergeordneten Vergaserkonzepten unterschieden werden; Festbettvergasung (Gleichstrom, Gegenstrom), Wirbelschichtvergasung (stationär, zirkulierend) und Flugstromvergasung [12] [13] [14] [15]. Das entstehende Synthesegas weist typisch einen Wasserstoffmangel auf, wodurch nachgelagerte Synthesegasaufbereitungsschritte erforderlich werden. Zur Aktivierung des  $\text{CO}_2$  wird die Eduktmischung in der reversen Wassergas-Shift (rWGS) Reaktion zum Teil in Wasser und Kohlenmonoxid umgewandelt, wie in Gleichung (1) dargestellt [16].



Da die rWGS Reaktion stark endotherm ist, werden hohe Betriebstemperaturen  $> 700 \text{ }^\circ\text{C}$  für einen zufriedenstellenden  $\text{CO}_2$  Umsatz benötigt. Die Kraftstoffsynthese basierend auf dem Fischer-Tropsch Prozess unterscheidet sich nicht zwischen den untersuchten Konzepten. Die Hauptreaktionsgleichung ist in Gleichung (2) wiedergegeben [17].





Für den Syntheseprozess wird ein  $H_2/CO$  Verhältnis im Syngas von etwas größer als zwei benötigt. Abhängig von der Reaktorbauweise, dem eingesetzten Katalysator und den eingestellten Betriebsbedingungen lassen sich verschiedene Produktspektren herstellen. Großtechnisch kommen derzeit drei Reaktordesigns zum Einsatz; Festbett-, Slurry- und Wirbelschichtreaktor [18]. Weiterhin wird zwischen Hochtemperatur und Niedrigtemperatur FT-Synthese unterschieden, wobei für die Herstellung von vornehmlich flüssigen Produkten die Niedrigtemperatur FT mit Kobalt-Katalysator vorteilhaft ist. Eine gute Näherung für die Produktverteilung kann mit der Anderson-Schulz-Flory (ASF) Verteilung wiedergegeben werden (siehe Gleichung 3).  $\alpha$  gibt dabei die Kettenwachstumswahrscheinlichkeit an [17].

$$x_n = (1 - \alpha) \cdot \alpha^{(n-1)} \quad (3)$$

Die flüssigen Produktbestandteile werden im nachfolgenden Separationsprozess aus der Gasphase abgetrennt, wobei die Wachsfraktion mit hohem Schmelzpunkt in einem Hydrocrackerprozesses in kurzkettigere Produkte aufgespalten wird. Nicht umgesetzte Edukte werden zur FT-Synthese zurückgeführt. Andere Restgase werden in einem Oxyfuel-Brenner mit dem Sauerstoff aus der Elektrolyse verbrannt um Energie für die endotherme rWGS Reaktion bereitzustellen. Jeweils eine PtL und PBtL-Prozessrouten mit einer Produktionsleistung von 11.000 t Kraftstoff pro Jahr wurden in einer detaillierten Fließbildsimulation in Aspen Plus® abgebildet und mittels Wärmeintegration analysiert und optimiert. Die reverse Wasser-Gas-Shift-Reaktion wurde durch ein Reaktormodell im thermodynamischen Gasphasengleichgewicht bei 900 °C und 25 bar beschrieben. Für die Fischer-Tropsch-Synthese wurden auf Basis eines Niedrigtemperatur Festbettreaktors mit Kobalt-Katalysator 30 Einzelreaktionen definiert. Der fraktionelle Umsatz wurde anhand einer Kettenwachstumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,85$  bestimmt. Dabei wurde angenommen, dass alle Produkte mit höherer Kettenlänge als  $C_{30}$  durch  $C_{30}H_{62}$  repräsentiert werden. Eine detaillierte Beschreibung des Simulationsmodells ist in [19] dargestellt. Die Kostenschätzung wurde mit dem in-house-Tool TEPET (Techno-Economic Process Evaluation Tool) nach der Methodik von Peters et al. [20] durchgeführt.

### 3. Ergebnisse

Tabelle 1 fasst beispielhaft die Energieströme der PBtL und PtL Anlage zusammen. Positive Energieflüsse werden per Definition vom System an die Umgebung abgegeben.



Tabelle 1: Energieströme einer 11 Mt/a Kraftstoffanlage

Energieflüsse [MW]	PBtL	PtL
Strom	-164,6	-267,1
Biomasse	-109,5	0
Dampf (4 & 25 bar)	20,7	33,7
Fernwärme	11,2	9,5
Kraftstoffausbeute	123,3	123,5
Wirkungsgrade		
Kraftstoffwirkungsgrad	<b>45 %</b>	<b>46,2 %</b>
Gesamtwirkungsgrad	<b>56,6 %</b>	<b>62,4 %</b>
Kohlenstoffumsatz	<b>97,7 %</b>	<b>99 %</b>

Kraftstoffwirkungsgrad und Kohlenstoffumsatz sind nahezu identisch in den beiden betrachteten Konzepten. Allerdings ist der Gesamtwirkungsgrad bei einer Absatzmöglichkeit für Wärme und Dampf im PtL-Verfahren deutlich höher als im PBtL-Konzept, was auf einen hohen Wärmeverlust im Biomassevergaser zurückzuführen ist.

In wie weit der deutsche Kerosinbedarf durch das PBtL/PtL-Verfahren gedeckt werden kann soll im Folgenden kurz erläutert werden. Der Kerosinverbrauch in Deutschland im Jahre 2014 betrug ca. 8,5 Mio.t, dies entspricht CO<sub>2</sub>-Emissionen von ungefähr 26,8 Mio.t/a bzw. einem Energieverbrauch von 364 PJ [21] [22]. Demgegenüber stehen enorme Potenziale für Photovoltaik und Windenergie in Deutschland von 893 PJ bzw. 2.333 PJ [24], welche sowohl im PtL als auch PBtL Verfahren genutzt werden können. Ausgehend von dem berechneten Kraftstoffwirkungsgrad um die 45 % wird deutlich, dass die Energiepotenziale der Windkraft und der Photovoltaik bei weitem ausreichen zur Deckung des Kraftstoffbedarfs. Tabelle 2 fasst die Potentiale von möglichen Kohlenstoffquellen für das PtL- und das PBtL-Konzept zusammen. Für 8,5 Mio.t Kerosin werden in einer PtL/PBtL-Anlage (Kohlenstoffwirkungsgrad ca. 97 %) 26,7 Mio.t CO<sub>2</sub> oder ca. 7,3 Mio.t Kohlenstoff benötigt.

Tabelle 2: Mögliche Kohlenstoffquellen und deren Potenziale in Deutschland

Kohlenstoffquelle	CO <sub>2</sub>	C	Anteil vom Kerosinbedarf	Quelle
Energieversorgung	358	97,6	1340 %	[25]
Industrie	169	46,1	630 %	[25]
Biomasse (Nur nichtgenutzte Restbiomasse)	-	12,9	172 %	[26]
(Luft)	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	-

Die verfügbaren Kohlenstoffpotenziale in Deutschland reichen aus, um den Bedarf des Luftverkehrs an Kerosin zu decken, ohne auf die energieintensive und kostspielige Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Luft zurückgreifen zu müssen.

Die Kraftstoffherstellungskosten als Funktion der FT-Anlagengröße zeigt Abbildung 4 für zwei verschiedene Strompreise. Der Strompreis von 105 €/MWh entspricht dem durchschnittlichen Preis für große Stromabnehmer (>70.000 MWh/Jahr) in Deutschland 2014 [27], wogegen der Preis von 32 €/MWh dem durchschnittlichen Wert der gehandelten Stromprodukte auf der European Energy Exchange (EEX) entspricht [28].

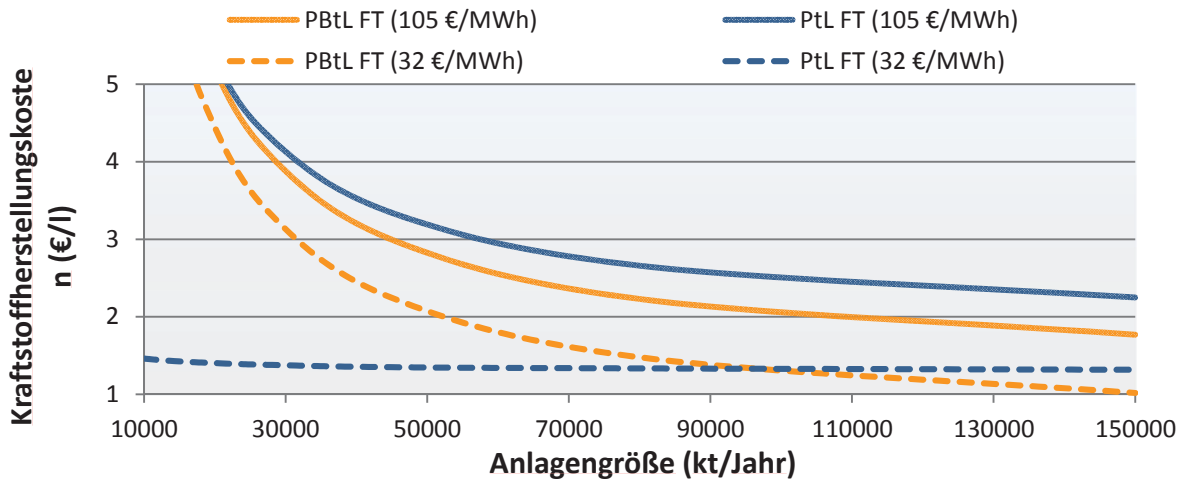


Abbildung 3: Kraftstoffherstellungskosten als Funktion der Anlagengröße

Bei niedrigem Strompreis können synthetische Kraftstoffe in Kleinanlagen am kostengünstigsten mit dem PtL-Verfahren produziert werden, wogegen die Reduktion der Investmentkosten durch den Skaleneffekt beim PBtL-Verfahren ein hohes Kostensenkungspotential für Großanlagen verspricht.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Kostenstruktur im PtL und PBtL-Konzept unter der Annahme eines Strompreises von 105 €/MWh. Der Anteil der Stromkosten an den Herstellungskosten im PtL-Verfahren liegt bei knapp 70 %, beim PBtL-Konzept bei ca. 60 %.

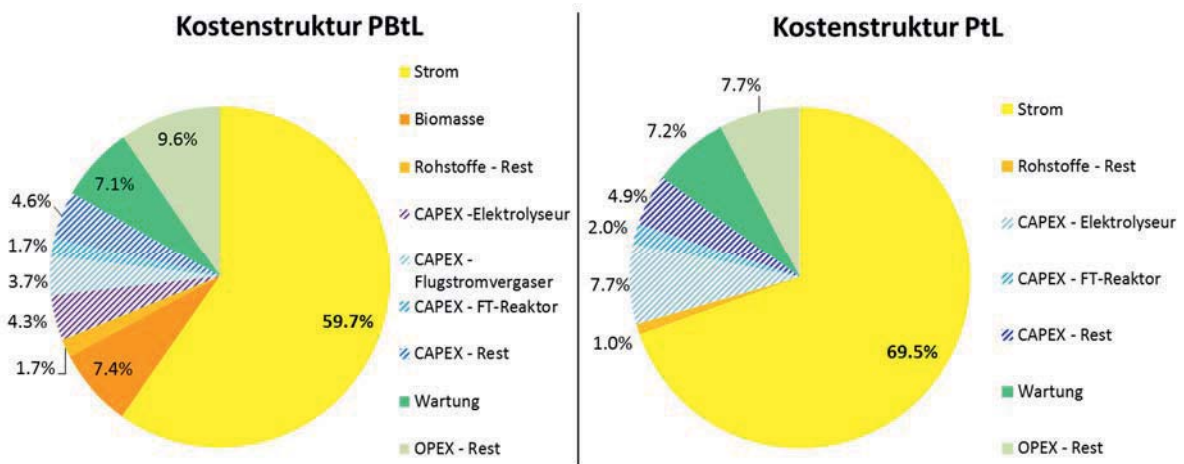


Abbildung 4: Kostenstruktur des BtL und PBtL-Verfahrens (Strompreis: 105 €/MWh)



## Literatur

- [1] International Air Transport Association (IATA), „IATA Technology Roadmap - 4th Edition,“ June 2013.
- [2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), „Luftverkehrsbericht 2014 - Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs,“ Köln, 2015.
- [3] Air Transport Action Group (ATAG), „Reducing Emissions from Aviation through Carbon-Neutral Growth from 2020,“ 2013.
- [4] International Air Transport Association (IATA), „IATA Technology Roadmap - 4th Edition,“ June 2013.
- [5] J. Hileman und R. W. Stratton, „Alternative jet fuel feasibility,“ *Transport Policy*, pp. 52-62, 34 (2014).
- [6] Deutsche Lufthansa AG, „Abschlussbericht zu dem Vorhaben Projekt BurnFAIR Arbeitspakete 1.1 bis 1.4,“ 2014.
- [7] U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, „R&D Control Study: Plan for Future Jet Fuel Distribution Quality Control and Description of Fuel Properties Catalog,“ Dulles, 2012.
- [8] Massachusetts Institute of Technology (MIT), „Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels,“ 2009.
- [9] Fuels Joint Research Group, „Kraftstoffe für die Mobilität von Morgen,“ Braunschweig, 2014.
- [10] D. H. König, M. Freiberg, R. U. Dietrich und A. Wörner, „Techno-economic study of the storage of fluctuating renewable energy in liquid hydrocarbons,“ *Fuel*, Bd. 159, pp. 289-297, (2015).
- [11] T. Smolinka et al., „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien,“ NOW GmbH, Freiburg im Breisgau, (2011).
- [12] A. van der Drift et al., „Synthesis Gas From Biomass,“ ECN, (2006).
- [13] A. Molino, S. Chianese und D. Musmarra, „Biomass gasification technology: The state of the art overview,“ *Journal of Energy Chemistry*, Nr. 25, pp. 10-25, (2016).
- [14] S. Heidenreich und P. U. Foscolo, „New concepts in biomass gasification,“ *Progress in Energy and Combustion Science*, Nr. 46, pp. 72-95, (2015).
- [15] E. G. Pereira et al., „Sustainable energy: A review of gasification technologies,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 16, pp. 4753-4762, (2012).
- [16] M. Parel, X. Zhang und A. Kumar, „Techno-economic and life cycle assesment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 53, pp. 1486-1499, (2016).
- [17] R. Unde, „Kinetics and Reaction Engineering Aspects of Syngas Production by the Heterogeneously Catalysed Reverse Water Gas Shift Reaction,“ Universität Bayreuth, Bayreuth, Dissertation, (2012).
- [18] A. d. Klerk, Fischer-Tropsch Refining, Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, (2011).
- [19] S. T. Sie und R. Krishna, „Fundamentals and selection of advanced Fischer-Tropsch reactors,“ *Applied Catalysis A: General*, Nr. 186, pp. 55-70, (1999).
- [20] D. König, N. Baucks, G. Kraaij und A. Wörner, „Entwicklung und Bewertung eines Verfahrenskonzeptes zur Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe unter der Nutzung von CO<sub>2</sub>,“ *Chemie Ingenieur Technik*, p. 1351, September (2014).
- [21] M. Peters, K. Timmerhaus und R. West, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, New York: McGraw-Hill, (2004).





- [22] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), „Mineralölstatistik für die Bundesrepublik Deutschland - Entwicklung der Inlandsablieferungen für Mineralölprodukte 2011-2014“.
- [23] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL), „Report 2015 - Energieeffizienz und Klimaschutz,“ 2015.
- [24] Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), „Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende,“ 2014.
- [25] Eurostat , „Datenbank - Luftemissionsrechnungen nach Branchen und für Haushalte (NACE Rev. 2) [env\_ac\_ainah\_r2],“ 2016.
- [26] K. Bunzel, D. Thrän, U. Seyfert, V. Zeller und M. Buchhorn, „Forstwirtschaftliche Biomassepotenziale und Reststoffpotenziale in Deutschland,“ *Informationen zur Raumentwicklung*, Bd. 5, pp. 297-308, 2011.
- [27] Eurostat, „Preise Elektrizität für Industrieabnehmer, ab 2007 - halbjährliche Daten,“ 2016. [Online]. Available: <https://open-data.europa.eu>.
- [28] European Energy Exchange (EEX), „Phelix Power Futures | EEX Power Derivatives,“ (2016). [Online]. Available: <https://www.eex.com>.



# Fuel Blend Strategies and Interaction of Fuel Components

---

Sebastian Dörr, Kristin Götz

## Abstract

Since the first journey of Berta Benz both – engines and fuels have developed significantly. Specifications ensure the proper function of the fuels in combustion – however:

Specifications are built around existing components, hard ware and experience. New hardware requirements, increasing complexity of different fuel components becomes a new challenge – even if the full blend performance meets the physical and chemical specification targets, single components might interact and lead to unexpected dysfunctions. Biofuels and new bio fuel components are important to reduce GHG emissions – but how does the chemistry interact with existing components?

Otherwise fuel blending of different and new components allows new, high performance fuels with potential for further fuel efficiency and emission improvement.

Interactions and aging can even cause sediments with significant impact to injection and combustion.

This presentation high lights few examples and recommends some key parameter to be monitored for single components and blends.

## Literatur

[1] Rmax\_Studie\_070314 Union zur Förderung von Öl und Proteinpflanzen

[2] E10, E20 and beyond... TMFB Dr Florian Kremer RWTH Aachen





# Diesel R33 – Praxiserfahrung und Potenzial

---

Kristin Götz, Barbara Fey, Jürgen Büniger, Axel Munack, Olaf Schröder,  
Jürgen Krahl

## Abstract

Das Klimaziel der Europäischen Union (EU) beläuft sich auf eine 40 %-ige Treibhausgasreduktion des 1990er Niveaus bis 2030 [1]. Derzeit ist der Transportsektor in der EU einer der größten Treibhausgasemittenten [2]. Zur Reduktion der Treibhausgase (THG) im Transportsektor könnten sogenannte drop-in Kraftstoffe dienen. Diesel R33 ist ein neuentwickelter biogenbasierender Kraftstoff, der eine nachhaltige Mobilität unter Einhaltung der Dieselmotornorm ermöglicht und eine THG-Minderung von 18,2 % gegenüber fossilem Dieselmotorkraftstoff erzielt. Diesel R33 besteht aus 7 % Altspeseölmethylester, 26 % hydriertem Pflanzenöl (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO) und 67 % hochwertig additiviertem Dieselmotorkraftstoff. Das verwendete HVO wurde aus Raps- und Palmöl hergestellt. Diesel R33 wurde in einer Flotte aus ca. 280 Fahrzeugen (Pkw, Lkw, Nutzfahrzeuge, Bussen und mobile Arbeitsmaschinen) unterschiedlicher Abgasklassen erfolgreich erprobt. Dabei wurde der Einfluss des neuen Kraftstoffes auf die Fahrzeuge und ihre Emissionen sowie auf die Motorölabnutzung untersucht. Aus der Flotte wurden fünf Pkw der Emissionsklassen Euro 3, Euro 5 und Euro 6 für die Untersuchung der limitierten sowie der nicht limitierten Abgaskomponenten ausgewählt. Neben der emissionsseitigen Betrachtung wurden selbstformulierte Diesel R33-Kraftstoffmischungen in einem thermooxidativen Laborversuch auf seine Oxidationsstabilität untersucht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle Fahrzeuge die Emissionsgrenzwerte mit CEC Referenzdieselmotorkraftstoff und auch mit Diesel R33 einhielten. Die limitierten Emissionen Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffmonoxid wurden durch Diesel R33 abgesenkt. Jedoch stiegen die Stickoxidemissionen gegenüber fossilem Dieselmotorkraftstoff leicht an, ohne den Grenzwert zu überschreiten. Für die nicht limitierten Emissionen an Carbonylen konnte ebenfalls eine Reduktion durch Diesel R33 detektiert werden. Nur beim Euro 3-Pkw wurde eine leichte Absenkung der PAK und der Mutagenität durch Diesel R33 beobachtet. Die Emissionskonzepte Euro 5 und 6 führten beide zu jeweils kaum messbaren PAK- und Mutagenitätswerten.

## 1. Einleitung

Die Europäische Union (EU) verfolgt die Reduzierung der Treibhausgase (THG) um 40 % des 1990iger Niveaus bis 2030 [1]. Der Transportsektor ist derzeit der größte THG-Emittent in der Europäischen Union [2]. Neben der EU existieren weltweit Vorschläge zur Reduktion der THG. Um diese Ziele voranzutreiben, können drop-in Biokraftstoffe einen Beitrag leisten. In der aktuellen Dieselmotorkraftstoffspezifikation (DIN EN 590), die auf den Richtlinien 98/70/EC [3] und 2009/30/EC [4] basiert, ist der Biodieselmotorkraftstoffanteil auf sieben Prozent limitiert [5]. Diese Spezifikation wurde bei der Entwicklung eines neuen biogen basierenden Kraftstoffs zu Grunde gelegt. Innerhalb der Dieselmotornorm wurde am Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg (TAC) eine Kraftstoffmischung namens Diesel R33 entwickelt. Dabei besteht



die Kraftstoffmischung aus sieben Prozent Biodiesel, 26 Prozent HVO und 67 Prozent hochwertig additiviertem Dieselkraftstoff. Dieser Kraftstoff wurde in einer Flotte aus Bussen, Lkw, Nutzfahrzeugen, mobile Arbeitsmaschinen und Pkw unterschiedlicher Abgasklassen und Hersteller erprobt. Neben der Kompatibilität des Kraftstoffes mit bereits bestehenden Fahrzeugen wurden Abgasuntersuchungen der limitierten sowie nicht limitierten Emissionen durchgeführt. Neben diesen Untersuchungen fanden ebenfalls Kraftstoffwechselwirkungsuntersuchungen im Labor des TAC statt.

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Limitierte Emissionen

Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) zeigten bei Betrieb mit Diesel R33 im Vergleich zu herkömmlichem Dieselkraftstoff einen Rückgang von durchschnittlich ca. 26 % für HC und 38 % für CO. Allerdings steigen die Stickoxide (NO<sub>x</sub>) im Mittel um ca. drei Prozent an.

Beim Euro 3-Fahrzeug stieg die Partikelmasse mit Diesel R33 an. Es könnte sich hier um einen für Saugmotoren typischen Effekt handeln, der bei Turboaufladung nicht auftritt.

Auf dem Fahrzeugprüfstand blieben die CO<sub>2</sub>-Emissionen für beide Kraftstoffe annähernd gleich.

### 2.2 Nicht limitierte Emissionen

Die Aldehyd- und Ketonemissionen wurden durch Diesel R33 je nach Fahrzeug zwischen 20 und 63 % abgesenkt.

Diesel R33 senkt die Emission polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe bei allen getesteten Fahrzeugen tendenziell leicht ab. Bei den Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen ist jedoch weder für Dieselkraftstoff noch für Diesel R33 eine nennenswerte Emission zu verzeichnen. Dieses ist analog zur Feinstaubemission der wirksamen Abgasreinigung geschuldet.

Bei den getesteten Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen wurde weder für Dieselkraftstoff noch für Diesel R33 eine mutagene Wirkung des Abgases gefunden. Beim Euro 3-Fahrzeug zeigte Diesel R33 einen positiven Einfluss auf die Mutagenität des Abgases.

### 2.3 Kraftstoff-Kraftstoff-Wechselwirkungen

Selbstformulierte Diesel R33-Kraftstoffmischungen wurden in Anlehnung an die Rancimat-Methode thermooxidativ bei 110 °C und einem Luftfluss von 300 mL/min für 80 Stunden belastet. Hierfür wurden Diesel R33-Formulierungen mit unterschiedlichen Biodieselsorten angesetzt. Einer dieser verwendeten Biodiesel beinhaltete bereits 500 ppm herstellerbedingt das Antioxidans Butylhydroxytoluol (BHT). Zusätzlich zu diesen Kraftstoffformulierungen wurden diesen außerdem das Diesel R33-Performance Additive-Paket zum Vergleich ohne diesem formuliert.

Bei thermooxidativer Belastung blieben alle Diesel R33-Formulierungen über 40 Stunden stabil. Bei 80-stündiger Belastung traten in manchen Proben Ablagerungen auf.



Bei einem Stresstest von 80 Stunden bildete Diesel R33 Ablagerungen und Oligomere, sofern entweder das Additiv Butylhydroxytoluol (BHT) oder das R33 Performance Additive eingesetzt wurde. Erstaunlicherweise bildeten sich sowohl ohne BHT und ohne R33 Performance Additive als auch mit beiden Additiven zusammen keine Ablagerungen. Das BHT war bereits in einer Konzentration von 500 ppm herstellerbedingt im Altspeseölmethylester (UCOME) enthalten und das Additivpaket wurde mit 500 ppm hinzugegeben.

Im Praxiseinsatz ergaben sich mit Diesel R33 keine Probleme. Das verwendete Additivpaket erfüllte seinen Zweck.

### **3. Zusammenfassung**

Diesel R33 beinhaltet 33 % Biokraftstoff, erfüllt die DIN EN 590 und spart 18,2 % Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff ein.

In einem Flottenversuch von rund 280 Fahrzeugen wurde die Kompatibilität von Diesel R33 getestet. Die Fahrzeuge verbrauchten ungefähr 1,9 Millionen Liter und sparten somit rund 280 Tonnen Treibhausgase ein. Während des Flottenbetriebs traten keine Störungen auf.

Innerhalb der Flotte wurden fünf Pkw der Emissionsklassen Euro 3, Euro 5 und Euro 6 für die Abgasuntersuchungen ausgewählt. Diese wurden für die Untersuchungen der limitierten sowie nicht limitierten Emissionen herangezogen.

Zusammenfassend konnten Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxide durch Diesel R33 gesenkt werden. Jedoch stiegen die Stickoxide leicht an. Bei einem Euro 3-Pkw konnte für die Partikelmasse ein Anstieg beobachtet werden. Die Partikelmasse eines Euro 5 und Euro 6-Fahrzeuges lag nahe dem Detektionslimit für Diesel R33 sowie herkömmlichen Zertifizierungsdieselmotorkraftstoff.

Die Carbonylemissionen wurden deutlich durch Diesel R33 gesenkt. Die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen zeigten ebenfalls einen Trend der Abnahme mit Diesel R33 bei einem Euro 3-Pkw. Dagegen zeigten der Euro 5- und auch der Euro 6-Pkw kaum messbare PAK-Emissionen oder mutagene Effekte für beide Kraftstoffe.

Alle Diesel R33-Kraftstoffmischungen waren in Laboruntersuchungen über 40 Stunden stabil. Nach 80-Stunden konnte bei manchen Kraftstoffmischungen Ablagerungen identifiziert werden.

Diesel R33 demonstriert das Potential der Kraftstoffforschung. Es konnte gezeigt werden, dass Kraftstoffdesign ein relevantes Werkzeug zur THG-Minderung ist und dabei den störungsfreien Fahrzeugbetrieb mit allen existierenden Motortechnologien sichert.



## Literatur

- [1] European Commission. 2030 climate & energy framework. [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_en.htm), 2016, opened: 2016-03-22.
- [2] European Commission. Reducing emission from transport. [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm), 2016, opened: 2016-03-22.
- [3] European Parliament. DIRECTIVE 98/70/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Official Journal of the European Communities, 1998, L350:58-67.
- [4] European Parliament. DIRECTIVE 2009/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Official Journal of the European Communities, 2009, L140:88-113.
- [5] DIN EN 590:2014-04. Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Dieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 590:2013 + AC:2014. Beuth Verlag GmbH: DIN German Institute for Standardization, 2014.



# Entwicklung von Multikomponentenblends für Dieselmotoren mit hohem regenerativen Anteil bei Verwendung von 1-Alkoholen und Tributylcitrat

---

Kevin Schaper

## Abstract

Plug-in hybrid vehicles show an unprecedented increase in ageing problems, especially in biodiesel blends, because of the possibly longer residence time of the fuel in the tank. Under the leadership of the Thünen Institute of Agricultural Technology a solution strategy was developed with the introduction of selected fatty alcohols and tributyl citrate as some novel fuel components in compliance with the diesel fuel standard DIN EN 590.

## 1. Präzipitatbildung und deren Verhinderung durch Alkohole

Als negativer Effekt von FAME-Kraftstoffen (Fettsäuremethylester) kann die Neigung zu einer Präzipitatbildung in Dieselmotorenblends gesehen werden. Hierbei handelt es sich um auf Autoxidation basierende Alterungsprodukte. Es ist bekannt, dass mit dem Grad der Oligomerisierung die Polarität der Alterungsprodukte weiter ansteigt. Eine Löslichkeit der Oligomere ist im polaren FAME-Reinkraftstoff gegeben; agiert der gealterte FAME-Kraftstoff aber als Beimischungskomponente mit Dieselmotorenkraftstoff, tritt die unpolare Hauptkomponente in den Vordergrund und die Oligomere fallen aus. Aufgrund längerer Standzeiten bei Kurzstreckenbetrieb wären auch Plug-In Hybrid-Fahrzeuge von dieser Problematik betroffen. Eine langfristige Lösung muss über den Einsatz von Oxidationsstabilisatoren hinausgehen. Während auf diese Weise die Oligomerbildung nur zeitlich begrenzt verhindert wird, ermöglichen alkoholische Lösungsvermittler permanent die Löslichkeit von bereits gebildeten Oligomeren im Blend. Darüber hinaus ergaben erste eigene Studien, dass Fettalkohole auch bereits die Entstehung von Oligomeren verhindern können. Neben 1-Nonanol sind 1-Hexanol (HexOH), 1-Heptanol (HeptOH) und 1-Octanol (OctOH) sowie 1-Decanol (DecOH) hinsichtlich der DIN EN 590-Kriterien gut als Kraftstoffkomponente geeignet. Der Einsatz der einwertigen verzweigten C<sub>5</sub>-Fuselalkohole wird mit Bezug auf das Flammpunktkriterium aktuell ausgeschlossen. Die Verwendung von 1-Pentanol ist aufgrund einer möglichen Dampfdruckproblematik noch Gegenstand aktueller Forschung. Mit 1-Dodecanol ist die Kältestabilität bereits stark reduziert. Da Tributylcitrat (TBC - C<sub>18</sub>H<sub>32</sub>O<sub>7</sub>) aufgrund von drei Estergruppen und einer Hydroxygruppe zur Steigerung der Polarität beitragen kann, wurde es neben der generellen Eignung als regenerative Kraftstoffkomponente auch hinsichtlich einer möglichen Lösungsvermittlereffizienz für alterungsbedingte Abbauprodukte untersucht.





## 2. Kraftstoffanalytische Besonderheiten von TBC

In Untersuchungen zum Destillationsverlauf ergab sich für das Tributylcitrat ein Wert von bis zu 390 °C. Dadurch liegt hinsichtlich der Dieselmotorkraftstoffnorm DIN EN 590 ein limitierender Faktor vor, durch den der maximale Anteil des TBC im Blend auf 5 Vol.-% sinkt. Mit einer Dichte von 1,045 g/cm<sup>3</sup> bei 15 °C und einer kinematischen Viskosität von 13,9 mm<sup>2</sup>/s bei 40 °C ergeben sich weitere Faktoren, die die maximale Zugabemenge einschränken würden. Es kann aber durch Zugabe von bereits wenigen Volumenprozenten die geringe Dichte der regenerativen Kraftstoffe HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) sowie GtL und BtL (regenerative Fischer-Tropsch-Prozessführung mit Biogas und Biomasse) kompensiert werden, sodass ihre maximale Beimischung deutlich erhöht werden kann. Die Eignung der ausgesuchten Fettalkohole ist hinsichtlich der entsprechenden Parameter unproblematisch.

## 3. Wirksamkeit ausgewählter Fettalkohole und TBC

Der Vergleich der gravimetrischen Analyse des gebildeten Bodensatzes bei Fällungs-experimenten mit künstlich gealtertem Rapsölmethylester in einem Dieselmotorkraftstoffblend mit 20 Vol.-% als Basis (RMEalt-20) verdeutlicht die hohe Lösungsvermittlereffizienz der ausgewählten 1-Alkohole gegenüber TBC (Bild 1 links). Bei Zugabe von ungealtertem Rapsölmethylester, der auch als wenig effizienter Lösungsvermittler wirkt, zeigt sich zwar, dass TBC bezogen auf das Zugabevolumen eine höhere Wirksamkeit besitzt, die hohe Effizienz der Fettalkohole, die als ideal angenommen werden kann, wird jedoch von TBC nicht erreicht. Es ergeben sich zwar bei den Alkoholen geringe Rückstandsmassen, diese sind aber auf Kraftstoffreste zurückzuführen, die bedingt durch die Methode nicht komplett entfernt werden können. Aufgrund der gleichbleibenden hohen Effizienz der eingesetzten Fettalkohole bietet es sich für eine Realisierung an, mit einem Gemisch von Alkoholen mit Beimischungen unter 5 Vol.-% zu arbeiten.

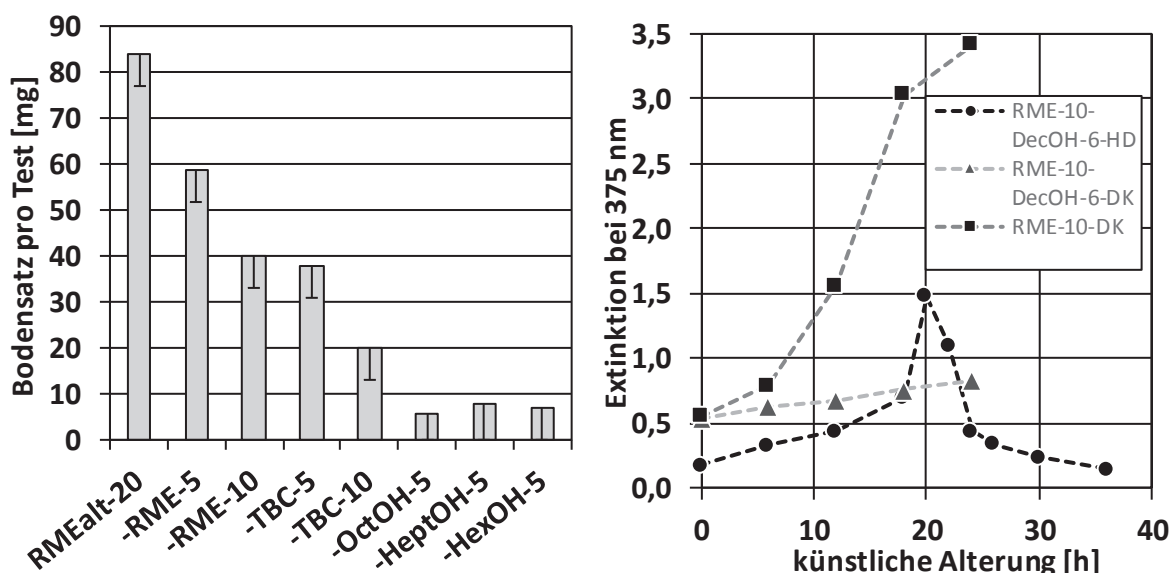


Bild 1: Lösungsvermittlereffizienz von Fettalkoholen und TBC (links); künstliche Alterung mit 1-Decanol (rechts)



Um auch den direkten Einfluss von Fettalkoholen auf die Oligomerbildung bei der künstlichen Alterung zu untersuchen, wurde ein Dieselkraftstoffblend mit 10 Vol.-% Rapsölmethylester mit und ohne Zugabe von 6 Vol.-% 1-Decanol im Luftstrom künstlich gealtert. Zur Aufklärung von Matrixeffekten wurde zusätzlich der Dieselkraftstoff durch n-Hexadecan (HD) ersetzt. Es resultierte eine kinematische Studie mit Spektroskopie im Wellenlängenbereich von 200-525 nm. Der Vergleich der beiden Messreihen mit Dieselkraftstoff ergibt bei Betrachtung der Extinktion bei einer für die Oligomerbildung charakteristischen Wellenlänge von 375 nm einen deutlichen Unterschied (Bild 1 rechts). Während mit 1-Decanol die Extinktion nur geringfügig ansteigt, resultiert ohne Alkoholanteil bereits nach kurzer Zeit ein starker Anstieg, so dass mit der einsetzenden Präzipitatbildung nach 24 Stunden die Alterung beendet wurde. Die Messreihe mit 1-Hexadecan zeigt sogar einen Rückgang der Extinktion. Eine Präzipitatbildung wurde bei beiden Ansätzen mit Alkohol nicht beobachtet.

#### **4. Multikomponentenblend REG50 - Emissionsanalytik**

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war es, einen Multikomponentenblend mit hohem regenerativem Anteil unter Berücksichtigung der Dieselkraftstoffnorm DIN EN 590 zu formulieren. Durch die Zugabe von 2 Vol.-% TBC kann der Anteil des regenerativen Kraftstoffs HVO bereits auf 38 Vol.-% erhöht werden. Zusammen mit 7 Vol.-% RME und einem Anteil von 3 Vol.-% 1-Octanol ergibt sich unter Berücksichtigung des zumindest im Experimentierstadium befindlichen regenerativen Herstellungsweges entsprechender Fettalkohole ein potenziell möglicher regenerativer Anteil von 50 Vol.-%, so dass REG50 als Akronym für diesen Kraftstoff gewählt wurde. Der Kraftstoff ist dabei in seiner Zusammensetzung variabel. HVO kann durch entsprechende Alkan-Gemische, wie sie alternativ über Fischer-Tropsch-Synthese zugänglich sind, ergänzt bzw. ersetzt werden. Rapsölmethylester wurde als heimische Komponente gewählt. Andere FAME-Kraftstoffe können aber auch verwendet werden unter Berücksichtigung möglicher Einschränkungen bedingt durch die Kälte- und Lagerstabilität. Auch der Fettalkoholanteil kann auf eine Mischung der 1-Alkohole von 1-Hexanol bis 1-Decanol verteilt werden. Weitere Blends wurden ausgewählt, um den Einfluss von 1-Octanol und TBC mit dem Bezugskraftstoff HVO-26-RME-7 als Basis getrennt an einem Nutzfahrzeugmotor des Typs OM 904 LA der Daimler AG (Atego-Einsatz) mit einem auf Vanadiumoxid basierenden SCR-Katalysator gemäß der Abgasnorm Euro IV im europäischen transienten Zyklus (ETC) untersuchen zu können (Bild 2).

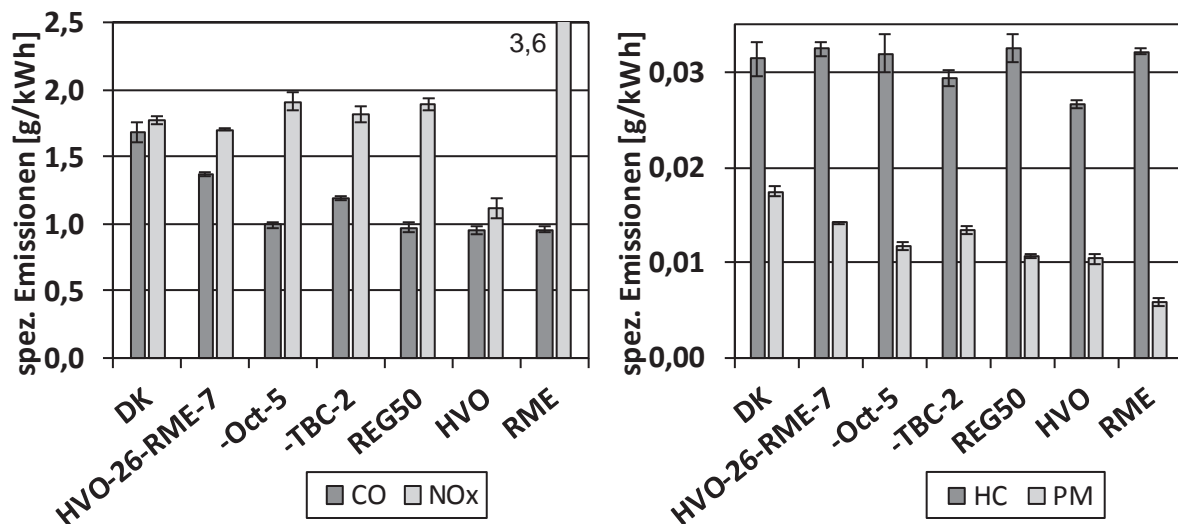


Bild 2: Limitierte Emissionen am Nutzfahrzeugmotor gemäß Euro IV-Norm

Bei Betrachtung der CO-Emissionen wird deutlich, dass Dieselmotorkraftstoff (DK) den höchsten Wert aufweist. Für den Kraftstoff HVO-26-RME-7 resultiert aufgrund der Cetanzahl-Steigerung ein verminderter Emissionswert. Sowohl durch die Beimischung von 5 Vol.-% 1-Octanol als auch mit 2 Vol.-% TBC erfolgt eine weitere Absenkung des Wertenniveaus. REG50 zeigt, vergleichbar mit HVO und RME, den niedrigsten CO-Wert. Bei Betrachtung der PM-Emissionen (Partikelmasse) ergibt sich bis auf eine weitere Absenkung des Messwerts bei RME ein vergleichbarer Trend. Es kann festgestellt werden, dass sowohl durch eine Cetanzahl-Steigerung mit HVO als auch mit 1-Octanol und TBC die CO- und PM-Emissionen gesenkt werden können. Es zeigt sich ferner bei Betrachtung der NO<sub>x</sub>-Emissionen eine aus einer Vielzahl von Untersuchungen bekannte deutlich erhöhte Emission beim Motorbetrieb mit RME [1]. Bis auf HVO, das eine signifikante Absenkung des NO<sub>x</sub>-Werts aufweist, liegen alle anderen Kraftstoffe bezüglich dieses Parameters im Bereich des Dieselmotorkraftstoffs. Die drei Kraftstoffe mit 1-Octanol und TBC weisen dabei eine leichte Erhöhung gegenüber Dieselmotorkraftstoff auf. Aufgrund der Verwendung dieses SCR-Katalysatortyps befinden sich die HC-Emissionen auf einem allgemein sehr niedrigen Werte-Niveau [2]. Alle Werte liegen mit Ausnahme des NO<sub>x</sub>-Werts für RME deutlich unterhalb des jeweils geltenden Grenzwerts gemäß Euro IV-Norm. Im Bereich der nicht gesetzlich limitierten Emissionen ergab sich für die PAK- (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) und Carbonyl-Emissionen sowie für die Partikelgrößenverteilung und Bestimmung der Mutagenität mit Ames-Test ein unbedenkliches Verhalten der Multikomponentenblends in Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Der Grenzwert für den Ammoniak schlupf gemäß Euro VI-Norm wurde eingehalten.

## 5. Zusammenfassung

Durch eine Polaritätssteigerung im Kraftstoff, bedingt durch die Beimischung ausgewählter Fettalkohole und TBC, können Alterungsprodukte des Biodiesels, wie sie auch verstärkt beim Plug-In-Hybrid aufgrund längerer Standzeiten des Kraftstoffs im Tank vorkommen können, in Lösung gehalten bzw. sogar an der Entstehung gehindert werden. Die Kraftstoffparametrierung führte zu einer Definition eines vielversprechenden Multikomponentenblends (REG50), der bei einem hohen regenerativen Anteil von bis zu



50 Vol.-% die Dieselkraftstoffnorm DIN EN 590 erfüllt und mit den enthaltenen Lösungsvermittleranteilen auch den gestiegenen Anforderungen von Plug-In Hybrid-Fahrzeugen genügt. REG50 erwies sich bezüglich der Kraftstoff- und Emissionsparameter als unproblematisch beziehungsweise durch sehr gute Teilergebnisse als besonders geeignet. Sollten gesättigte Alkane in Zukunft in Blends stärker gewichtet werden, ist der regenerative Kraftstoff TBC eine vielversprechende Beimischungskomponente, da er neben mittleren Lösungsvermittlereigenschaften für Alterungsbestandteile des Biodiesels auch als Dichtemodifikator wirken kann.

## Literatur

- [1] Lapuerta, M., Armas, O., Rodriguez-Fernandez, J. (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 198-223
- [2] Shah, A. N., Ge, Y., Jiang, L., Liu, Z. (2009). Performance evaluation of a urea-water selective catalytic reduction (SCR) for controlling the exhaust emissions from a diesel engine. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 33, 259-271





# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

### **Pflanzenölkraftstoffe**

Sektionsleitung: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, TU Braunschweig





# Pflanzenöl als Teil eines Energiekonzepts für die Landwirtschaft

---

Peter Pickel

## Abstract

The application of pure plant oil (PPO) as a substitute for fossil diesel still makes sense to a limited extent. With this in mind PPO could serve as a fuel from agriculture for agriculture enabling food production becoming more independent from the use of limited resources. At the same time the balance of greenhouse gas emissions is very good for PPO produced and consumed in a decentralized way. Imports of soy (animal feed, proteins) could be substituted through the co-production of the oil seed cake. The Multifuel approach for internal combustion engines in mobile agricultural machines presented by JD in 2013 allows for tackling the problem of volatility of fuel prices and gives highest flexibility to farms in regard to the fuel supply.

## 1. Motivation

In letzter Zeit scheint die Frage des Klimawandels und der notwendigen Reduktion der Treibhausgasemissionen ihre ganz große Bedeutung verloren zu haben. Andere dominierende Themen wie die europäische Finanzkrise, die Bedrohung durch Terrorismus und die hohen Zahlen der Flüchtlinge aus dem Nahen Osten und Afrika stehen insbesondere in den Medien und in der öffentlichen Diskussion im Vordergrund. Lediglich die UN-Klimakonferenz Ende 2015 hat das Problem der Treibhausgasemissionen wieder in den Vordergrund gebracht – allerdings nur für kurze Zeit! Und schon bald nach der Konferenz in Paris hat sich die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit für das Klimaproblem wieder stark verringert.

John Deere arbeitet seit Jahren an der Entwicklung von Lösungen, um Landmaschinen mit regenerativen Energien betreiben zu können. Wir werden unsere Aktivitäten weiter vorantreiben, auch wenn aktuell das gesellschaftliche, politische und mediale Interesse an der Gesamtproblematik anscheinend niedriger ist als früher. Warum nun sind wir der Meinung, dass Landmaschinen mit regenerativen Energien betrieben werden sollten? Und warum sollte sich unsere Branche (also Landwirtschaft und Landtechnik) insgesamt damit beschäftigen? Folgend werden ein paar Antworten dargestellt:

1. Der Klimawandel ist Krisentreiber. Wenn wir ihn nicht in den Griff bekommen, werden Dürren und wirtschaftliche Not an der Tagesordnung sein und zwar mit Konsequenzen, die wir heute schon sehen und fühlen, beispielsweise die Flüchtlingsströme – Menschen auf der Flucht von Krieg und Hunger.
2. Die Landwirtschaft ist ein Schlüsselsektor hinsichtlich der THG-Emissionen. In Deutschland beispielsweise werden heute noch ca. 2,5 % der Erwerbstätigen in der Landwirtschaft beschäftigt (Quelle: Stat. BA, Deutschland, Stat. JB. 2013). Das sind eine Million Menschen, von denen allerdings nur etwa ein Drittel im Vollerwerb steht. Rechnet man die Teilzeitarbeit ein, dürfte der Erwerbstätigkeitsanteil der





Landwirtschaft bei ca. 1,5 % der Gesamtarbeitskraft (Schätzwert) liegen. Der Sektor Landwirtschaft verbraucht ca. 2,5 % der Energie im Mobilitätsbereich, was demnach im Vergleich zu anderen Branchen überproportional ist. Die Landwirtschaft ist darüber hinaus laut Literaturangaben, die allerdings stark variieren, für 7 bis 25% der THG-Emissionen verantwortlich. Natürlich sind diese Werte nicht nur auf den Konsum fossiler Kraftstoffe zurückzuführen, sondern auch auf die Düngung, die Viehwirtschaft und einige andere Ursachen.

Vor diesem Hintergrund wird der gesellschaftliche und politische Handlungsdruck auf uns wachsen. Auflagen zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen könnten irgendwann kommen, wenn wir passiv bleiben. Der Verband der europäischen Landmaschinenhersteller CEMA hat in Kooperation mit dem Verband der Baumaschinenhersteller dazu bereits 2011 Leitlinien veröffentlicht [1]. Darin sind alternative, erneuerbare Energien als eine von vier tragenden Säulen zur Treibhausgasemissionsminderung bei mobilen Arbeitsmaschinen verankert.

3. Die Landwirtschaft braucht wieder positives Ansehen. Das Bild der Landwirtschaft in unserer Bevölkerung wird heute geprägt durch negativ besetzte, stark subjektiv geprägte Schlagworte wie Massentierhaltung, angeblich unverantwortlichen Einsatz von Pestiziden oder dem fast noch schlimmeren latenten Vorwurf, die Landwirtschaft sein ein Subventionsparasit. Auch durch fast dümmlich anmutende Fernsehsendungen wie „Bauer sucht Frau“, in der Landwirte dargestellt werden als wären sie geistig minderbemittelt, prägen das Bild der Landwirtschaft in den Medien mit. Dieses Bild muss verändert werden, denn der Agrarsektor bildet den Schlüsselbereich, um die global wachsende Bevölkerung zu versorgen. Deshalb gilt es zu betonen, dass die Nahrungsmittelproduktion in Europa noch nie so sicher war wie heute und nie zuvor haben die Agrarprodukte so hohen Qualitätsniveaus entsprochen wie sie es heute tun. Diese positiven Bilder gilt es zu entwickeln und in den Vordergrund zu bringen. Die Produktion und Nutzung erneuerbarer Energie kann ein weiteres positives Bild sein.
4. Eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion bzw. –versorgung der global wachsenden Bevölkerung kann nur auf der Basis erneuerbarer Energie erfolgen. Die Verwendung fossiler (also endlicher) Ressourcen ist per se niemals nachhaltig.

Wir benötigen zur Nahrungsmittelproduktion in Zukunft immer mehr Technik (und keineswegs weniger), aber die Technik muss „smart“ sein und zum Smart-Sein gehört auch eine durchdachte, nachhaltige Energieversorgung für die mobilen Arbeitsmaschinen.

Landwirte in Entwicklungsländern benötigen nicht nur Maschinen, wie Traktoren. Denn vielfach könnten diese aber nicht eingesetzt werden, weil es keinen Zugang zu Kraftstoffen gibt. Um in entsprechenden Regionen eine umfassende und nachhaltige Nahrungsmittelproduktion sicherzustellen, müssen dort nicht nur Maschinen bereitgestellt werden, sondern neue ganzheitliche Bewirtschaftungssysteme geschaffen werden, die unter anderem auch eine integrierte Kraftstoffversorgung beinhalten. Ansätze, wie der vom EU-Agrarkommissar Phil Hogan, der eine Kreislauf-Agrarwirtschaft beschreibt, erscheinen sehr vielversprechend [2]:

*Indeed, beyond food and other traditional uses of biomass, for example pulp and paper, agriculture and forestry also contribute to produce new bio-based products.*



*... It could mean bioenergy such as biogas and biofuels. Indeed, biofuels are in some ways a case of going "back to the future".*

*Farming used to be circular, with horses or oxen being fed on crops grown by the farmer. Biofuels, while not an option to replace fossil fuels in all uses, could at least make the agricultural sector more circular - it is estimated that 10% of arable land would suffice for this purpose. There are already tractors that can operate with both, diesel or biofuel, emphasizing the innovative nature of the agricultural machinery sector.'*

5. Die hochentwickelten Länder müssen eine Vorreiter- oder Vorbildrolle für die Welt übernehmen.

## 2. John Deeres SESAM-Vision

John Deere arbeitet seit langem an der Realisierung einer Vision für eine bilanziell energie-autonome Landwirtschaft. Wir nennen unsere Vision SESAM (Abkürzung abgeleitet aus dem Englischen „Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery“). Leitgedanke ist dabei immer, in Zukunft höchste Effizienz und Wirtschaftlichkeit für die Agrarbetriebe sicherzustellen.



Im Sinn höchster Effizienz der Energieverwertung wird dabei grundsätzlich die Nutzung erneuerbarer Energie nah am Erzeugungsort angestrebt. Der kürzeste Weg von der Erzeugung zum potenziellen Verbraucher (hier dem Landwirt) besteht in der Nutzung selbsterzeugter Energie im landwirtschaftlichen Betrieb

und in den ländlichen Gemeinden. Diese Nutzung regenerativer Energien unter Einbeziehung der landwirtschaftlichen Produktionsmittel, darunter der Fahrzeuge, ist ein ganzheitliches Konzept für eine agrarische Kreislaufwirtschaft, mit dem der ländliche Raum eine Vorreiterrolle und Vorbildfunktion für die gesamte (globale) Gesellschaft wahrnehmen kann.

Die Eigennutzung erneuerbarer Energie erschließt außerdem zusätzliche Wertschöpfungspotenziale für die landwirtschaftlichen Betriebe und trägt so zu einer Stärkung des ländlichen Raums bei.

Wir sehen für die mobilen Landmaschinen verschiedene Wege zur Schaffung einer solchen Energieautonomie. Eine wesentliche Rolle könnten landwirtschaftlich dezentral erzeugte Kraftstoffe – also Pflanzenöl – als Diesel-Ersatz übernehmen.



Langfristig sehen wir aber auch Elektromobilität als Konzept für die Landwirtschaft.

### 3. Das John Deere Multifuel-Konzept

John Deere hat in mehreren Forschungsprojekten seit 2001, gefördert durch das Bundeslandwirtschaftsministerium (BMEL, Projektträger FNR e.V.) und durch die EU (Projekt 2ndVegOil) an einem sog. Ein-Tank-Konzept für die Nutzung von Pflanzenölkraftstoff geforscht. Mehrere andere Hersteller boten oder bieten 2-Tank-Systeme an, bei denen der Traktor mit Diesel aus einem Tank gestartet wird und später auf den Betrieb mit PPO aus dem zweiten Tank umgeschaltet wird.

Eine der Kernherausforderungen der langjährigen Forschung bei John Deere war die Erfüllung der jeweils gültigen Abgasregulierung. Des Weiteren hat John Deere in der



Forschung das Ein-Tank-Konzept mit der Technik für einen Vielstoff-Motor („Multifuel“) verbunden, der mit Diesel, Biodiesel und verschiedenen nicht-veresterten Pflanzenölen betrieben werden kann. Ein Prototyp 6210 R Multifuel mit einer Abgasnachbehandlung für EU Abgasstufe IIIB wurde auf der Landtechnik-Messe SIMA 2013 in Paris ausgestellt und mit einer Goldmedaille als herausragende Innovation aus-

gezeichnet. Die Jury hat den Gedanken der integrierten Energieversorgung für die Landwirtschaft in Verbindung mit dem Multifuel-Technologiekonzept als besonders zukunftsweisenden Weg für die Landwirtschaft gewürdigt.

### 4. Warum wird Pflanzenölkraft (PPO) noch nicht eingesetzt?

Wie Prototypen von Traktordieselmotoren der EU Stufe IIIB und IV zeigen, ist die Funktionalität des Multifuel-Konzepts grundsätzlich nachgewiesen (s. u.a. [3]). Allerdings ist das Multifuel-Konzept noch nicht in eine Serienentwicklung umgesetzt worden. Ob es zu einem marktfähigen Serienprodukt weiterentwickelt wird, steht nicht fest. Das Hauptkriterium hierfür ist bei John Deere ist die bislang fehlende Nachfrage nach dieser Technologie. Ebenso sind auch noch einige technische-wissenschaftliche Fragestellungen offen, die John Deere in weiteren Projekten bearbeiten möchte.

Im September 2014 kündigte der Freistaat Bayern ein Förderprogramm „Raps-Trak200“ zur Unterstützung der Markteinführung von Traktoren, die mit reinem Pflanzenöl (PPO) betrieben werden, an. Die Förderung erfolgt in Form einer Investitionsbeihilfe für Landwirte, um die Mehrkosten bei der Beschaffung eines Pflanzenöltraktors



abzudecken. EU-Agrarkommissar Phil Hogan sieht diese bayerische Aktivität sehr positiv [4]:

*'I am [...] happy to see that such developments are actively supported in Bavaria, for example through your RapsTrak200 project which supports investment in farming machinery powered by biofuels.'*

John Deere hat auf das bayerische Förderprogramm reagiert und bietet – zunächst regional begrenzt – entsprechende Traktoren ab Werk an. Diese Traktoren erfüllten zunächst Abgasstufe IIIB (Angebot bis Mitte 2015) und waren Ein-Tank-Traktoren, die im Sinn einer „Single-Fuel-Option“ ausschließlich mit PPO und nicht als Multifuel-Maschine mit unterschiedlichen Kraftstoffen betrieben werden dürfen. Die Multifuel-Option konnte – wie bereits oben erwähnt – bislang nicht als Serienlösung ab Werk realisiert werden.

Derzeit arbeitet John Deere an einer Single-Fuel-Ein-Tank-Lösung für ausgewählte Traktormodelle entsprechend Abgasregulierung EU Stufe IV.

Technik zum Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff ist also grundsätzlich verfügbar. Jedoch wurden trotz der Förderung in Bayern bislang nur wenige pflanzenbetriebene Traktoren bestellt. Zwei Hauptgründe hierfür sind die folgenden:

1. Fossiler Diesel ist zu billig – gerade seit dem letzten Jahr gab es einen Preisverfall, mit dem vorher wohl niemand gerechnet hätte.
2. Die politischen Rahmenbedingungen werden von den potenziellen Nutzern als instabil eingestuft.
3. Zweifel an der Zuverlässigkeit der Technik. Diese Zweifel basieren insbesondere auf negativen Erfahrungen aus dem letzten Jahrzehnt, als zahlreiche Umrüster Lösungen angeboten hatten, die teilweise auch nicht technisch ausgereift waren.

Langfristig würde, insbesondere mit Blick auf Punkt 1 und 2, die Verwirklichung von einem Vielstoff-(Multifuel)-Ansatz eine sehr gute Lösung sein. Das Konzept des Multifuel-Traktors würde den Einsatz des zu jedem Zeitpunkt günstigsten bzw. optimalen Kraftstoffs erlauben. Mit Angeboten von PPO-Maschinen „Ab Werk“ sollten die Zweifel hinsichtlich der Zuverlässigkeit (gemäß Punkt 3) eigentlich ausgeräumt sein.

## 5. Tank oder Teller?

Die Tank-oder-Teller-Debatte in Verbindung mit der Erneuerbare-Energien-Direktive (EED) kann weiterhin als Hemmnis für die Einführung von Pflanzenöl angesehen werden und ist ebenfalls verwandt mit der Frage nach dem indirekten Landnutzungswandel (bekannt auch unter der Abkürzung „iluc“, die für „indirect landuse change“ steht). Folgende Aspekte der EED sind in diesem Zusammenhang in Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung von Reinpflanzenölen als Kraftstoff herauszuheben:

1. Die Erneuerbare-Energien-Direktive legt Nachhaltigkeitskriterien sowie eine Methode für die rechnerische Bestimmung der THG-Minderungspotenziale biogener Kraftstoffe fest. Ferner werden Standardwerte für die THG-Minderung bei Nutzung



verschiedener Biokraftstoffe festgelegt. Als Beispiel liegt der Standardwert für Rapsöl danach nur bei 57%. Dieser Wert wurde für industriell erzeugtes Öl berechnet, was dem tatsächlichen Potenzial des Pflanzenöls in keiner Weise gerecht wird, wenn man das Rapsöl als dezentral erzeugten und genutzten Kraftstoff („aus der Landwirtschaft für die Landwirtschaft“) und korrekt bilanziert betrachtet.

Laut einer Veröffentlichung des TFZ Straubing [5] berücksichtigt die EED nicht die Vorteile einer dezentralen Erzeugung. Die Nutzung des Rapspresskuchens als hochwertiger Eiweißträger und Sojaersatz werden ebenfalls nicht berücksichtigt von der EED. Pflanzenölanbau verdrängt eben nicht notwendiger Weise Flächen für die Nahrungsmittelproduktion. Gerade die heimische Produktion von Raps kann Sojaimporte aus Übersee substituieren; und schließlich: die EED berücksichtigt auch nicht den Nutzen des Rapses im Ackerbau als Stickstoffbinder („Vorfruchtwert“). Nach den Untersuchungen des TFZ Straubing ergibt sich ein THG-Minderungswert von ca. 80% bei ganzheitlicher Betrachtung.

2. Die EU hat den Einsatz von Biokraftstoffen der ersten Generation auf 7% limitiert. Im Prinzip ist die Limitierung vertretbar, da die Flächen für den Ölpflanzenölanbau naturgemäß begrenzt sind, möchte man nicht die Regeln der guten landwirtschaftlichen Praxis verletzen. Der Grenzwert von 7% kann sicher auf wissenschaftlicher Basis weiter diskutiert werden. Wir sind der Meinung, dass Kommissar Phil Hogan Recht mit seiner Aussage (s. [2]) hat, dass 10% der Landnutzung für die Biokraftstoffproduktion in dezentralisierten landwirtschaftlichen Selbstversorgungsketten genutzt werden dürfen.
3. Die heutige Produktion, Verteilung und Nutzung von Pflanzenölen als Biokraftstoffe ist nicht optimal. Biokraftstoffe (mit einem großen Anteil Palmöl) werden in der Regel industriell zu Biodiesel verarbeitet („umgeestert“) und als Beimischung dem fossilen Diesel hinzugefügt. Dieser Kraftstoff wird global verteilt bzw. vertrieben und als B7 in Traktorentanks gefüllt (und in andere Fahrzeuge). Diese Wertschöpfungskette beinhaltet zahlreiche unnötige und viel zu aufwendige, verlustbehaftete Umwandlungsstufen und Transportwege. Eine dezentralisierte Produktion und Nutzung wäre wesentlich effizienter. In diesem Sinne einer lokalen und dezentralen Selbstversorgungskette der Landwirtschaft sind Biokraftstoffe der ersten Generation ein ausgezeichneter Kraftstoff „aus der Landwirtschaft für die Landwirtschaft“. Pflanzenöle können jedoch nicht alle Probleme des gesamten Mobilitätssektors lösen.

## 6. Fazit

Die Nutzung von reinem, dezentral erzeugtem Pflanzenöl (PPO) als Kraftstoff aus der Landwirtschaft für die Landwirtschaft macht Sinn, weil

1. die Nahrungsmittelproduktion unabhängiger vom Einsatz endlicher Ressourcen (Diesel) werden würde,
2. die THG-Bilanz von PPO-Kraftstoff in einer ganzheitlichen Bewertung sehr gut ist, und
3. weil Soja-Importe (Futtermittel, Eiweiße) durch die Co-Produktion von Rapspresskuchen ersetzt werden können.



4. Die Nutzung von Pflanzenöl ist aber insgesamt nur begrenzt sinnvoll (nur etwa 10% der landwirtschaftlichen Nutzfläche können für den Ölpflanzenanbau verwendet werden), wobei
5. die dezentrale Erzeugung und Nutzung von Pflanzenöl in der Landwirtschaft ist höchst effizient.
6. Das John Deere-Multifuel-Konzept würde das Problem der Volatilität der Kraftstoffpreise lösen und gibt Farmen die höchste Flexibilität in Bezug auf die Kraftstoffversorgung.

Pflanzenölkraftstoff ist also nicht die große Lösung für unsere Welt, aber eine Lösung für die, die die Welt ernähren (Zitat aus dem Englischen übersetzt aus [5])!

## Literatur

- [1] CECE and CEMA: Optimising our industry2 reduce emissions. Broschüre im Selbstverlag von CECE. Erhältlich über: CECE (Committee for European Construction Equipment), Diamant Building, Bd A. Reyers Ln 80, BE-1030 Brussels, Belgium, 2011
- [2] Hogan, P.: Speech at Bio-Economy Investment Summit, Nov. 9<sup>th</sup> 2015, Brussels. [http://ec.europa.eu/agriculture/commissioner-speeches/pdf/hogan-bioeconomy-summit-09-11-2015\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/agriculture/commissioner-speeches/pdf/hogan-bioeconomy-summit-09-11-2015_en.pdf)
- [3] Dieringer, S.: Der Flexfuel Traktor. Dissertation, Universität Hohenheim. Reihe: Agrarwissenschaft. Shaker-Verlag GmbH, Herzogenrath, Mai 2012. ISBN 978-3-8440-1010-7
- [4] Hogan, P.: Speech at Bavarian Farmers' Association (BBV) Assembly, Dec. 3<sup>rd</sup> 2015, Herrsching, Bavaria, Germany
- [5] Engelmann, K, Dressler, D. und Remmele, E.: Rapsölkraftstoff aus Bayern – Beitrag zum Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft. Schule und Beratung (SuB), Magazin des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft 6-7, 2015, S. 24-27
- [6] Dieringer, S. und Pickel, P.: Pathways to Sustainable Biofuels in Agriculture - The 2nd VegOil Project. Presentation at final event of project FP7-TREN-219004, Dec. 19<sup>th</sup> 2011, Brussels.



# Rapsöltraktoren auf dem Prüfstand

---

Johannes Ettl, Klaus Thuneke, Peter Emberger, Edgar Remmele

## Abstract

The use of plant oil fuel in agriculture reduces greenhouse gas emissions and increases regional added value. This study presents some results from comprehensive investigations about the practicability of 17 plant oil fueled tractors from emission gas stage I to IV. Modern plant oil fueled tractors demonstrate high reliability in practice and feature low emissions during test cycles on the tractor test stand.

## 1. Einleitung und Zielstellung

Für die meisten mobilen landwirtschaftlichen Antriebe sind hoch energiedichte flüssige Biokraftstoffe in modernen Verbrennungsmotoren derzeit die einzige verfügbare, nachhaltige und treibhausgasmindernde Alternative zu konventionellen Dieselantrieben [1]. Mit Rapsölkraftstoff kann der kraftstoffbedingte Treibhausgas-Ausstoß um 57 bis 80 % reduziert werden [2]. Rapsölkraftstoff ist genormt nach DIN 51605 [3] und kann in modernen Pflanzenöltraktoren mit Herstellerfreigabe eingesetzt werden. Somit kann bereits jetzt ein Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz sowie zur Ressourcenschonung geleistet werden [4]. Die stufenweise verschärfte Begrenzung des Ausstoßes an Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC) sowie Partikelmasse (PM) durch die EU-Richtlinien 2000/25/EG, 2005/13/EG bzw. 97/68/EG führte zudem zur Entwicklung von neuen Motorgenerationen mit komplexer Abgasnachbehandlung (AGN).

Untersuchungen belegen den erfolgreichen Einsatz von Pflanzenöltraktoren der Abgasstufen I, II und IIIA von mehreren Tausend Betriebsstunden [5][6][7]. In Traktoren ab der Abgasstufe IIIB werden zunehmend AGN-Systeme eingesetzt.

Die  $\text{NO}_x$ -Konzentration wird meist mittels der selektiven katalytischen Reduktion in einem Katalysator mit eingebrachter wässriger Harnstofflösung (SCR-System) gemindert. Über die  $\text{NO}_x$ -Umsatzraten von SCR-Systemen und deren Langlebigkeit in Rapsöltraktoren im Vergleich zu Diesel ist noch wenig bekannt.

Partikelfilter (DPF) reduzieren den Rußgehalt im Abgas. Diese müssen, je nach Beladungszustand, regeneriert d. h. vom Ruß befreit werden, um einen sicheren und effizienten Motorenbetrieb zu gewährleisten. Üblicherweise erfolgt eine aktive thermische Regeneration bei Abgastemperaturen von ca. 600 °C mit Hilfe vom zusätzlich eingebrachten Dieselmotorkraftstoff in den Brennraum oder Abgasstrang. Pflanzenölkraftstoff eignet sich aufgrund der physikalischen Eigenschaften auch gut für eine passive Regeneration des DPF ohne zusätzliche Kraftstoffnacheinspritzung [8]. Der Grund dafür ist, dass Ruß aus der Verbrennung von Rapsölkraftstoff, anders als Dieselmotorkraftstoff, bereits ab Abgastemperaturen von 315 °C oxidiert wird [9]. Die Umwandlung von Stickstoffmonoxid (NO) zu -dioxid ( $\text{NO}_2$ ) im vorgeschalteten Oxidationskatalysator (DOC) und die üblicherweise partikelärmere Verbrennung von Rapsöl ergeben ein günstiges Ruß- $\text{NO}_2$ -Verhältnis [10]. Es liegen jedoch kaum Erfahrungen zur Betriebssicherheit und Effizienz der Partikelfiltersysteme sowie zum Emissionsverhalten von modernen Rapsöltraktoren der Abgasstufen IIIB und IV vor.





Ziel der Untersuchung ist es, die Praxistauglichkeit moderner Pflanzenöltraktoren im Feldtest zu überprüfen. Ferner soll ein Pflanzenöltraktor der Abgasstufe IV mit Diesel- und Rapsölkraftstoff hinsichtlich des Emissionsverhaltens am Traktorenprüfstand untersucht werden.

## 2. Material und Methoden

Im Flottenversuch werden insgesamt 17 Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IV mit 4- und 6-Zylinder Motoren inkl. Abgasnachbehandlung an den bayerischen landwirtschaftlichen Versuchsgütern in der Praxis untersucht. Am Traktorenprüfstand erfolgen zudem wiederkehrende stationäre und transiente Emissionsmessungen in Anlehnung an die Richtlinien 97/68/EG bzw. ISO 8178 [11][12]. Dabei wird die Drehzahl über den Fahrhebelsteller am Gaspedal und das Drehmoment über die Wirbelstrombremse am Zapfwellenausgang des Traktors bestimmt. In EMBERGER 2013 [5] werden Aufbau und Durchführung der Messung der gasförmigen und partikulären Abgaskomponenten sowie des Kraftstoffverbrauchs am Traktorenprüfstand beschrieben.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Die Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB und IV und deren Abgasnachbehandlung funktionieren während des Feldtests bisher zuverlässig.

Fünf Traktoren der Abgasstufe IIIB und IV verwenden einen beschichteten Partikelfilter mit passiver Filtergeneration. Die Ergebnisse aus dem Feldtest belegen, einen störungsfreien Betrieb des beschichteten Partikelfilters in Verbindung mit Rapsölkraftstoff. So nahm beispielsweise der Beladungszustand des DPF, gemessen am Differenzdruck, am John Deere 6210R (Abgasstufe IIIB) über 1.500 Bh Einsatzzeit nur geringfügig zu und bewegte sich bei hoher Last in einem unkritischen Bereich von ca. 40 bis 95 mbar (Bild 1).

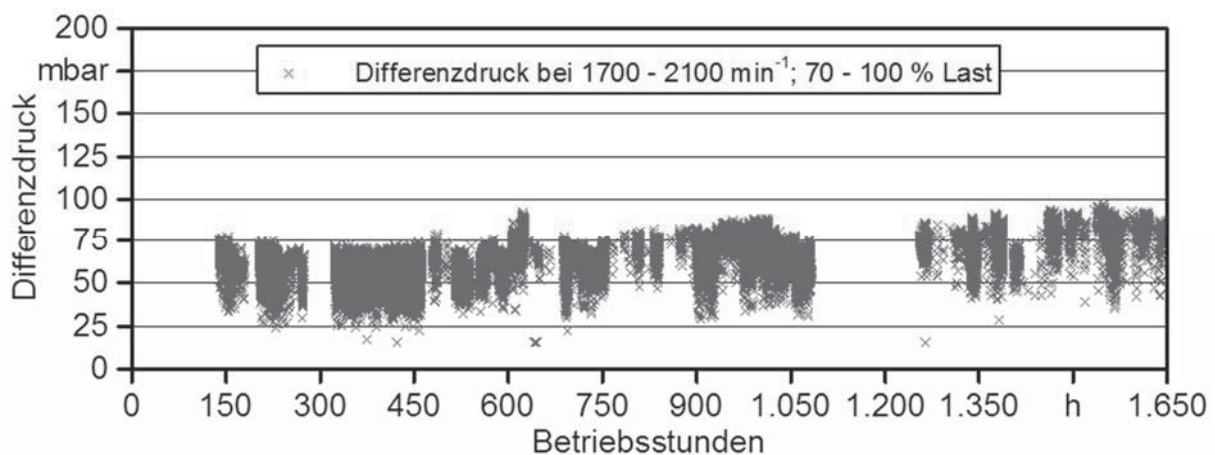


Bild 1: Differenzdruck des Dieselpartikelfilters am John Deere 6210R über 1.500 Bh

Erst Abgasgedrücke über 200 mbar können den Motorbetrieb stark beeinträchtigen. Daraus lässt sich schließen, dass die kontinuierliche passive Partikelfilterregeneration für den Rapsölbetrieb geeignet ist und sich der am Motorenprüfstand nachgewiesene Gleichgewichtszustand zwischen Rußablagerungen und Rußabbrand [10]



auch in der Praxis einstellt. Durch die kontinuierliche Ablagerung von Aschen im Partikelfilter ist jedoch langfristig, wie auch im Betrieb mit Dieselkraftstoff, eine Zunahme des Differenzdruckes zu erwarten.

Die Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV erfüllen die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte im stationären Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Bild 2 zeigt die limitierten Emissionen des Fendt 724 Vario S4 (Abgasstufe IV) im Nonroad steady cycle (NRSC) in Anlehnung an 97/68/EG.

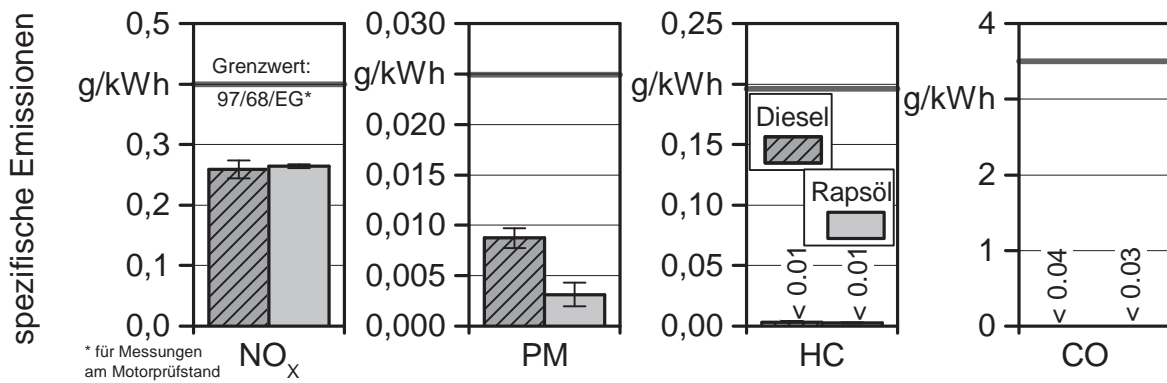


Bild 2: Limitierte Abgasemissionen des Fendt 724 Vario S4 im NRSC nach der Abgasnachbehandlung mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff am Traktorenprüfstand

Die Stickoxid- (NO<sub>x</sub>), Partikelmasse- (PM), Kohlenwasserstoff- (HC) und Kohlenmonoxid-Emissionen (CO) werden durch das SCR-System, den DOC und den DPF mit beiden Kraftstoffen auf ein sehr geringes Niveau reduziert. Insbesondere die HC- und CO-Emissionen sind bei allen Messungen unterhalb der Nachweisgrenze. Im Rapsölbetrieb zeigen sich in etwa gleich hohe NO<sub>x</sub>-Emissionen und niedrigere PM-Emissionen im Vergleich zum Dieseldieselbetrieb.

In weitere Untersuchungen werden auch nichtlimitierte Emissionskomponenten, wie z. B. die Partikelanzahl bewertet. Neben dem stationären Prüfzyklus werden am Traktorenprüfstand außerdem transiente Prüfzyklen, wie z. B. der angepasste Nonroad transient cycle (NRTC) [11] an Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV angewandt.

Zukünftig sollen zudem das Langzeitbetriebsverhalten von Pflanzenöltraktoren mit Abgasnachbehandlungssystemen weiter beobachtet und die Real-Driving-Emissions (RDE) mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) im Pflanzenölbetrieb erhoben werden. Dabei sollen die realen Emissionen bei verschiedenen Feldarbeiten mit den am Prüfstand ermittelten Abgasemissionen aus verschiedenen Prüfzyklen verglichen werden.



## Literatur

- [1] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. *Landtechnik*, Jg. 69, Nr. 5, S. 256–259
- [2] ENGELMANN, K.; STRIMITZER, L.; REMMELE, E. (2014): Environmental effects of decentralized rapeseed oil production in Bavaria – A life cycle assessment (LCA) case study. In: *Agroscope; ETH Zürich; AgEng 2014 Zurich - International Conference of Agricultural Engineering.*, 6-10 July, S. 1–8
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG . V. (2010): DIN 51605 - Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren - Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. September 2010. Berlin: Beuth Verlag, 16 Seiten
- [4] WIDMANN, B.; REMMELE, E.; RIEPL, C. (2012): Biokraftstoffe. Fragen und Antworten. *TFZ-Kompakt*, Nr. 9. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 15 Seiten
- [5] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 31. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 56 Seiten, ISSN 1614-1008
- [6] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 32, 125 Seiten
- [7] THE 2ND VEGOIL CONSORTIUM (2011): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage 7 Dissemination. Deliverable No. 7.7. Final Results. URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Zugriff am 20.04.2012)
- [8] PICKEL, P.; DÜSSELDORF, C. (2015): Emissions of a Stage IV Compliant PPO Tractor Engine. In: *Bundesverband BioEnergie e. V. Kraftstoffe der Zukunft 2015*. 12. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe. CityCube, Berlin, 19.-20.01. S. 1–22
- [9] HOFMANN, U.; REINHARDT, P.; EVTIMOVA, M. (2006): Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsmethylester und Rapsöl. *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 78, Nr. 6, S. 709–714
- [10] DÜSSELDORF, C. (2015): Experimentelle Untersuchungen zur inner- und außermotorischen Partikelreduktion an einem Nutzfahrzeugdieselmotor zur Erfüllung der Abgasstufe IV im Betrieb mit biogenen Kraftstoffen. *Kaiserslautern: VKM-Schriftenreihe*. Bd. 15. ISBN 978-3-943995-86-2.
- [11] Ettl, J.; Landis, M.; Huber, G.; Bernhardt, H. (2014): Erfahrungen und Resultate mit einem dynamischen Zyklus zur Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessung an Traktoren. In: *72. International Conference on Agricultural Engineering*. ESTREL Berlin, 19. und 20. November. *VDI-Berichte*, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 433–438, ISBN 978-3-18-09222-3
- [12] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANKL, H.; SCHAUFLENER, H.; SCHIESS I.; THUNEKE, K. (2011): Measurement of emissions of a tractor — round robin test of ART, FJ-BLT and TFZ. *Landtechnik*, Jg. 66, Nr. 1, S. 56–59



# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

### **Neue Kraftstoffe**

Sektionsleitung: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, TU Braunschweig





# Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse für eine saubere Verbrennung – Von der Forschung zur Anwendung

---

Benedikt Heuser, S. Heitzig, A. Weinebeck, S. Pischinger, H. Murrenhoff

## Abstract

Within the Cluster of Excellence “Tailor-Made Fuels from Biomass” two promising bio-fuel candidates, 1-octanol and di-n-butyl ether, are blended in various ratios in EN590 Diesel. The performance of several blends with regard to combustion and emissions is analyzed, and in order to ensure safe handling the tribological performance and compatibility with seal materials are investigated as well. Both oxygenates contribute to an improvement in the soot-NO<sub>x</sub>-trade-off, but only low amounts up to 20% v./v. are nearly compliant with the EN590 regulation.

## 1. Einleitung und Motivation

Innerhalb des Exzellenzclusters “Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse” („Tailor-Made Fuels from Biomass“, TMFB) konnten in den letzten Jahren einige vielversprechende Kraftstoffkandidaten für eine dieselmotorische Verbrennung identifiziert und untersucht werden. Alle diese potentiellen Kraftstoffe zeichnen sich gegenüber konventionellem Dieselmotorkraftstoff durch einen deutlich verbesserten Ruß-Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Zielkonflikt aus. Mit Blick auf die Tribologie lassen sich jedoch keine so einheitlichen Aussagen treffen. Sowohl die dynamische Viskosität als auch die Schmierfähigkeit der untersuchten Fluide unterscheiden sich signifikant.

Neue Kraftstoffe sind nur sehr schwer im Markt einzuführen. Daher wurden die potentiellen Kraftstoffe in einem ersten Schritt mit fossilem DIN EN590 Dieselmotorkraftstoff geblendet. Die Auswirkungen des Blendens auf die tribologischen Eigenschaften und die Verbrennungs- und Emissionscharakteristika werden im Folgenden aufgeführt.

## 2. Untersuchte Biokraftstoffe und Blends

Mit Blick auf die innermotorische Verbrennung und die resultierenden motorischen Emissionen sind die beiden Isomere 1-Oktanol (1-Okt) und Di-n-Butylether (DnBE) sehr vielversprechende Kraftstoffkandidaten. Aufgrund ihrer stark von herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff abweichenden Eigenschaften erfüllen beide Stoffe jedoch nicht die für Dieselmotorkraftstoff definierten Anforderungen. Durch gezieltes Blending ist es jedoch möglich, den emissionsmindernden Effekt der neuartigen Biokraftstoffe zu nutzen, ohne die gültigen Normen zu verletzen.



### 3. Tribologische Untersuchungen

Die Kraftstoffpumpen von modernen Dieselmotoren mit Common-Rail-Technik sind kraftstoffgeschmiert. Um ein Mindestmaß an Kraftstoffschmierfähigkeit zu gewährleisten, existieren einige Testmethoden wie zum Beispiel das High Frequency Reciprocating Rig (HFRR). In Abbildung 1 ist der Einfluss einer Beimischung von 1-Okt und DnBE zu konventionellem Dieseldieselkraftstoff auf den Wear Scar Diameter (WSD) dargestellt.

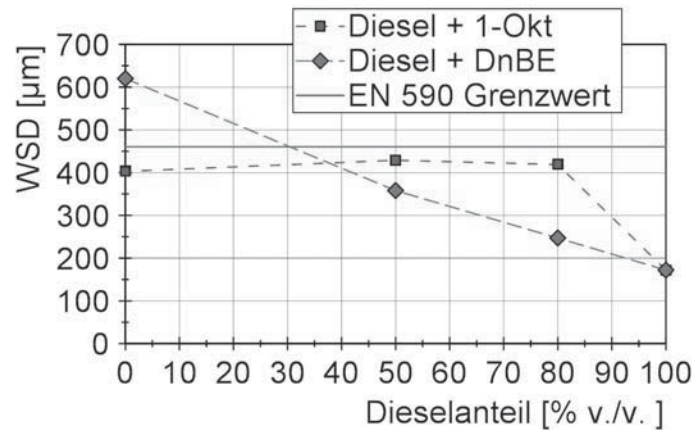


Abbildung 1: Einfluss unterschiedlicher Blendraten auf die Schmierfähigkeit

Alle untersuchten Blends erfüllen noch das in der DIN EN 590 gesetzte Limit des WSD von 460 µm. Der WSD fällt mit Dieseldieselkraftstoff deutlich kleiner aus, was insbesondere auf das bereits optimal abgestimmte Additivpaket zurückzuführen ist. Interessanterweise sind die Trends des WSD für Beimischungen von 1-Okt und DnBE stark verschieden. Während DnBE zu einem nahezu linearen Anstieg des WSD führt, ändert sich der WSD mit bereits geringen Mengen an 1-Okt deutlich, zeigt dann jedoch einen konstanten Wert, bis die maximale Konzentration von 1-Okt von 100% erreicht ist.

### 4. Materialverträglichkeitsuntersuchungen

Standardisierte Immersionstests sind eine gängige Untersuchungsmethode, um eine sichere Anwendung abzuschätzen. Für jede Testkampagne wurde die Probe für eine definierte Zeit bei einer vergebenen Temperatur in das Fluid getaucht. Bei Testende wurden die durch die Fluide hervorgerufenen relativen Änderungen in Volumen und Härtegrad gemessen. Abbildung 2 zeigt die relativen Volumenzunahmen von Standardreferenzelastomeren aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitrile Butadiene Rubber, NBR) nach einer Einlegedauer von sieben Tagen bei einer Temperatur von 40 °C.

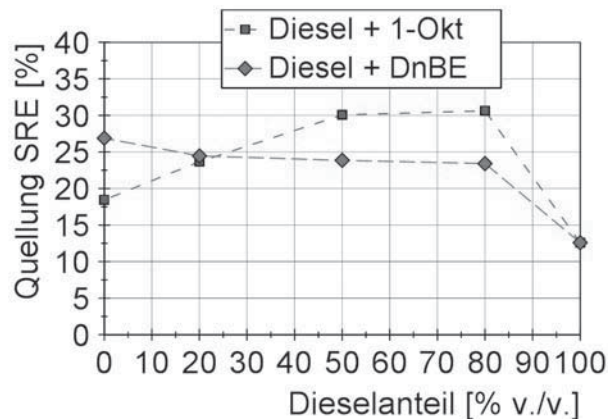


Abbildung 2: Einfluss unterschiedlicher Blendraten auf die Volumenänderung von Standardreferenzelastomeren aus NBR

Die Volumenzunahme von 13% mit Dieselkraftstoff ist die geringste in diesen Untersuchungen beobachtete Volumenänderung. Des Weiteren konnte keine lineare Korrelation zwischen Volumenzunahme und Kraftstoffanteil festgestellt werden. Eine Beimischung von 20% v./v. 1-Okt führte in diesen Tests sogar zu der maximalen Volumenzunahme von 34%, die mittels der Hansen Löslichkeitsparameter-Theorie (Hansen Solubility Parameters, HSP) erklärt werden kann. Diese durchaus noch moderate Volumenänderung deutet auf eine Langzeitkompatibilität auch mit 20% v./v. 1-Okt hin. Vor dem Hintergrund einer möglichen Anwendung im Fahrzeug ist zu beachten, dass die Zusammensetzung der Standardreferenzelastomere von technischen Elastomeren abweicht. Durch gezielte Wahl von Additiven und Füllern oder eines anderen Grundwerkstoffes ist tendenziell eine noch besser Kompatibilität zu erzielen. So zeigte eine identische Versuchsreihe mit Probekörpern aus FKM über den gesamten Mischungsbereich vernachlässigbar geringe Änderungen des Probekörpervolumens von weniger als 5%.

## 5. Motorische Untersuchungen

Die Blends, welche zu Materialverträglichkeits- und Schmierfähigkeitsuntersuchungen herangezogen wurden, wurden auch in einem 1-Zylinder Prüfmotor für PKW-Anwendungen untersucht. Die wichtigsten motorischen Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Einheit	
Hubvolumen	cm <sup>3</sup>	390
Hub	mm	88,3
Bohrung	mm	75
Verdichtungsverhältnis	-	15,3
Ventile	-	4
Max. Zylinderdruck	bar	190
Einspritzsystem	-	Bosch Piezo Common-Rail
Einspritzdruck	bar	2200 (maximal)
Injektordüse	-	8-Loch, 109 µm, 153°, 620 cm <sup>3</sup> /min @100 bar
Aufladung	-	3,8 bar abs.(maximal)

Tabelle 1: Parameter des verwendeten 1-Zylindermotors





Ein erhöhter Sauerstoffgehalt des Kraftstoffes wirkt sich unter gleichen Randbedingungen positiv auf den Ruß-Stickoxid-Zielkonflikt aus. Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse der Diesel/1-Okt-Blends anhand zweier Lastpunkte vorgestellt. Die aus verbrennungstechnischer Sicht wichtigsten Eigenschaften der Kraftstoffblends sind in Tabelle 2 angegeben. Werte, die nicht die derzeit gültige EN590 Norm erfüllen, sind farblich markiert.

	Einheit	EN590 Diesel	80% Diesel 20% 1-Okt	50% Diesel 50% 1-Okt*	1-Oktanol
Siedebereich	°C	180-350	180-350	180-350	195
Verdampftes Vol. (250°C)	% v/v	19,1	39,9	60,1	~100
Verdampftes Vol. (350°C)	% v/v	94,7	95,8	97,35	~100
Heizwert	MJ/kg	42,9	41,8	40,47	38,2
Dichte (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	838	837	836	835
CN / DCN*	-	~ 52	49,1	42,6	33,1
Sauerstoffgehalt	% m/m	0,14	2,9	6,22	12,3
Dampfdruck (20°C)	mbar	<1	<1	<1	<1
Kin. Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	3	4,2	5,9	8,8
Verdampfungsenthalpie	kJ/kg	358	412	460	562
Flammpunkt	°C	78	78	79	81

Tabelle 2: Eigenschaften der untersuchten 1-Okt / Diesel-Blends

Der Blend mit 80% v./v. Dieseldieselkraftstoff und 20% v./v. 1-Okt erfüllt die meisten für das Einspritzsystem und die Verbrennung wichtigen Parameter der EN590, während der Blend mit 50% 1-Okt und reines 1-Okt die meisten wichtigen Parameter deutlich verfehlen, insbesondere mit Blick auf die Cetanzahl.

Abbildung 3 zeigt die motorischen Ergebnisse mit konventionellem Dieseldieselkraftstoff, reinem 1-Okt sowie den beiden Blends für konstante NO<sub>x</sub>-Emissionen in zwei charakteristischen Lastpunkten.

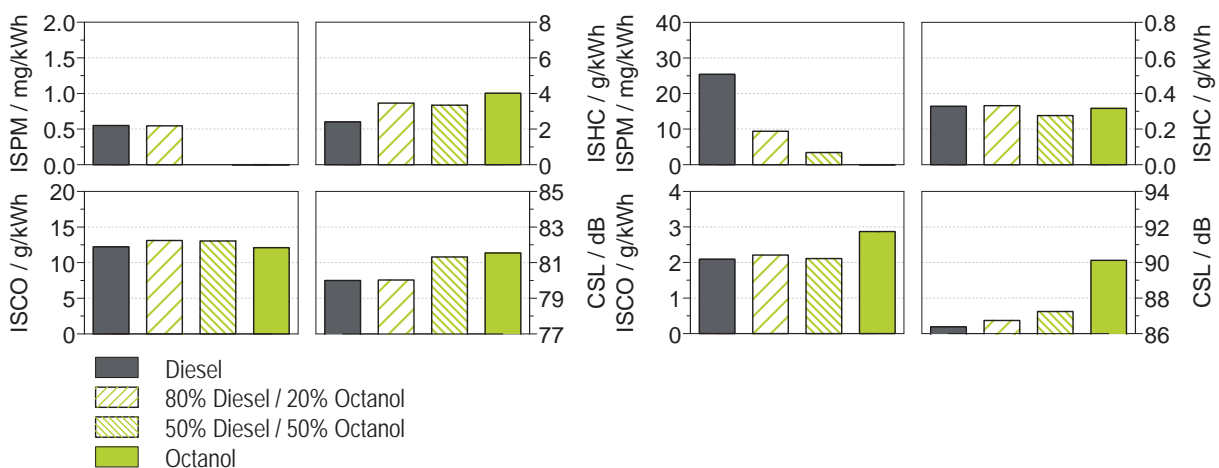


Abbildung 3: Motorische Testergebnisse in zwei unterschiedlichen Lastpunkten  
(links:  $n = 1500$  1/min,  $p_{mi} = 4,3$  bar,  $ISNO_x = 0,2$  g/kWh  
rechts:  $n = 2280$  1/min,  $p_{mi} = 9,4$  bar,  $ISNO_x = 0,4$  g/kWh)



Die vier Graphen in der linken Bildhälfte zeigen die Ergebnisse in einem kleinen Lastpunkt bei  $n = 1500$  1/min und  $p_{mi} = 6,8$  bar bei EU-6.1 konformen  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $0,2$  g/kWh. Oben links werden die indizierten spezifischen Partikelemissionen (ISPM), oben rechts die indizierten spezifischen Kohlenwasserstoffemissionen (ISHC), unten links die indizierten spezifischen Kohlenmonoxidemissionen (ISCO) und unten rechts das Combustion Sound Level (CSL) dargestellt. Aufgrund des geringen Temperaturniveaus, und daraus resultierenden langen Zündverzügen mit guter Gemischhomogenisierung, sind die Partikelemissionen für alle untersuchten Kraftstoffe sehr gering. Für das Blend mit 50% v./v. 1-Okt und reines 1-Okt können keine Partikelemissionen nachgewiesen werden. Diese beiden Kraftstoffe führen aufgrund eines noch längeren Zündverzugs zu einer stärker vorgemischten Verbrennung, welches zu höheren Verbrennungsgeräuschen führt. Das Blend mit 20% v./v. 1-Okt zeigt hingegen keinerlei Nachteile gegenüber konventionellem EN590 Dieselkraftstoff.

Die vier Graphen auf der rechten Seite zeigen die motorischen Ergebnisse bei  $n = 2280$  1/min und  $p_{mi} = 9,4$  bar, ebenfalls bei EU-6.1 konformen  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $0,4$  g/kWh. In diesem Lastpunkt ist bereits mit nur 20% v./v. 1-Okt eine deutliche Rußreduktion zu erkennen. Ohne die anderen Emissionen und das Verbrennungsgeräusch nachteilig zu beeinflussen, können die Partikelemissionen in diesem Lastpunkt um 60% gesenkt werden.

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Obwohl die Beimischung beider untersuchter Kraftstoffkandidaten zu konventionellem EN 590 Dieselkraftstoff die tribologische Leistung reduziert, erfüllen alle Blends noch die Norm. Um ein besseres Verständnis für die das tribologische Verhalten von Kraftstoffkandidaten zu erhalten, werden neu konstruierte Tribometer ebenso eingesetzt wie zusätzliche, standardisierte Testverfahren.

Die Materialverträglichkeitsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Beimischung der Kraftstoffkandidaten tendenziell zu einer höheren Volumenzunahme führt, aber es ist ebenfalls davon auszugehen, dass die Biokraftstoffkandidaten dauerhaft Materialverträglich sind. Tiefergehende Untersuchungen werden derzeit durchgeführt.

Die motorischen Tests haben gezeigt, dass die Verwendung von 1-Okt insbesondere die Partikelemissionen deutlich reduziert. Dies ist hauptsächlich auf den leicht längeren Zündverzug, den hohen Sauerstoffanteil und die Aromatenfreiheit zurückzuführen. 1-Oktanol erfüllt jedoch nicht alle in der Norm DIN EN 590 festgelegten Kriterien. Wenn jedoch 20% v./v. 1-Oktanol zu Dieselkraftstoff beigemischt werden, erfüllt dieser Blend nahezu alle wichtigen Kriterien der Normierung. In motorischen Untersuchungen konnte mit diesem Blend gezeigt werden, dass keinerlei Nachteile auftreten. Bei mittlerer Last konnten die Rußemissionen hingegen sogar um 60% reduziert werden.



## Literatur

- [1] Heuser, B., Laible, T., Jakob, M., Kremer, F. et al., "C8-Oxygenates for Clean Diesel Combustion," SAE Technical Paper 2014-01-1253, 2014, doi:10.4271/2014-01-1253.
- [2] DIN EN 590, Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods, (2014).
- [3] DIN EN ISO DIN EN ISO 12156-1, Diesel fuel - Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR), (2006).
- [4] Hansen, C. 2007 "Hansen solubility parameters: A user's handbook" Edited by Taylor & Francis Web, 2007
- [5] Muether, M. „Einflüsse alternativer Kraftstoffe auf die dieselmotorische Verbrennung“, Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, 2009
- [6] Analysis by ASG Analytik Service Gesellschaft
- [7] Heitzig S. et al., "Model tests for evaluating the impact of low viscosity biofuels on tribological contacts in injection pumps", Proceedings of the ASME/Bath 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control: (ICONE14); October 06-09, Sarasota, USA, 2013



# Die Einführung neuer Kraftstoffe unter besonderer Berücksichtigung von Nachhaltigkeit, Qualität und Infrastruktur

---

Thomas Garbe

## Abstract

Die Anforderungen zur Senkung der CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen im weltweiten Straßenverkehr führen zu einer weiteren Verbesserung etablierter sowie zur Markteinführung neuer oder bislang nicht marktfähiger Antriebstechnologien. Mittelfristig werden im Straßenverkehr Verbrennungsmotoren mit Diesel-, Benzin- und Gasmotoren neben Elektroantrieben und Hybriden eingesetzt. Jeder Antrieb benötigt einen oder sogar mehrere Energieträger. Bei allen Energieträgern muss künftig ein möglichst hoher Anteil regenerativ erzeugt werden. Für Strom, flüssige und gasförmige Kraftstoffe gelten dabei die gleichen Nachhaltigkeitsanforderungen. Es ist zur Überwindung der Markteintrittsbarrieren Ziel führend, bestehende Infrastruktur zu nutzen; deshalb haben so genannte „Drop – In Kraftstoffe“ erhebliche Vorteile. Für alle anderen Kraftstoffe ist ein langfristiger und zuverlässiger Aufbau einer kundenfreundlichen Infrastruktur notwendig. Damit neue Antriebe und Kraftstoffe vom Kunden akzeptiert werden, ist es notwendig, die Kunden über Notwendigkeit und Eigenschaften der Neuerungen aufzuklären, wobei der Anspruch an höchste Qualität und Zuverlässigkeit technisch und kommunikativ gesichert sein muss.





# The Mobility Challenge

---

Wolfgang Warnecke

## Abstract

Increasingly stringent emissions legislations globally are forcing the faster growth of electric vehicles and alternative fuels. Fundamentally, there is a limit to the extent the Internal Combustion Engine (ICE) with today's gasoline and diesel based fuels can reduce both local and CO<sub>2</sub> emissions. The question is if and when liquid hydrocarbon fuels will be completely replaced. Alternative Drivevtrains with other fuel options (eg. electric mobility) does not as yet offer the same driving experience that wider society has come to expect, and in many cases electric vehicles are not as clean as the public's perception.

This presentation looks at what are the challenges we need to face in Mobility, but also what could be the energy (fuels) related options possible in the longer term transition.





# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

**Abgasnachbehandlung, Umweltwirkung und Kraftstoffsensoren**  
Sektionsleitung: Prof. Dr. med. Jürgen Bünger, Ruhr-Universität Bochum







# CO<sub>2</sub>-reduzierte Kraftstoffe für die nachhaltige Mobilität der Zukunft

---

Gennadi Zikoridse; Claus-Gunter Kummer

## Abstract

Decarbonising transport is a core theme of the future strategy of the transport policy. The diversification of fuels will increase continuously, starting with the biogenic fuels, synthetic fuels on up, as a long term option for hydrogen. A CO<sub>2</sub>-reduced fuel poses new challenges to the exhaust aftertreatment technologies.

## 1. Einleitung

Die für die Gesellschaft bedeutenden Fragestellungen wie Klimawandel, Ressourcenverknappung, Gesundheitsgefährdung durch Schadstoffemissionen einerseits und Innovation, Wirtschaftswachstum und Sicherstellung der nachhaltigen Mobilität andererseits, verlangen eine ganzheitliche Betrachtung der durch Verbrennungsmotoren bedingten CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen.

Der Klimavertrag von Paris zielt auf eine Dekarbonisierung der Weltwirtschaft ab. Dabei soll die auf fossilen Energiequellen basierte Energiewirtschaft hin zu einer Versorgung mit erneuerbaren Energieträgern und -quellen umgebaut werden. In diesem Zusammenhang wird neben der Energiewende auch die Verkehrswende gefordert. Heute trägt der Verkehr etwa 14% zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei. Der Verkehrsbereich muss seinen Beitrag zur Umsetzung der Dekarbonisierung unserer Wirtschaft leisten. Der verstärkte Einsatz von CO<sub>2</sub>-reduzierten Kraftstoffen ist unumgänglich und bereits in vielen Staaten Gegenstand der Ressourcen- und Dekarbonisierungsstrategie. Daher wird die Bedeutung der alternativen Kraftstoffe, wie z.B. Biodiesel, Bioethanol und synthetische Kraftstoffe, in der Zukunft stetig zunehmen.

## 2. Herausforderung – Emissionsgesetzgebung

Die Diversifizierung der Energiebasis des Verkehrs mit alternativen Kraftstoffen in Verbindung mit innovativen Antriebstechnologien, die weitere Steigerung der Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit von Verbrennungsmotoren, sowie die Optimierung der Abgasnachbehandlungstechnologien und Verkehrsabläufe sind Voraussetzungen zur Erreichung der zukünftigen Emissions- und Klimaschutzziele.

Die strengen globalen Vorgaben zur weiteren Reduzierung der Schadstoffemissionen und zur Verbesserung der lokalen Luftqualität bedingen einen flächendeckenden Einsatz effizienter Abgasnachbehandlungstechnologien. Diese müssen unter einer Vielzahl unterschiedlicher äußerer Bedingungen optimale Leistungswerte erzielen, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden [1].



Die Einführung von Real Driving Emissions (RDE) erfordert eine durchdachte Kombination eines äußerst effizienten Verbrennungsprozesses mit minimalen Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einer unter allen Einsatzbedingungen optimal funktionierenden Abgasnachbehandlung [2]. Zur Einhaltung zukünftiger Emissionsanforderungen an Verbrennungskraftmaschinen ist eine ganzheitliche Betrachtung der Antriebstechnologien, der Kraftstoffe, der Applikation, der Emissionen und der Abgasnachbehandlung (Bild 1) erforderlich.

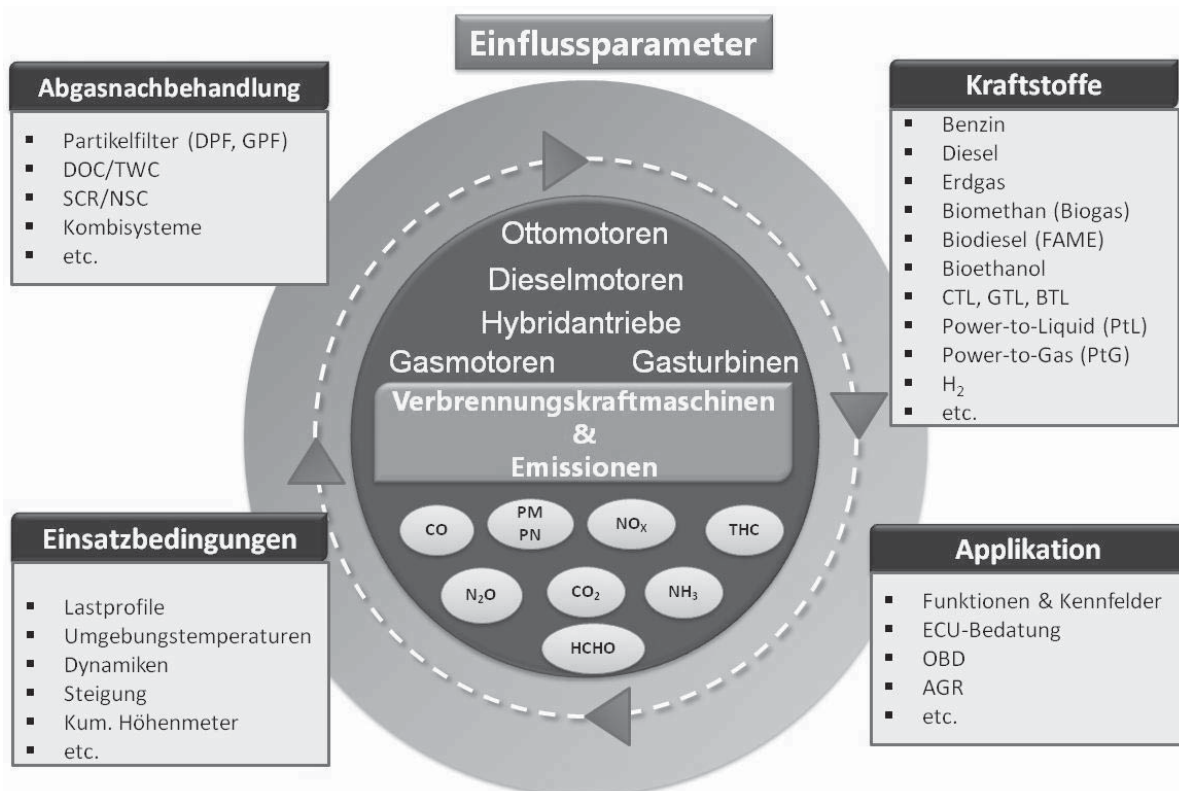


Bild 1: Ganzheitliche Betrachtung der Emissionen und der Abgasnachbehandlung

Höchstmögliche Wirtschaftlichkeit bei geringen Abgasemissionen bleibt auch künftig die Hauptzielrichtung bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren mit verschiedenen Kraftstoffanwendungen. Weltweit strengere Schadstoffnormen erfordern neben der Optimierung vorhandener Motorenkonzepte auch eine Weiterentwicklung der Komponenten und Systeme zur Abgasnachbehandlung. Die kontinuierliche Fortschreibung der Emissionsgesetzgebung zwingt die Motorenhersteller, mit großem technischen Aufwand, sowohl den Ausstoß von Rußpartikeln als auch von Stickoxiden immer weiter abzusenken. Neben der Erfüllung aktueller Emissionsgesetzgebungen muss auch die Effizienz der Motoren weiterhin im Entwicklungsfokus bleiben, denn insbesondere der Kraftstoffverbrauch beeinflusst die Kaufentscheidung der meisten Anwendungen maßgeblich. Zudem müssen künftig die gesetzlichen Auflagen bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen (Bild 2) erfüllt werden.

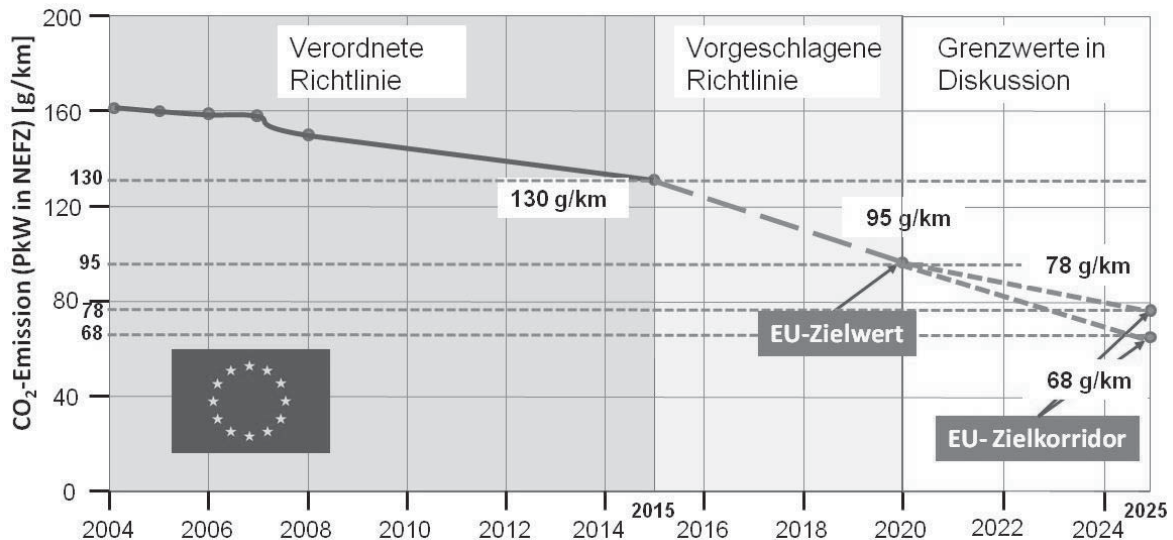


Bild 2: Eingeführte und angekündigte CO<sub>2</sub> – Gesetzgebung in der EU

Die CO<sub>2</sub>-reduzierten Kraftstoffe werden dazu beitragen, dass die Flottengrenze von 95 g CO<sub>2</sub>/km in 2020 erreicht wird. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung hat die EU-Kommission erklärt, eine Folgenabschätzung für einen indikativen Zielkorridor von 68 – 78 g CO<sub>2</sub>/km für Pkw im Jahr 2025 durchführen zu wollen [3].

### 3. Zukünftige Anforderungen an Abgasnachbehandlung

Die strengen globalen Vorgaben zur weiteren Reduzierung der Schadstoffemissionen und Verbesserung der lokalen Luftqualität bedingen einen flächendeckenden Einsatz effizienter Abgasnachbehandlungstechnologien. Trotz der Forderung nach Alternativen und der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges ist eine kontinuierliche und konsequente Weiterentwicklung konventioneller Motoren unerlässlich.

Zukünftige Anforderungen an die Abgasnachbehandlung zeigen weiterhin einen sehr hohen Entwicklungs- und Optimierungsbedarf für diese Technologien. Für die Zukunft bleiben weiterhin eine ganze Reihe Herausforderungen bestehen:

- Eine besondere Schwierigkeit stellt hierbei die Gewährleistung der Systemfunktionalität unter allen Einsatz- und Fahrbedingungen dar.
- Die Niedertemperaturfunktionalität wird in der Zukunft noch wichtiger. Daher soll eine motornahe Anordnung favorisiert werden. Multifunktionale, kombinierte Abgasnachbehandlungstechnologien sind somit unerlässlich.
- Die Abgasnachbehandlung muss praktisch kennfeldweit und unter deutlich verschärften Betriebsbedingungen funktionieren.
- Bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung wird die starke Absenkung der Partikelanzahlmission (PN) die Hauptherausforderung werden.



- Neben den Schadstoffemissionen müssen parallel die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte betrachtet werden.
- Die Motorabstimmung für eine breite Palette von Betriebsbedingungen (Drehzahl, Drehmoment, Temperatur, Höhe, ...) ist erforderlich, um die Emissionsgrenzwerte im realen Fahrbetrieb zu erfüllen.

Durch die Diversifizierung der Kraftstoffe werden neue Anforderungen an die Abgasnachbehandlungstechnologien gestellt. Eine funktionale Anpassung der Abgasnachbehandlung an neue Kraftstoffqualitäten wird erforderlich sein.

Auf dem Gebiet der Qualitätsanforderungen an neue Kraftstoffe, insbesondere Biokraftstoffe sind noch umfangreiche, wissenschaftlich fundierte Untersuchungen an Motoren bzw. Prüfständen erforderlich, wobei Kraftstoff, Motor und Abgasnachbehandlung nicht unabhängig voneinander, sondern als ein Gesamtsystem betrachtet werden müssen [4].

## Literatur

- [1] Zikoridse, G.: Die zukünftige Emissionsgesetzgebung und der Clean Diesel, IAA-Symposium „AdBlue®-Infrastruktur für Pkw“, Frankfurt/Main, 16. September 2013
- [2] Zikoridse, G.: Der Clean Diesel - gibt es noch Herausforderungen?, 12. FAD-Konferenz „Herausforderung-Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“, 5. und 6. November 2014
- [3] Ernst, Ch.-S.; Olschewski, I.; Eckstein, L.: CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020, Management Summary 123320, Aachen, August 2014
- [4] Zikoridse, G.: Anpassung von Abgasnachbehandlungssystemen an neue Kraftstoffe, KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN, Tagung der Fuels Joint Research Group (FJRG), Braunschweig, 24. und 25. September 2014



# Chemical and toxicological characterization of (bio)fuel emission from motorized combustion

---

Karl-Werner Schramm, Jürgen Bünger, Barbara Fey, Josie Kunze, Olaf Schröder, Jürgen Blassnegger, Götz Westphal, Axel Munack, Michael Urbanek, Bernhard Geringer Jürgen Krahl

## Abstract

Complemental chemical and toxicological characterizations were executed on emission samples generated from different motorized combustions of (bio)fuels and their mixtures. Diesel and petrol engines were operated at standardized driving cycles. Besides of limited parameters the data for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), corresponding oxidative stress (EROD), and mutagenicity (AMES) demand for a standardized sampling methodology, optimized for modern vehicle engines.

## Projekt BioE

Im vorliegenden Projekt wurden unlimitierte Emissionskomponenten bei der motorischen Verbrennung von fossilen Treibstoffen, Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen erfasst, und verglichen. Als nichtlimitierte Emissionskomponenten wurde hier die Gruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) sowie das Mutagenitätspotential (AMES) und das Potential der Abgase, oxidativen Stress (EROD: Schramm et al 1999 & 2000) zu erzeugen, bzw. Prämutagene zu bioaktivieren unter Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffe untersucht. Bei den untersuchten Kraftstoffen handelte es sich um die Referenzkraftstoffe fossiler Diesel und fossiles Benzin, sowie die Biokraftstoffe Biodiesel, Bioethanol und Pflanzenöl in Reinform oder in Mischungen mit dem Referenzkraftstoff. (Blassnegger et al. 2009)

### ***Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)***

Beim Betrieb mit Pflanzenöl war sowohl beim EURO V NFZ als auch beim STEP III A Schleppermotor eine Zunahme an PAH im Abgas zu verzeichnen. Die PAH-Emissionen von kaltgepresstem Pflanzenöl lagen dabei geringfügig über denen von Pflanzenöl Vollraffinat. Beim EURO V NFZ nahmen die PAH-Emissionen bei Verwendung von Pflanzenöl um ca. 50% zu und im Falle des STEP III A Schleppermotors lagen die Werte für PAH um ca. 30% höher als bei Verwendung von fossilem Dieselmotorkraftstoff. Die Verwendung von Biodiesel (B100) und Kraftstoffmischungen führte hier im Hinblick auf PAHs zu keinen signifikanten Veränderungen. Die untersuchten Pflanzenölsysteme zeigten bedingt durch teilweisen Dieselmotorbetrieb (2-Tank-System) bzw. durch eine geänderte Applikation (1-Tank-System) zu keiner Veränderung bei den PAH-Emissionen gegenüber PÖL im Serienzustand. Sowohl beim EURO V PKW Dieselfahrzeug als auch beim EURO IV PKW Ottomotorfahrzeug zeigten sich keine erhöhten Werte für PAH-Emissionen. Die Verwendung von Biodiesel bzw. Bioethanol und deren Kraftstoffmischungen zeigte keine signifikante Veränderung der PAH-Emissionen im Vergleich zu fossilem Diesel und fossilem Ottomotorkraftstoff.



### ***EURO V LKW: Mutagenität und oxidativer Stress***

Gemeinsame Untersuchungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, der HS Coburg – FB Physikalische Technik und Allgemeinwissenschaften – und der Universität Göttingen – Zentrum für Arbeits- und Sozialmedizin – (Munack et al. 2005) ergaben an einem Mercedes Benz OM 906 Motor der Emissionsklasse EURO III für Rapsöl eine deutliche Zunahme der Mutagenität (TA 98 mit und ohne Bioaktivierung) der partikularen Phase für Rapsöl gegenüber Dieseldieselkraftstoff. Eine Aktivität von Direktmutagenen konnte für den hier verwendeten EURO V Motor nicht ermittelt werden, jedoch wurde eine Zunahme der Prämutagene für das hier verwendete Pflanzenöl für die verwendeten Teststämme TA98 und TA100 gefunden. Der Unterschied zu dem Referenzkraftstoff Diesel war jedoch nicht so deutlich, was möglicherweise auf die geschilderten Störungen während des ersten Messzyklus mit Dieseldieselkraftstoff zurückzuführen sein kann. Dieser Befund wird durch die rechnerisch ermittelte Mutagenität der PAH als Prämutagene unterstützt.

Der zusätzlich durchgeführte EROD-Assay bestätigt das ermittelte Ergebnis von der PAH-Analyse und dem AMES-Test.

### ***Euro 4 PKW Ottofahrzeug: Mutagenität und oxidativer Stress***

Dass bei diesen Zyklen keine oder nur eine schwache Ausprägung der Mutagenität festgestellt werden konnte, liegt vermutlich auch an der geringen Probenmenge. Der EROD-Assay zeigte auch eine höhere Konzentration an TCDD-Äquivalent wirkenden Stoffen in allen getesteten Kraftstoffen. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass neben der hohen Empfindlichkeit dieses Tests mit diesem Bioassay nicht nur mutagene Substanzen erfasst werden, sondern hauptsächlich Substanzen, die oxidativen Stress verursachen. Bzgl. der Leerwerte bestätigen sich die Hinweise auf eine Erhöhung in allen drei Untersuchungen (AMES, EROD, PAH) und es wird deutlich, dass Probenahmepunkte mit gewisser Entfernung zum tatsächlichen Emissionsort „Auspuff“ weitestgehend vermieden werden sollten. Die stoffliche Ursache der schwachen, jedoch wiederholt festgestellten Mutagenität der auf Ethanol basierenden Kraftstoffe muss deshalb durch weitere Untersuchungen identifiziert, bzw. bestätigt werden.

### ***Euro 5 PKW Dieselfahrzeug: Mutagenität und oxidativer Stress***

Die Mutagenität, die in Dieselmotorproben ermittelt wurde, war sehr gering und knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze für TA98 (20-30 Revertanten pro Platte). Die einzigen Proben, die eine positive Reaktion im AMES-Test zeigten, waren die Proben B7 und B100. Alle anderen Zyklen wiesen Ergebnisse unterhalb der Bestimmungsgrenze auf. Die Studie von Bünger et al. (1998) zeigt ein vollkommen anderes Bild. In dieser Versuchsreihe war die mutagene Wirkung des Diesels deutlich stärker als die des RME. Dies ist vermutlich auf die unterschiedliche Probennahmetechnik zurückzuführen und auf die unterschiedlichen Fahrzeugtypen sowie Abgasnormen.

In der PAH-Analyse zeigen neben B7 und B100 auch die anderen Kraftstoffe einen höheren Gehalt an PAH. Dass diese keine Reaktion im AMES-Test zeigen, ist auf die zu niedrige Konzentration pro Probe zurückzuführen.

Im EROD-Assay zeigten B10 und DK die höchste Konzentration an TCDD Äquivalent wirkenden Stoffen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass wie bereits erwähnt, mit diesem Bioassay nicht ausschließlich mutagene Stoffe detektiert werden. Auch hier bestätigen alle Untersuchungsergebnisse gegenseitig die entsprechend ermittelten Leerwerte und die Bedeutung dieser Problematik.



### **STEP III A Schleppermotor: Mutagenität und oxidativer Stress**

Die Untersuchungen von Munack et al. (2005) ergaben, wie bereits erwähnt, für einen Mercedes Benz OM 906 Motor der Emissionsklasse EURO III für Rapsöl (RÖ) eine deutliche Zunahme der Mutagenität (TA 98 mit und ohne Bioaktivierung) der partikulären Phase gegenüber dem Dieselmotorkraftstoff (DK). Für den hier untersuchten Schleppermotor konnte ein ähnliches, jedoch wesentlich schwächer ausgeprägtes Ergebnis für direkte Mutagenität erzielt werden, da das Revertantenniveau und die Unterschiede zum Dieselmotorkraftstoff deutlich geringer als bei der oben erwähnten Studie ausfallen. Die PAH-Untersuchung zeigte ein ähnliches Bild, wobei der Dieselmotorkraftstoff einen wesentlich höheren Gehalt an PAH aufweist. Im EROD-Assay zeigen DK, B100 und RÖ die höchsten Konzentrationen an TCDD-Äquivalenten Stoffen und somit das höchste Potential für oxidativen Stress.

### **Schlussfolgerungen Projekt BioE**

Die verwendeten Probenahmevolumina (ca. 15 m<sup>3</sup>) wurden bereits groß gewählt, jedoch liegen die Ergebnisse zur Mutagenität immer noch im Bereich der Nachweisgrenze. Somit ist für weitere Arbeiten eine deutliche Erhöhung der Probenvolumina für die Mutagenitätsanalyse anzustreben. Dieses sollte durch Langzeitmessungen realisiert werden, was insbesondere für Fahrzeuge mit einer Abgasnachbehandlung (Euro 4 und 5) relevant ist. Dadurch würde auch der Beitrag des Filter-Ausbrandes zur Gesamtemission Berücksichtigung finden. Der Einfluss von Artefaktbildung in Hochtemperaturzonen der Probenahmeeinrichtungen (Entnahmeeinrichtungen abweichend von VDI-DIN 3499 Blatt 3) und der Abgasnachbehandlung (Nitrierung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) sollte näher beleuchtet werden.

Die Ursache der schwachen, jedoch wiederholt festgestellten Mutagenität der auf Ethanol basierenden Kraftstoffe muss durch weitere Untersuchungen identifiziert werden.

Aufgrund der üblicherweise höheren Varianz biologischer Tests im Vergleich zu physikalisch-chemischen Messungen ist, nach dieser als Übersicht konzipierten Studie, eine Replikations-Statistik am Prüfstand für Motor und PKW vorzusehen. Für stationäre Emittenten wird vom VDI bereits eine Langzeitbeprobung in die Normung überführt, die an dieser Stelle ebenso aufschlussreich sein wird. Um zukünftige Ergebnisse derartiger Testläufe einheitlich bewerten und vergleichen zu können, ist die Standardisierung der Probenahme inkl. Ort der Messstelle, etwa in Anlehnung an die hier bereits durchgeführten Verfahren, unabdingbar.

## **Projekt Probenahme**

Aufgrund der Ergebnisse im Projekt BioE wurden im Rahmen des Projektes „Vergleich zweier Entnahmesysteme zur Probensammlung für Mutagenitätsanalysen“ die Probenahmeapparaturen des Thünen-Instituts (TI) und der Technischen Universität München (TUM) vergleichend an den beiden schon in BioE benutzten Dieselmotoren getestet (Schramm et al. 2014). Bei jedem Motor wurden jeweils Zyklen (NRSC und ESC) mit DK und RÖ gefahren. Die mit den beiden zu prüfenden Probenahmeapparaturen gesammelten Emissionen wurden aufgearbeitet. Mittels des bakteriellen Rückmutationstests (OECD-Guideline 471, Ames-Test) wurde die Mutagenität bestimmt. Alle Tests wurden mit den Teststämmen TA98 und TA100 mit und ohne Bioaktivierungsschritt für prämutagene Substanzen durchgeführt. Chemisch analytisch wurden die





z.T. prämutagenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) vermessen. Um Messfehler auszuschließen, wurden die Analysen in zwei unabhängigen Laboratorien parallel durchgeführt und die Proben inkl. Probenvorbereitung gegenseitig verglichen.

Während die Bestimmung der Mutagenität und die PAH-Analysen der kreuzweise zwischen den Laboratorien ausgetauschten Proben insgesamt gut korrelierten, ergaben sich quantitative und qualitative Unterschiede durch die beiden eingesetzten Entnahmesysteme. So konnten mit dem Probenahmesystem der TUM höhere Konzentrationen der leichter flüchtigen PAH detektiert werden. Die Probenahme mit dem System des TI ergibt in der Relation leicht höhere Konzentrationen der schwerflüchtigen und stärker mutagenen PAH. Der Schleppermotor weist für beide Kraftstoffemissionen ähnliche Konzentrationen an PAH auf. Jedoch konnten auch für diese Messreihe die o.g. beschriebenen Unterschiede der Entnahmesysteme festgestellt werden.

Leerproben, die zwischen dem Prüfstandsbetrieb bei abgeschaltetem Motor (Schleppermotor) bzw. aus der Ansaugluft (NFZ-Motor) als Kontrollproben erzeugt wurden, ergaben hinsichtlich PAH höhere Werte für beide Motoren als zu erwarten war, so dass offenbar durch Memoryeffekte (z.B. Verbrennungsreste im abgeschalteten Motor) sowohl mit PAH als auch mit Mutagenität in derartigen Proben zu rechnen ist.

Der Teststamm TA98 zeigte für den NFZ-Motor eine mehrfach erhöhte Mutagenität für RÖ im Vergleich zu DK. Im weniger sensitiven Stamm TA100 war dieser Effekt ebenfalls deutlich zu beobachten. Bei der Untersuchung der Proben, die mit dem Schleppermotor erzeugt wurden, trat dieses Phänomen nicht auf, aber es wurde eine geringfügige Erhöhung der Mutagenität für DK beobachtet. Der mit RÖ betriebene NFZ-Motor emittierte deutlich höhere Mengen an PAH im Vergleich zu DK.

Die Ergebnisse des Ames-Tests belegten für die Laboratorien Bochum/Göttingen und München eine sehr gute Übereinstimmung. Einflüsse die durch die unterschiedlichen Handhabungen bei der Durchführung der gesamten Untersuchungsmethodik auf das Ergebnis entstehen können, können somit vernachlässigt werden.

Die vorherigen Ergebnisse von Blassnegger et al. 2009 und Bünger et al. 2007 wurden bestätigt.

## **Schlussfolgerungen Projekt Probenahme**

### *Vergleich der Motoren*

Die im Vergleich zu DK erhöhte Mutagenität der Emissionen bei Verbrennung von RÖ im serienmäßigen NFZ-Motor (Bünger et al. 2007) wurde ebenso bestätigt, wie die Vermeidung dieses Effekts durch Anpassung des Schleppermotors mit einem Pflanzenölsystem, welches in Kooperation mit dem Schleppermotorhersteller (John Deere) entwickelt wurde (Blassnegger et al. 2009).

### *Vergleich der Entnahmesysteme*

Die getesteten Entnahmesysteme besitzen individuelle Ausprägungen bei der Selektivität der relevanten Abgaskomponenten. Das Probenahmesystem des TI erzielt eine signifikant höhere Gesamtmasse an PAH vorwiegend im Bereich der partikelgebundenen PAH. Im direkten Vergleich dazu erwies sich die Probenahmeapparatur der TUM als sensitiver im Bereich der leichtflüchtigen PAH und ergab einen deutlich höheren Gehalt an ein- bis dreikernigen PAH im Analytenmuster. Das TUM-Entnahmesystem erzeugt dazu allerdings in vergleichbarer Zeit etwa das 10-fache Probenvolumen. Die Mutagenität der Proben liegt im direkten Vergleich tendenziell im Trend der PAH-Befunde. Bei den durchgeführten Analysen wurden aber mit der Probenahmeapparatur



des TI stärkere mutagene Effekte nachgewiesen als für das Entnahmesystem der TUM. Mögliche Ursache könnte die sekundäre Erzeugung von mutagenen PAH im Sammelsystem des TI sein.

#### *Leerproben und Versuchsdesign*

Bei den Messungen am Tier III / EU 3A Schleppermotor wurde die Luft für die Entnahme der Leerproben durch den heißen Motor gezogen. Hierbei kann es zur Desorption von angelagerten Verbindungen gekommen sein.

Bei den Messungen am EURO III NFZ Motor (OM 906 LA) wurden beide Leerproben nach der Messung von Rapsölproben genommen. Da die Rapsölproben sehr hoch belastet waren, kann es durch unzureichende Reinigung im Falle des TI-Probenahmesystems zu Verschleppungen in die Leerproben gekommen sein.

Insofern ist den Leerproben und dem Design von Messkampagnen besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da derartige Prozedere bislang weder festgelegt noch harmonisiert worden sind.

## **Zusammengefasster Handlungsbedarf**

Aufgrund der signifikanten qualitativen und quantitativen Unterschiede der beiden Entnahmesysteme, die beide grundsätzlich jedoch zur Sammlung von PAH und Mutagenität aus Kraftstoffemissionen geeignet sind, ist für die Durchführung zukünftiger Untersuchungen zur stofflichen und wirkungsorientierten Entnahme von Abgasen aus Kraftfahrzeugen eine Harmonisierung der Vorgehensweise erforderlich. Die eingesetzten Entnahmen besitzen in unterschiedlichen Bereichen Vor- und Nachteile, die es nur bedingt ermöglichen, vergleichbare bzw. absolute Aussagen über Konzentration und Effekte der analysierten Komponenten zu treffen. Deshalb erscheint es notwendig, dass Untersuchungen erfolgen, nach denen abgesteckt werden kann, wie die Vorteile der Entnahmesysteme sinnvoll zusammengeführt werden können. Zielsetzung ist, ein robustes und im Hinblick auf die Nachweisbarkeit leistungsstarkes Probenahmeverfahren zu entwickeln - bestehend aus einer exakt zu beschreibenden Apparatur und einer Standardarbeitsanweisung (SOP) zur Probenahme -, welches verlässliche Abschätzungen über die Inhaltsstoffe von Motorenemissionen und deren Wirkungen in biologischen Kurzzeittests ermöglicht.

## **Literatur**

- Blassnegger, J.; Urbanek, M.; Wörgetter, M.; Knauer, M.; Kunze, J.; Nießner, G.; Schramm, K.-W.; Geringer, B. (2009) Endbericht zum Projekt BioE Untersuchung: „Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen“; Fachagentur nachwachsende Rohstoffe; FKZ 114-50.10.0077/07-E
- Bünger, J.; Krahl, J.; Franke, H.-U.; Munack, A.; Hallier, E.: (1998) Mutagenicity and cytotoxic effects of exhaust particulate matter of biodiesel compared to fossil diesel fuel; *Mutation Res.*, 415, 13-23
- Bünger J, Krahl J, Munack A, Ruschel Y, Schröder O, Emmert B, Westphal G, Müller M, Hallier E, Brüning T (2007) Strong mutagenic effects of diesel engine emissions using vegetable oil as fuel. *Arch Toxicol* 81, 599-603
- Munack, A.; Herbst, L.; Kaufmann, A.; Ruschel, Y.; Schröder, O.; Krahl, J.; Bünger, J.: (2005) Vergleich von Shell Mittel-Destillat, Premium-Dieselmotorenkraftstoff und fossilem



Dieseldieselkraftstoff mit Rapsölmethylester; FAL Abschlussbericht; Braunschweig, Coburg und Göttingen

OECD: Guideline for testing of chemicals 471, bacterial reverse mutation test, 1997

Schramm, K.-W., Hofmaier, A., Klobasa, O., Kaune, A., Kettrup, A. (1999) Biological in vitro emission control. J. of Analytical and Applied Pyrolysis 49, 199-210

Schramm, K.-W., Klimm, C., Hofmaier, A., Kettrup, A. (2000) In vitro investigation of dioxin-like-response and micronuclei on domestic and industrial emissions and materials. J. Trace and Microprobe Techniques 18, 209-220

Schramm, K.-W.; Kunze, J; Blassnegger, J; Bünger, J; Westphal, G; Munack, A; Fey, B; Krahl, J (2014): Vergleich zweier Entnahmesysteme zur Probensammlung für Mutagenitätsanalysen. Göttingen: Cuvillier, 69 Seiten, Fuels Joint Research Group 9



# The impact of increasing the blend ratio on engine emission associated toxicity

---

Miriam Gerlofs-Nijland, Wendy Vercrujisse, Paul Janssen, Ingeborg Kooter, Aleksandra Jedynska, Paul White, Jürgen Bünger, Gerrit Kadijk, Gertjan Koornneef, Flemming Cassee

## Abstract

Automotive emissions are the dominating source suspected to contribute to adverse health effects of air pollution. This has led to increasingly tighter emissions standards, advances in engine and emission control technologies, and the use of new (bio)fuels. However, stimulation of biofuel use will lead to changes in the chemical composition of engine exhaust emissions and the toxicity of the emission needs to be assessed. In this paper, the implication of increasing the blend ratio of biodiesel on engine emissions associated toxicity will be discussed based on the existing knowledge. This review of the toxicological assessments of emissions from biofuels and blends shows the importance of an effective hazard identification methodology for risk assessment to reveal the impact of biofuel (blends).



# Sensor zur Erkennung der Kraftstoffqualität

---

Mustafa Eskiner, Michael Rossner, Jürgen Krahl

## Abstract

A method based on dielectric relaxation spectroscopy is introduced for determination of fuel quality. For determination of the real and imaginary part of the permittivity, a small-sized interdigital capacitor was developed. In plug-in hybrid cars, emergency backup generator or on boats the storage time of fuel in the fuel tank is expected to be expressively longer than normal. Therefore, the fuel long-term stability is of particular importance. By means of dielectric relaxation spectroscopy, high-molecular oxidation products, such as oligomers from aged fuels that are considered as precursors for deposits can be detected easily.

## 1. Motivation

Die Reduktion von klimaschädlichen Emissionen steht auf politischer Ebene im Vordergrund, weil die entstehenden Treibhausgase zur globalen Erderwärmung und zur Minderung der Luftqualität beitragen. Es sind effektive Maßnahmen erforderlich, um die im Zusammenhang mit der Mobilität entstehenden Umweltbelastungen zu lösen. Zur Erfüllung der Ziele sind im Transportsektor Strategien schon teilweise eingeführt, gefördert oder langfristig aussichtsreich. So wurde auf Grundlage des Biokraftstoffquotengesetzes 2008 eine Dieselkraftstoffnorm eingeführt, die umgeesterte Pflanzenöle, sog. Fettsäuremethylester (Abk.: FAME – Fatty Acid Methyl Ester) Beimischungen (englisch: Blends), im Dieselkraftstoff erlaubt (BioKraftQuG). Neben CO<sub>2</sub>-Neutralität, einer schwefelfreien Verbrennung und Verfügbarkeit eignen sich FAME besonders gut, um als regenerativer Anteil im fossilen Kraftstoff eingesetzt zu werden.

Im Fokus des Gesetzgebers stehen aber auch alternative Antriebe. So konnten Elektrofahrzeuge in den letzten Jahren zunehmend an Marktanteile gewinnen. Während 2010 in Deutschland 541 Elektroautos zugelassen wurden, stieg die Anzahl der Zulassungen 2015 auf über 12.000 Elektrofahrzeuge [1]. Reine Elektrofahrzeuge unterliegen derzeit aber noch dem Nachteil, in ihrer Reichweite begrenzt zu sein. Daher setzen die Automobilhersteller verstärkt auf Hybridfahrzeuge: Besonders der Plug-in Hybrid-Pkw, der einen Verbrennungs- und Elektromotor kombiniert, ist für Kurz- und Langstrecken gleichermaßen geeignet und bietet damit gegenüber konventionellen reinen Elektrofahrzeugen einen eminenten Vorteil. Aus diesem Grund wird der Verbrennungsmotor – ob nun unterstützend im Plug-in Hybrid, aber auch konventionell allein stehend – in den nächsten Jahrzehnten sehr wahrscheinlich weiterhin dominieren.

Das Effizienzpotential des Verbrennungsmotorantriebs – insbesondere mit Blick auf den darin genutzten Kraftstoff – ist aber noch längst nicht ausgeschöpft: Neueste



Untersuchungen zeigen, dass neuartige Kraftstoffformulierungen das CO<sub>2</sub> Einsparungspotential um bis zu 17% erhöhen, wenn der regenerative Anteil erhöht wird [2]. Damit dürfen Kraftstoffe als motorisches Konstruktionselement angesehen werden, das zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen kann. Es muss aber garantiert sein, dass Kraftstoffe weiterhin mit allen Fahrzeugtypen kompatibel sind – insbesondere, wenn mit erhöhten Verweilzeiten im Fahrzeugtank gerechnet werden darf: In der Regel reicht die Leistung des Akkumulators für den Alltagsbetrieb in Plug-in Hybridfahrzeugen aus, da 80 Prozent der täglich zurückgelegten Strecken in Europa eine Distanz kleiner 50 km haben [3] und damit noch innerhalb der Reichweite im Batteriebetrieb liegen. Sind höhere Leistungsreserven notwendig, hierzu zählen plötzliche Beschleunigungsmanöver oder längere Autobahnfahrten, kann der Verbrennungsmotor unterstützend zugeschaltet werden. Im alltäglichen Fahrtzyklus des Plug-in Hybrids darf damit mit erhöhten Verweilzeiten des Kraftstoffs im Fahrzeugtank gerechnet werden. Es ist bekannt, dass regenerative Kraftstoffkomponenten Degradationsprodukte bilden können [4][5][6][7], die mit einer Änderung in den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes einhergehen. Solche Degradationsprodukte entstehen bevorzugt dann, wenn mit erhöhten Verweilzeiten gerechnet werden kann, wie Beispiele aus Marine und der Ersatzstromversorgung schon jetzt verdeutlichen [8][9].

## 1.1 Aufgabenstellung

Der sichere Betrieb in jeder Maschine und Anlage (Plug-in Hybrid, Notstromaggregate, Boote/Skipper), darf zu keinem Fall gestört werden. Mit erhöhten Verweilzeiten können Kraftstoffe Degradationsprodukte bilden und einen sicheren Betrieb gefährden. Die Aufgabe besteht darin, mittels eines Sensorprüfstandes Degradationsprodukte in Kraftstoffen, insbesondere in Blends, frühzeitig zu erkennen. Langfristig könnten die darin gewonnenen Ergebnisse in die Entwicklung eines On-board Sensors fließen, der in Tanksystemen implementierbar wäre. Für dann Fall Plug-in Hybrid könnte dann eine Optimierungsstrategie ausgelegt werden, die erste alterungsbedingte Veränderungen im Kraftstoff sensorisch erkennt und die Verbrennung innermotorisch auf den Kraftstoff anpasst.

## 2. Dielektrische Relaxationsspektroskopie

Das patentierte Verfahren erfasst die frequenzabhängige dielektrische Signal, welches gezielt den Degradationsgrad erkennt [10]. Die aktuelle Entwicklungsstufe ist ein kleiner Sensorprüfstand bestehend aus einem Interdigital-Kondensator mit meanderförmigen Elektrodenstruktur. Das Messverfahren beruht im Detail auf der dielektrischen Relaxationsspektroskopie und nutzt die Trägheit höhermolekularer Oxidationsprodukte.

Definitionsgemäß kann die allgemeine Permittivität in eine reale und imaginären Anteil unterteilt werden (1), wobei  $\omega = 2\pi f$  die angelegte Kreisfrequenz des elektrischen Wechselfeldes darstellt und  $T$  die Temperatur des Dielektrikums. Der reale Teil – übli-



cherweise bekannt als die Dielektrizitätskonstante – ist mit der im Dielektrikum verursachten Polarisationsmechanismen (z.B. Orientierungs-, Verschiebungs- oder Grenzflächenpolarisation) verknüpft. Die mit der Polarisation verursachten Verluste (Reibungswärme) werden mit dem Imaginärteil erfasst.

$$\varepsilon_r(\omega, T) = \varepsilon_r'(\omega, T) - i\varepsilon_r''(\omega, T) \quad (1)$$

Tritt eine Frequenzabhängigkeit der Permittivität im höheren Frequenzbereich auf, kann dies auf einen Kraftstoff mit Degradationsprodukten hinweisen. Denn: sind Vorläufer der meist zu Ablagerung führenden polaren höhermolekularen Oxidationsprodukte durch die Degradation des Kraftstoffs entstanden, sind diese im höheren Frequenzbereich zu träge (Relaxation), was sich in der Abnahme des Realteils der Permittivität bzw. in der Zunahme des Imaginärteils widerspiegelt.

### 3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Biodiesel (Rapsölmethylester, RME) wurde unter simulierten Bedingungen bei 110 °C und 10 L/h bis zu zwölf Stunden beschleunigt gealtert. Im stündlichen Intervall wurde nach jeder Degradationsstufe eine Probe für weitere Analysen entnommen. Für diese Proben wurden dann im Sensorprüfstand der Real- und Imaginärteil der Permittivität erfasst. Der Imaginärteil ist dem Realteil vorzuziehen, da dieser sensitiver ist [11]. Es wird daher hier nur noch auf den Imaginärteil der Permittivität eingegangen. Mittels Gelpermeationschromatographie (GPC) konnte die Entstehung von höhermolekularen Degradationsprodukten gezeigt werden.

Bild 1 zeigt die Zunahme des Imaginärteils bei 10 °C und 13 MHz und den Flächenanteil des Oligomerbereichs ab 425 bis 3000 g/mol aus den GPC-Untersuchungen. Für beide Kurven wurde eine Induktionszeit von 6,7 Stunden ermittelt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Vergleichbarkeit zwischen den GPC-Untersuchungen und den Messungen des Imaginärteils der Permittivität im Hochfrequenzbereich (hier: 13 MHz). Im mittleren Frequenzbereich (KHz bis <1 MHz) konnte eine derartige Korrelation nicht beobachtet werden. Das Ergebnis zeigt, dass die Messung des Imaginärteils geeignet ist, gezielt Oligomere Strukturen im Kraftstoff zu erkennen, wenn eine geeignete Frequenz gewählt wird.



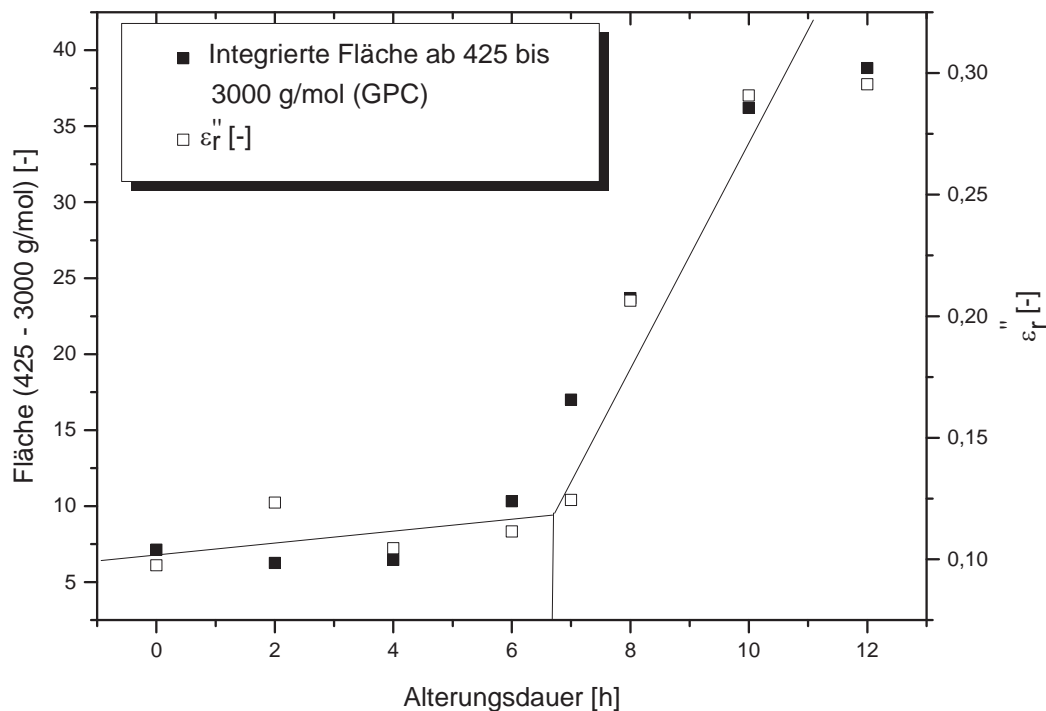


Bild 1: Oligomer-Entstehung im Kraftstoff – Vergleich zwischen Sensorsignal ( $\epsilon_r''$  bei 13 MHz und 10 °C) vs. Gelpermeationschromatographie

## Literatur

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt (2016), Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2016. In Statista - Das Statistik-Portal. Zugriff am 11. März 2016, von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>.
- [2] Götz, K., Zickmann, S., Fey, B., Bünger, J., Stapf, W., Fan, Z., Garbe, T., Munack, A., Krahl, J. (2015) Diesel R33. Band 15 (Hrsg.: Krahl, J., Munack, A., Eilts, P., Bünger, J.), 192 S. ISBN 978-3-7369-9169-9
- [3] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., Olschewski, I. (2010) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen, Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-8348-0847-9, S. 57
- [4] Fang, H.L. und McCormick, R.L. (2006) Spectroscopic Study of Biodiesel Degradation Pathways. SAE Technical Paper 2006-01-3300
- [5] Peyton, K., McGinnis, T., und Bureman, P. (2008) Preventing Sediment Formation in Stored Biodiesel Fuel Blends. Biodieselmagazine



- [6] Schmidt, L. (2014) Wechselwirkungen zwischen Kraftstoffkomponenten in biodieselbasierten Mischkraftstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Alterungsprodukte von Fettsäuremethylestern. Fuels Joint Research Group, Band 6 (Hrsg.: Krahl, J., Munack, A., Eilts, P., Bünger, J.), 225 S
- [7] Terry, B., McCormick, R.L., und Natarajan, M. (2006) Impact of Biodiesel Blends on Fuel System Component Durability. SAE Technical Paper 2006-01-3297
- [8] [www.tec4fuels.com/app/download/19088139/Brosch%C3%BCre\\_Qualitaetsueberwachung\\_von\\_Brennstoffen+final.pdf](http://www.tec4fuels.com/app/download/19088139/Brosch%C3%BCre_Qualitaetsueberwachung_von_Brennstoffen+final.pdf)
- [9] [http://www.boot.de/cipp/md\\_boot/custom/pub/content,oid,46848/lang,1/ticket,g\\_u\\_e\\_s\\_t/local\\_lang,1](http://www.boot.de/cipp/md_boot/custom/pub/content,oid,46848/lang,1/ticket,g_u_e_s_t/local_lang,1)
- [10] Verfahren zur Quantifizierung der Oxidationsstabilität eines Kraftstoffes – Anmelde­nummer: DE102014016169.2
- [11] Collister, C.J. (1998) Electrical measurement of oil quality, WO 98/50/790





# **Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**

## **2. Tagung der Fuels Joint Research Group**

### **Poster-Wettbewerb**

Sponsor: Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.





# Comparative study of fuel mixtures and their effect on composition of combustion products of Diesel engine

---

Mehdi Bagheri

## Abstract

The current study investigates the effect of use of alternative fuels as well as their addition to conventional Diesel fuel on concentration of combustion products of Diesel engine. A very fast algorithm was developed in Microsoft Visual C# that can calculate the mole fraction of combustion products in a fraction of a second. The combustion products are assumed to be composed of the following 18 species: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O, O<sub>3</sub>, H, OH, C, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCN and N. Different hydrocarbons and their mixtures at different rates and also at different combustion pressures, temperatures and equivalence ratios can be introduced to the code as input parameters.

Applying the code It was found that addition of 20% ethanol could decrease the concentration of species C, CO, HCN and simultaneously increase the concentration of O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub>. It was also found that a further addition of ethanol to a rate of 40% could triple the concentration changes in both directions. It can be reasoned in this way, that addition of fuels which contain oxygen atoms will improve the oxidation process of CO and C, which results in a lower concentration of these species. While on the other hand it could also increase formation process of Nitrogen containing species especially at high temperatures.

It was also observed that, addition of same amounts of Methanol causes a slightly greater decrease in concentration of C, CO and HCN. However this could result in a noticeable increase of 3.5% in concentration of NH<sub>3</sub> when adding 40% Methanol in comparison with 2.9% increase for the case of ethanol at the same addition rate.

The results obtained from this algorithm were compared with the globally accepted STANJAN code and showed a very low deviation of 1%.

## Literatur

- [1] Heywood, J. B. (1988), Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York
- [2] Ferguson, C. R. (2016), Internal Combustion Engines Applied Thermosciences, Wiley, Chichester
- [3] Borgnakke, C. (2013), Fundamentals of Thermodynamics, Wiley, Michigan
- [4] Sahin Z., Durgun O.(2008), Multi-zone combustion modeling for the prediction of Diesel engine cycles and engine performance parameters, Applied Thermal Sciences Vol. 28 (2245–2256)
- [5] Juntarakod P. (2014), A Quasi-dimensional Three-zone Combustion Model of the Diesel Engine to Calculate Performances and Emission Using the Diesel-Ethanol Dual Fuel, Contemporary Engineering Sciences, Vol. 7, No. 1



# Synthesis of oxymethylene dimethyl ethers (OMEs): soot reducing diesel additives from renewable resources

Philipp Haltenort

## Abstract

Regarding new emission standards (e.g. Euro VI), crucial challenges emerge for diesel engines. Especially soot emissions necessitate a sophisticated exhaust gas aftertreatment. Oxymethylene dimethyl ethers (OMEs) reduce soot formation during the combustion process [1]. Due to their physico-chemical properties, OMEs are well suited as diesel additives [2]. If OMEs are produced from renewables, they can contribute to a reduction of soot as well as CO<sub>2</sub> emissions. The originally included oxygen of biomass feedstocks can remain to some extent in the product so that synthesis with high energy efficiency and atom economy is possible. However, sustainable production on industrial scale is not established yet and thus, research in the field of OMEs concentrates on the development of a highly optimized synthesis procedure. Main synthesis strategies are outlined in Figure 1 [3].

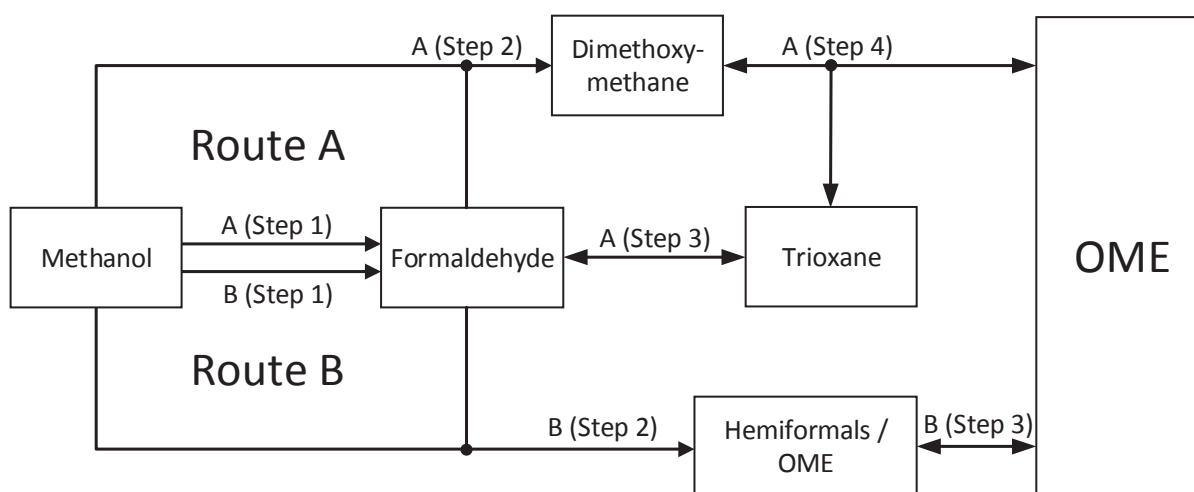


Figure 1: Synthesis routes for OMEs.

According to route A, OMEs are synthesized in an equilibrium reaction from dimethoxymethane and trioxane. Overall, OMEs are produced in four steps from methanol via formaldehyde. In recent years, this approach was investigated in detail [4-6] and highly optimized [7]. OME synthesis according to route B is based on an equilibrium reaction of methanol with formaldehyde to hemiformals and OMEs in aqueous media. It is a three-step process and no additional intermediates except formaldehyde are required, which makes this synthesis route advantageous [8-11]. Within this work, the different synthesis routes are compared focusing on kinetics, selectivity and equilibria. Furthermore, techniques for the separation of OME fractions from the reaction mixtures are discussed.





## Literatur

- [1] Härtl, M., Seidenspinner, P., Wachtmeister, G., Jacob, E., *MTZ – Motortechnische Zeitschrift* 75, 7 (2014): 68-73.
- [2] Lautenschütz, L., Oestreich, D., Seidenspinner, P., Arnold, U., Dinjus, E., Sauer, J., *Fuel* 173, 1 (2016): 129-37.
- [3] Jacob, E., Maus, W., Internationaler Motorenkongress 2016 (2016): 513-16, Springer.
- [4] Burger, J., Siegert, M., Ströfer, E., Hasse, H., *Fuel* 89, 11 (2010): 3315-19.
- [5] Burger, J., *Dissertation* (2012) TU Kaiserslautern.
- [6] Burger, J., Ströfer, E., Hasse, H., *Chemical Engineering Research and Design* 91, 12 (2013): 2648-62.
- [7] Lautenschütz, L., *Dissertation* (2015) Universität Heidelberg.
- [8] Arnold, U., Lautenschütz, L., Oestreich, D., Sauer, J., *DGMK-Tagungsbericht 2015-2* (2015): 127-36, DGMK.
- [9] Sauer, J., Arnold, U., Dahmen, N., Internationaler Motorenkongress 2016 (2016): 489-504, Springer.
- [10] Schmitz, N., Homberg, F., Berje, J., Burger, J., Hasse, H., *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54, 25 (2015): 6409-17.
- [11] Schmitz, N., Burger, J., Hasse, H., *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54, 50 (2015): 12553-60.



# GKI – Gasoline Knock Index

## Neues Klopfestigkeitsprüfverfahren

---

Johann Hauber, Karl Huber

### Abstract

Die Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen ist eine der bedeutendsten Eigenschaften für den motorischen Einsatz und limitiert den maximal erreichbaren Wirkungsgrad. Die zugehörigen Kennwerte werden traditionell in Form von zwei motorischen Prüfverfahren zur Bestimmung der Oktanzahl (RON, MON) ermittelt. Anhand umfangreicher Untersuchungen der standardisierten Verfahren konnte nachgewiesen werden, dass die Kraftstoffbewertung nicht auf Basis der schädigenden Druckamplituden im Brennraum erfolgt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein dem Stand der Technik entsprechendes motorisches Verfahren zur Klopfestigkeitsbestimmung einschließlich der erforderlichen spezifischen Motorsteuerungsfunktionen entwickelt. Der bereits zur Oktanzahlbestimmung eingesetzte CFR-Einzylindermotor, der über eine im Betrieb veränderliche Verdichtung verfügt, bildet dabei eine robuste Grundlage für das neue Prüfverfahren.

Den Verfahrenskern stellt eine Zylinderdruckindizierung mit integrierter Online-Druckverlaufsanalyse dar. Als neues Maß für die Klopfestigkeit dient nun das maximal erzielbare Verdichtungsverhältnis, bei dem die Verteilungsfunktion der maximalen Klopfdruckamplitude einen bestimmten Wert überschreitet.

Hinsichtlich der Prozessführung wurde eine für unterschiedliche Kraftstoffe geeignete Gemischbildung mittels Saugrohreinspritzung gewählt, wobei mittels integrierter Lambdaregelung eine stöchiometrische Gemischzusammensetzung eingestellt wird. Diese Einstellung ist der weltweit verbreiteten Betriebsstrategie von aktuellen Ottomotoren mit 3-Wege-Katalysator geschuldet, die im Hauptbereich des Motorkennfelds so betrieben werden. Eine aktive Zündwinkelregelung auf konstanten Umsatzzschwerpunkt kompensiert unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten der zu prüfenden Kraftstoffe und stellt somit sicher, dass die ausgewiesene neue Kraftstoffkennzahl (GKI – Gasoline Knock Index) die Leistungsfähigkeit eines Kraftstoffs in aktuellen Ottomotoren mit bestmöglicher Übertragbarkeit beschreibt.





# BioFIRE – Biogenic Fuel Ignition Research

## Motorisches Zündwilligkeitsprüfverfahren

---

Johann Hauber, Karl Huber

### Abstract

Die Cetanzahl als dimensionslose Kenngröße für die Zündwilligkeit ist bei Dieselmotoren ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Sie ist sowohl in der Motorenkonstruktion zur Festlegung der Mindestkompression für den Kaltstart von Bedeutung, als auch im Motorbetrieb, da sie das Geräusch- und Abgasverhalten von Dieselmotoren maßgeblich beeinflusst. Prüfverfahren zur Bestimmung der Zündwilligkeit sind somit von integraler Bedeutung für den fehlerfreien Betrieb von Dieselmotoren.

Im Rahmen des von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) geförderten Projekts „BioFIRE“ (Biogenic Fuel Ignition Research, FKZ 22010410) konnte eine neue Methode zur Bewertung der Zündwilligkeit von konventionellen, wie auch biogenen Dieselmotoren in einem motorischen Prüfverfahren erarbeitet werden. Sie basiert auf dem BASF-Prüfdiesel (DIN 51773), wobei sie sich maßgeblich von den bestehenden Verfahren, die mit konstanten Zündverzügen arbeiten, unterscheidet.

Die Bewertung der Zündwilligkeit erfolgt hierbei mittels der kraftstoffindividuellen Zündverzugszeit, die erstmals auf Basis des aus der Druckverlaufsanalyse berechneten Brennverlaufes bestimmt wird. Die Kraftstoffprüfung wird bei konstanten und damit untereinander besser vergleichbaren äußeren Betriebsbedingungen wie Saugrohrdruck und Verdichtungsverhältnis durchgeführt. Abweichungen hinsichtlich der Betriebspunktrandbedingungen wirken sich entsprechend auf Brennraumdruck und -temperatur aus und werden implizit durch einen inversen Arrheniusansatz hinsichtlich ihres Einflusses auf den Zündverzug kompensiert. Nach erfolgter Kalibration des Motors mit zwei Referenzkraftstoffen kann der Wert des Zündintegrals bei Brennbeginn direkt in die zugehörige Cetanzahl umgerechnet werden. Durch diese Modifikationen gelang es somit erstmals in einem motorischen Prüfverfahren, auch Pflanzenöle hinsichtlich ihrer Zündwilligkeit zuverlässig zu bewerten und die Neigung zur Verkokung der Einspritzdüse bei FAME-Betrieb zu vermeiden.



# Untersuchungen zur Schlamm- bildung im Motoröl beim Einsatz biogener Kraftstoffe

Markus Knorr, Jürgen Krahl

## 1. Motivation

Für moderne Dieselfahrzeuge ist der Einsatz eines Dieselpartikelfilters (DPF) zum Erreichen der aktuell gültigen Abgasnormen unerlässlich. Bei der Regeneration des DPF kann unverbrannter Dieselkraftstoff in das Motoröl gelangen. Der eingetragene mineralische Dieselkraftstoff dampft aufgrund seiner niedrigen Siedelinie zum größten Teil wieder aus dem Motoröl aus. Dagegen verbleibt Biodiesel aufgrund seiner hohen Siedelinie im Motoröl und kann zur Ölschlamm- bildung führen. Aus diesem Grund ist eine Verringerung des Ölwechselintervalls bei der Nutzung von Biodiesel notwendig. In den Arbeiten von Schumacher (2013) und Dugmore (2011) wurden Versuche mit Modellsubstanzen durchgeführt um den Einfluss einzelner Stoffgruppen bei der Ölschlamm- bildung in Motoröl-Kraftstoff-Gemischen zu untersuchen. Es wurden ebenfalls Untersuchungen mit Grundöl, also unadditiviertem Motoröl, mit verschiedenen Biodieselsorten und neuen biogenbasierten Dieselkraftstoffen wie *Diesel R33* durchgeführt (Singer et. al, 2014; Singer et. al, 2015, Knorr et. al., 2016).

## 2. Grundlagen

### 2.1. Alterungsverfahren

Die Proben wurden thermooxidativ gealtert. Dazu wurde ein Biodieselerancimat der Firma Metrohm verwendet. Die Alterungen wurden bei 110 °C bzw. 170 °C über 24 Stunden mit einem Luftfluss von 10 L/h durchgeführt.

### 2.2. Modellsubstanzen

Um die Reaktionsmechanismen bei der Ölschlamm- bildung im Vielstoffgemisch „Motoröl“ zu verstehen, werden nicht additivierte Motoröle – sogenannte Grundöle – und Modellsubstanzen eingesetzt. Als Modellsubstanz, die das Grundöl darstellen soll, wurde Squalan eingesetzt (Abbildung 3).

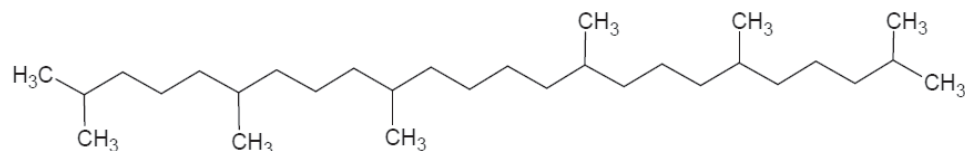


Abbildung 3: Modellsubstanz: Squalan

Als Biodiesel wurde Rapsölmethylester (RME) verwendet, da dieser sowohl einfach als auch mehrfach ungesättigte Verbindungen enthält. Ebenfalls wurde mineralischer



Dieseldieselkraftstoff mit in die Untersuchungen einbezogen und dabei auch durch Modellsubstanzen ersetzt.

Diese bilden die fünf am häufigsten vorkommenden Stoffgruppen im Dieseldieselkraftstoff ab (Abbildung 4).

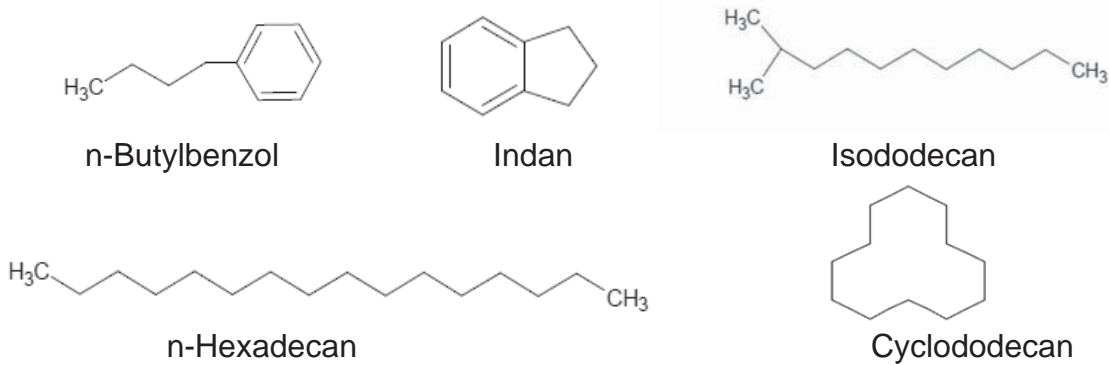


Abbildung 4 Modellsbstanzten des *Modelldieseldieselkraftstoffs* (MDK)

### 3. Ergebnisse

Im ersten Versuchsblock wurden die Reinproben von Squalan und Grundöl untersucht. Im Folgenden ist der Vergleich zwischen den 0 Stunden Proben und den bei 170 °C 24 Stunden gealterten Proben beispielhaft anhand der Ergebnisse der gelpermeationschromatographischen (GPC) Untersuchungen und der Viskositätsmessungen gezeigt.

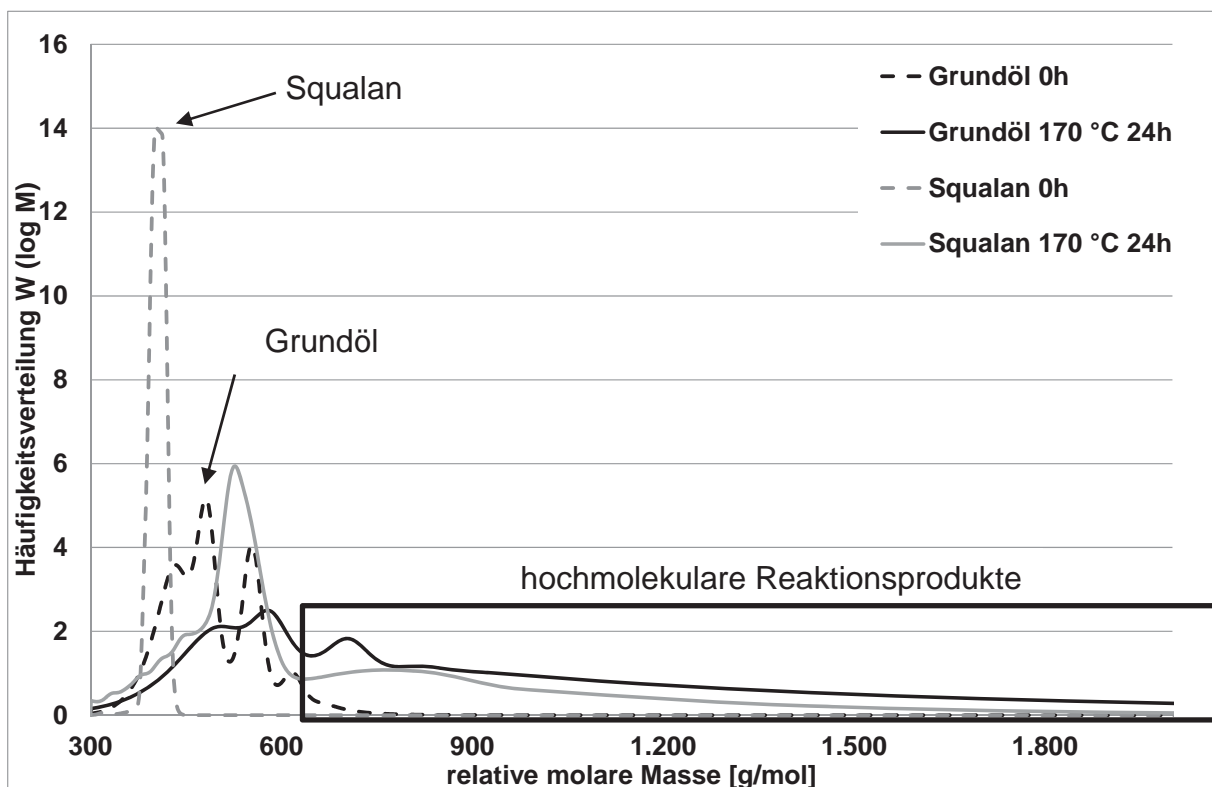


Abbildung 5: GPC-Ergebnisse der thermooxidativ gealterten Proben



Der markierte Bereich in Abbildung 5 zeigt die Bildung von hochmolekularen Reaktionsprodukten nach 24 Stunden Alterung. Squalan und Grundöl weisen ähnlich große Reaktionsprodukte auf. Dies ist ein Anzeichen für ähnliche Reaktionsverläufe.

Mit größer werdenden Reaktionsprodukten kann eine Erhöhung der Viskosität beobachtet werden.

Die Alterungsprodukte von Grundöl und Squalan zeigen im Vergleich zu den 0 Stunden Proben einen starken Viskositätsanstieg (Abbildung 6). Für Grundöl steigt die kinematische Viskosität um  $262 \text{ mm}^2/\text{s}$  und für Squalan um  $223 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Der stärkere Anstieg der Viskosität von Grundöl gegenüber Squalan deckt sich mit dem stärkeren Anstieg der relativen Molekülgrößen der untersuchten Proben aus den GPC-Ergebnissen. Detailliertere Untersuchungen der gebildeten Reaktionsprodukte erfolgten in weiteren Versuchsreihen.

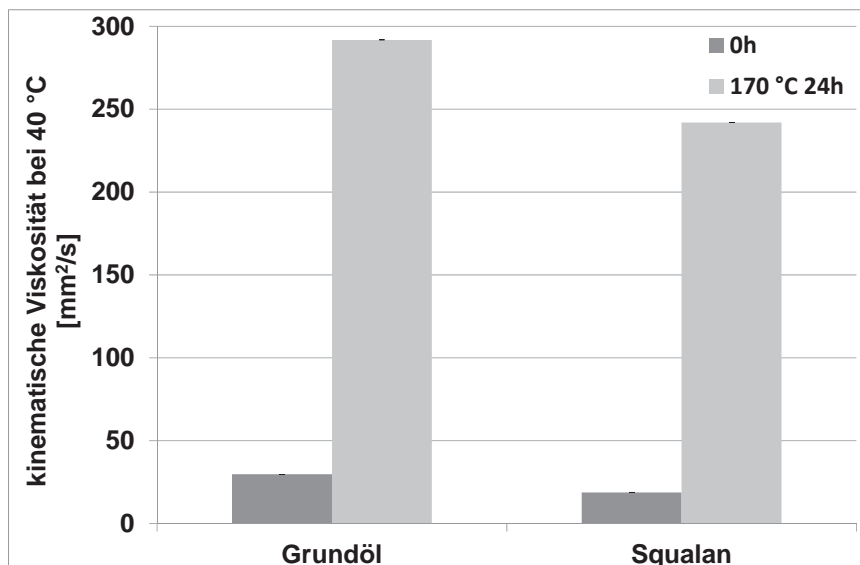


Abbildung 6: Viskositätsergebnisse der thermooxidativ gealterten Proben

## Literatur

- [1] Dugmore, T. I. J., The Autoxidation of biodiesel and its Effects on Engine Lubricants, Dissertation, University of York, 2011
- [2] Knorr, M., Singer, A., Krahl, J., Grundölalterung mit zeitgemäßen Biokraftstoffen, MTZextra Kraft- und Schmierstoffe der Zukunft, Springer Vieweg, 2016
- [3] Schumacher, S., Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Diesel- und Biodieselkomponenten auf den Mechanismus der Ölschlamm- und Viskositätsbildung im Motoröl, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013
- [4] Singer, A., Ruck, W., Krahl, J., Influence of Different Biogenic Fuels on Base Oil Aging, SAE 2014-01-2788, 2014
- [5] Singer, A., Schröder, O., Pabst, C., Munack, A., Bünger, J., Ruck, W., Krahl, J., Aging studies of biodiesel and HVO and their testing as neat fuel and blends for exhaust emissions in heavy-duty engines and passenger cars, Fuel, 153, 595-603, 2015







# Jatrophaöl-Applikation an einem 2,2 l Common-Rail-Dieselmotor

---

Alexander Koder, Florian Zacherl, Hans-Peter Rabl, Wolfgang Mayer

## Abstract

Es ist mittlerweile durch zahlreiche Arbeiten belegt, dass reine Pflanzenöle eine Alternative zu Dieselkraftstoff darstellen und dadurch einen wichtigen Beitrag zur Treibhausgasminderung leisten können. Moderne Common-Rail-Dieselmotoren bieten durch ihre Variabilität bei der Applikation eine Vielzahl an Möglichkeiten den Einspritz- und Verbrennungsprozess auf diese alternativen Kraftstoffe anzupassen. In diesem Zusammenhang wurde ein 2,2 l Dieselmotor mit Common-Rail-Einspritzsystem für den Betrieb mit reinem Jatrophaöl angepasst. Es erfolgte eine Emissionskalibrierung durch Variation der Abgasrückführrate und Entwicklung geeigneter Einspritzstrategien am Versuchsmotor sowie durch Vermessung der Injektoren am HDA-Einspritzprüfstand. Die Zylinderdruckindizierung am Versuchsmotor lässt außerdem, in Verbindung mit der Bestimmung des Einspritzratenverlaufes am HDA-Prüfstand, Rückschlüsse auf das Zündverhalten im Diesel- und Jatrophaölbetrieb zu.

## 1. Einspritzstrategien für den Jatrophaölbetrieb

Bei der Kalibrierung von Voreinspritzmustern für den Jatrophaölbetrieb hat sich im Vergleich zu Dieselkraftstoff eine Erhöhung der Voreinspritzmenge der zweiten Voreinspritzung (VE) für den unteren Teillastbereich als optimal erwiesen. Dadurch konnten die Stickoxidemissionen beim Betrieb mit Jatrophaöl weiter gesenkt werden. Grundsätzlich wurde immer mit zwei VE appliziert, die Menge der Ersten ist äquivalent zum Betrieb mit Dieselkraftstoff. Die Separationswinkel zwischen den VE wurden im Bereich von vier bis sechs Grad Kurbelwinkel gewählt (Drehzahl 1500 U/min), da größere Abstände zur vermehrten Bildung von sogenanntem „kalten“ CO geführt haben.

## 2. Abgasrückführung im Jatrophaölbetrieb

Bei der Variation der Abgasrückführrate wurde zusätzlich eine Variation des Einspritzdruckes durchgeführt. Eine Erhöhung des Einspritzdruckes erwies sich für Jatrophaöl besonders im unteren Teillastbereich als sinnvoll. Um bei der AGR-Variation den Verbrennungsschwerpunkt konstant zu halten, ist für den Jatrophaölbetrieb, in Abhängigkeit der AGR-Rate, eine Verschiebung des Einspritzzeitpunktes um 0,75 – 1,25 °KW (Drehzahl 2000 U/min) nach früh nötig. Insgesamt hat sich gezeigt, dass Jatrophaöl sehr AGR-verträglich ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Lüft [1] für Rapsöl, der hierfür den Eigensauerstoffgehalt des Kraftstoffes verantwortlich macht, welcher für Jatrophaöl etwa gleich ist.

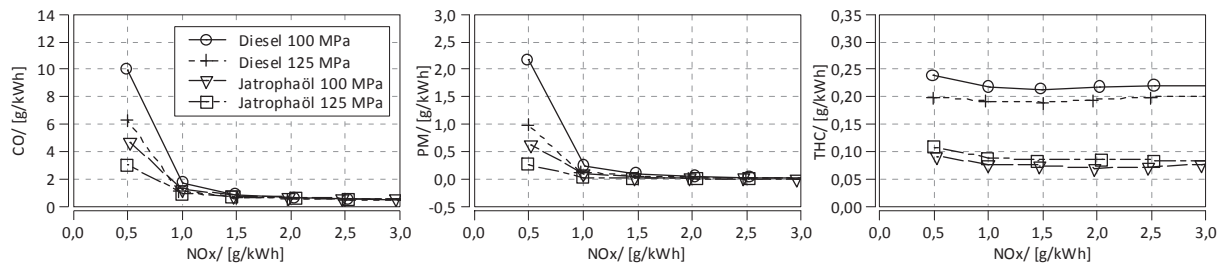


Abb. 1: Variation der Abgasrückführrate am Betriebspunkt mit 2000 U/min und 103 Nm bei Verwendung eines optimierten Einspritzmusters mit 2 Voreinspritzungen (konst. Verbrennungsschwerpunkt bei 9 °KW nach OT)

### 3. Zündverzugsmessung am realen Motor durch Zylinderdruckindizierung mit separater Einspritzratenuntersuchung

Eine Einspritzratenanalyse des verwendeten Injektors hat ergeben, dass der hydraulische Verzug (Zeit zwischen hydr. Einspritzbeginn und Injektoransteuerbeginn) vom jeweiligen Raildruck und der Viskosität des Kraftstoffes abhängig ist. Kombiniert man die hydraulische Vermessung des Injektors mit Ergebnissen aus der Verbrennungsanalyse, sind Rückschlüsse auf den Zündverzug unter realen Motorbetriebsbedingungen möglich. Für den untersuchten Motor hat sich gezeigt, dass der Zündverzug im Jatropaölbetrieb durchweg kürzer ist, als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Emberger [2] für Brennkammerdrücke von 34 bar, der ebenfalls einen kürzeren Zündverzug von Jatropaöl feststellte.

### 4. Zusammenfassung

Jatropaöl ist für die Verbrennung in modernen Common-Rail-Dieselmotoren grundsätzlich geeignet. Es ergeben sich jedoch bei der Applikation einige, zu Dieselkraftstoff, markante Unterschiede. So erweisen sich leicht erhöhte Voreinspritzmengen für den Jatropaölbetrieb als vorteilhaft, dadurch kann die Temperatur der Brennraumfüllung moderat erhöht werden, was Vorteile für die Gemischbildung bietet. Der Zündverzug von Jatropaöl ist im Vergleich zu Dieselkraftstoff auch beim Betrieb mit AGR durchweg kürzer, was den vorgemischten Anteil bei der Verbrennung herabsetzt. Weiterhin ist Jatropaöl durch seinen Eigensauerstoffgehalt als AGR-verträglicher einzustufen, da die Rußoxidation verbessert wird.

### Literatur

- [1] Lüft, Markus; Ein Beitrag zur Optimierung der motorischen Verbrennung von Rapsölkraftstoff in Heavy Duty Dieselmotoren. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015
- [2] Emberger, Peter; Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenöle. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 201



# Mikrobiologische Kontamination biogener Brennstoffe

---

Bernd Leuchtle, Wei Xie, Thiemo Zambanini, Simon Eiden, Winfried Koch, Klaus Lucka, Martin Zimmermann, Lars M. Blank

## Abstract

Mikrobielle Kontaminationen von Brenn- und Kraftstoffen und die damit einhergehenden Schäden an Lagertanks, Filtern und Pumpen sind seit langem bekannte Herausforderungen für die Mineralöl-Industrie. Dabei richtete sich die Forschung hauptsächlich auf die Kontamination von (Schiffs)Diesel und Flugtreibstoffen. Heizöl, ein dem Diesel chemisch ähnliches Produkt, blieb bislang in Forschungsvorhaben nahezu unbeachtet.

Weltweit werden zurzeit ca. 40 Milliarden Liter Heizöl pro Jahr verbraucht. Dieses wird, im Gegensatz zu Diesel, deutlich länger und zudem dezentral gelagert. Im Forschungsvorhaben wurden Faktoren ermittelt, die mikrobielles Wachstum in Heizöllagertanks beeinflussen.

Wasser, welches als freie sekundäre Phase vorliegen muss, ist dabei für das mikrobielle Wachstum essentiell. Auffällig dabei ist, dass es keine Mindestmenge an freiem Wasser gab, die von den Organismen benötigt wurde. Während des Wachstums produzieren die Organismen Metabolite wie beispielsweise Säuren und Emulgatoren. Diese können zur Korrosion von Tankmaterialien führen sowie die Ausbildung von Wasser-in-Öl- als auch Öl-in-Wasser-(Mikro)Emulsionen begünstigen. Diese erleichtern den mikrobiellen Brennstoffabbau und sind für das z.T. jahrelange Überleben der Mikroben in der Brennstoffphase verantwortlich. Die detektierten Wasser-in-Öl-Emulsionen führen zu einem Wassertransport durch das gesamte Brennersystem.

Ein seit langem diskutierter und im Dieselsektor bereits verbreiteter Biokraftstoff ist Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Esters, FAME). Dessen Einsatz förderte einerseits das mikrobielle Wachstum, andererseits wurde dadurch die zum Anwachsen der Mikroorganismen benötigte Keimdichte verringert.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass zusätzliche Schutzmaßnahmen beim Lagern von Heizöl-FAME-Blends empfehlenswert sind. Moderne Polyethylen-Tankmaterialien werden dabei deutlich weniger von mikrobiellen Kontaminationen in Mitleidenschaft gezogen als klassischerweise genutztes Metall.





# Analysis of Adsorbed Bio Gas Tank Technology

---

Conrad Schulz, Peter Pfeifer

## Abstract

Due to the recent increase in global temperature, interest in alternative fuels has skyrocketed. With gasoline being an ever decreasing finite resource and with the desire to reduce humanity's carbon footprint, there has been an increasing focus on innovation of alternative fuel sources. Unfortunately, these new fuels are difficult to take advantage of if they cannot be stored effectively. Bio gas burns cleaner, is more abundant, and conforms to modern engines. However, storing compressed bio gas (CBG) requires large, heavy gas cylinders, which limits space and fuel efficiency. Adsorbed bio gas (ABG) technology allows for much greater fuel storage capacity and the ability to store the gas at a much lower pressure. Thus, ABG tanks are much more flexible in terms of their size, shape, and weight. Our ABG tank employs nanoporous activated carbon as its adsorbent material, which is made out of bio waste (corn cobs). This material has been made out of our world best performing activated carbon powder in a complicated procedure that involved chlorine based binder and high temperatures (up to 750°C), to compress the powder into so called monoliths. These monoliths provide us with a surface area of approximately 2100m<sup>2</sup>/g and with the mass of one monolith (360g) we have a total surface area of 760,000 m<sup>2</sup>. Our test tank with an internal volume of 40L can fit around a 100 of these monoliths (20kg in total mass of carbon) yield an overall surface area of 42 km<sup>2</sup>. This allows it to hold (volumetrically) 4.5 times what a tank without carbon would hold at 35 bar. Several charge and discharge configurations of this Flat Panel Tank Assembly (FPTA) along with a Fuel Extraction System (FES) were examined to determine the feasibility of integrating this technology into a vehicle. The future work will seek to expand the capabilities and practical applications of our tank by creating new adsorbent materials that can outperform every material in existence today and the ability of our FES as a tool to extract hydrocarbons, which are left behind by bio gas, out of the tank.





# Enhancing the Surface Area of Graphitic Carbon Nitride for Hydrogen Storage

---

Florian Seydel, Amrit Bal, David Stalla, Andrew Gillespie, Adam Smith, Mark Sweany, Mark Lee and Peter Pfeifer

## Abstract

When produced by renewable resources, methane can be a renewable and clean fuel source for vehicular applications. Besides fossil fuels, the main source of methane production is anaerobic digestion. This method is controversial because of the food versus fuel dilemma. Alternately, it may be produced by power-to-gas technology, which can use electrical energy for hydrolysis of water and methanation. To avoid efficiency losses and avoid pollution by incomplete combustion, it is useful to store and use the gas directly. However, gases must be stored in large, heavy tanks and the storage must be under extremely high pressures. Adsorbent materials, such as nanoporous carbon (NPC), can increase the storage capacity of tanks by storing the gas at lower pressures. This opens up the possibility for more space-efficient tank design with thinner walls. Though NPC materials have a specific surface area of ca. 2500 m<sup>2</sup>/g, they adsorb a low amount at ambient temperatures due to their relatively low binding energy to hydrogen. Therefore, new high binding energy materials need to be characterized. One possible material is graphitic carbon nitride (GCN). Theoretical calculations of the electronic structure suggest that this material has a higher binding energy and an increased surface area due to regular, in-plane voids. Thus, GCN materials may outperform NPC. Initial surface area measurements on bulk GCN showed that the specific surface area is between 5-20 m<sup>2</sup>/g. In order for GCN to compete with NPC, it is necessary to increase the specific surface area of the GCN. To accomplish this, we attempted to exfoliate the surface using sonication and high energy ball milling. We study the effects of these treatments using analyses of the structure via x-ray diffraction spectroscopy, nitrogen sorption, tunneling electron microscopy, and x-ray photoelectron spectroscopy.





# Kraft der grünen Stadt

---

Tim Zander

## Abstract

### 1. Einleitung

Die Menschheit befindet sich an einem vorher noch nicht dagewesenen Wendepunkt in der Geschichte. Seit 2008 leben mehr als die Hälfte der Menschen in Städten[1]. Daraus resultiert ein wachsender städtischer Bedarf an Lebensmitteln, Kraftstoffen und Abfallbeseitigung. Die Weltbevölkerung steigt, jedoch sind die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen der Welt wie die Phosphatvorkommen limitiert. Neben intransparenten politischen Verflechtungen und den Umweltbelastungen stellt das absehbare Ende der fossilen Energieträger die konventionelle Nutzung von Verbrennungskraftmaschinen in Frage. Ein Verzicht scheint aus heutiger Sicht undenkbar, da das Feuer schon seit Jahrtausenden eins der wichtigsten Werkzeuge des Homo sapiens ist.

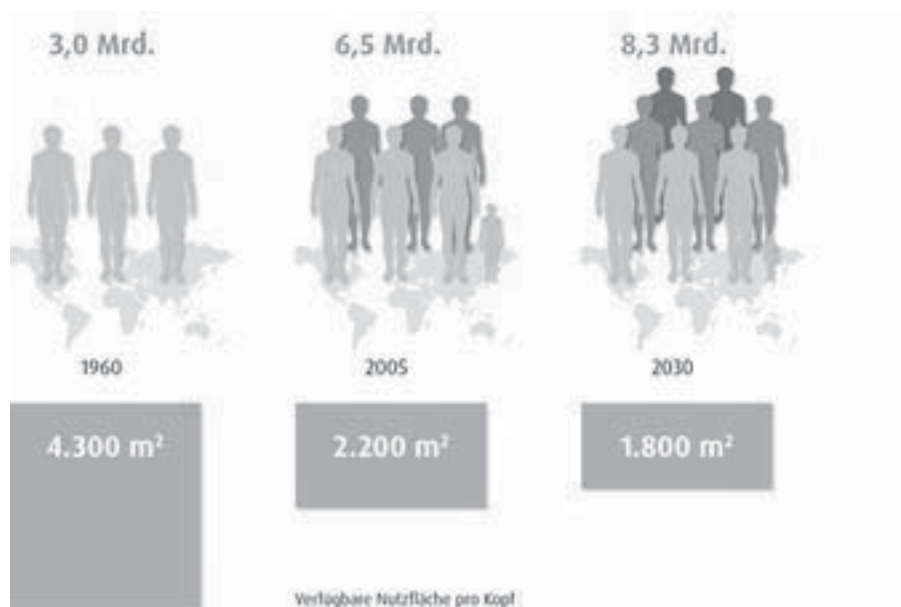


Bild 1: Verfügbare Nutzfläche pro Kopf[2]

### 2. Kraft der grünen Stadt

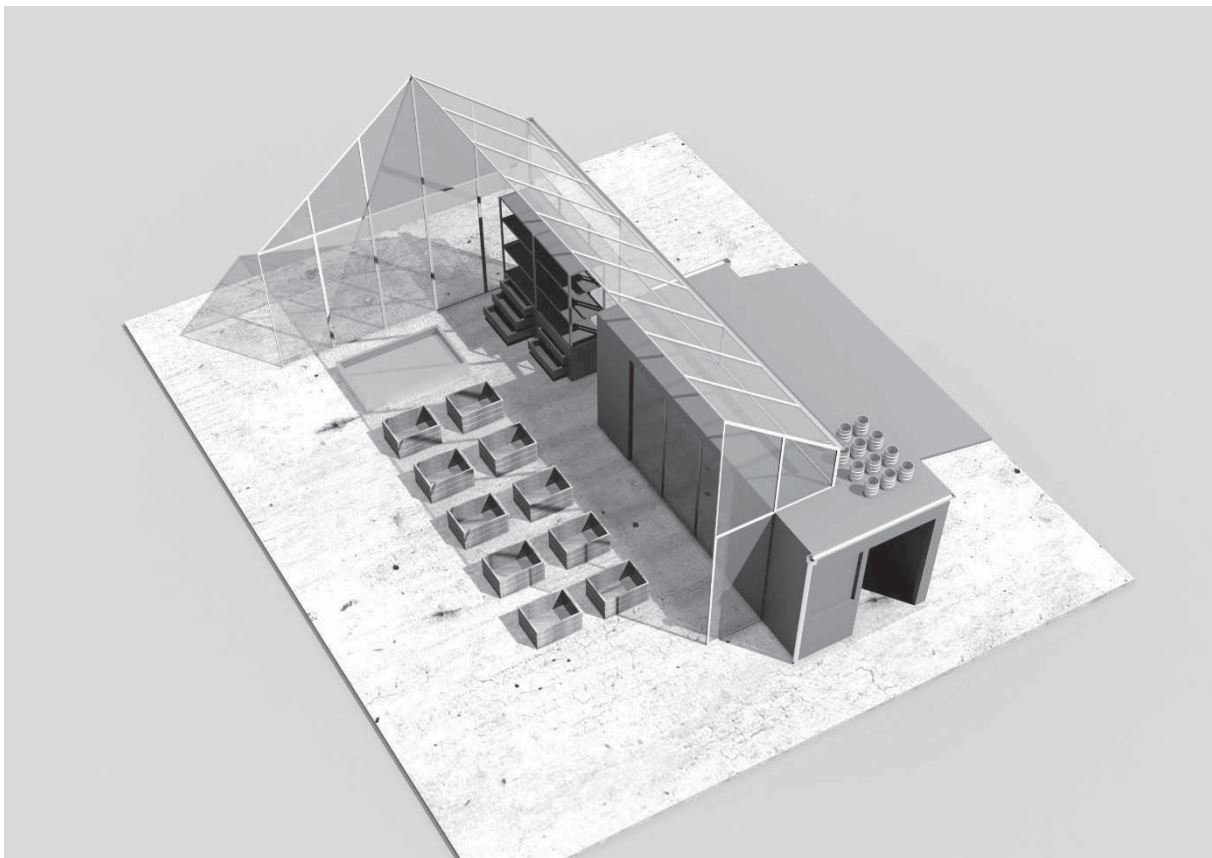
Das studentische, selbstorganisierte Projekt „Kraft der grünen Stadt“ der TU Berlin beschäftigt sich im Verbund mit der Projektwerkstatt „Biotechnologie in der Klimahülle“ mit Gewächshäusern als Schnittstellenelement für die urbane Kreislaufwirtschaft. Gewächshäuser in Städten können neben Kohlenstoffdioxidfixierung, Lebensmittel- und



Sauerstoffproduktion externe Stoff- und Energiekreisläufe synergetisch kombinieren. Beispielsweise können Algenfarmen mit dem Kohlenstoffdioxid von mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerken und aufbereiteten Abwasser gedüngt werden, um Bioethanol herzustellen. Um die gesamte Wertschöpfungskette analysieren zu können, wurde der Umbau eines Rollers auf Biogas konzeptioniert.

#### 4. The Potential

Das mobile Gewächshaus ist eine Kombination aus einem Gewächshaus mit Clipsystem und einem Schiffscontainer. Das Konstrukt kann in 4 Stunden aufgebaut werden. Im Container ist Platz vorgesehen für beispielsweise ein Modul einer Biogasanlage oder einer Abwasserkläranlage.



*Bild 2: Mobiles Gewächshauskonzept "The Potential"*

#### Literatur

- [1] <http://www.unfpa.org/urbanization> (letzter Zugriff 08.05.2016)
- [2] <http://www.pflanzen-forschung-ethik.de/data/media/2906/340x.png> (letzter Zugriff 08.05.2016)



## Die Autoren

---

### Herausgeber

Prof. Dr. habil. Jürgen Krahl  
Technologietransferzentrum Automotive (TAC) der Hochschule Coburg

Prof. Dr.-Ing. Axel Munack  
Thünen-Institut für Agrartechnologie (TI), Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Technische Universität Braunschweig, Institut für Verbrennungskraftmaschinen (ivb)

Prof. Dr. med. Jürgen Bünger  
Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)

### Autoren und Co-Autoren

Dipl.-Ing. Friedemann G. Albrecht  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart

R. Baar, Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen

Mehdi Bagheri  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen

Amrit Bal  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Prof. Lars M. Blank  
Institut für Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

Dr. Jürgen Blassnegger  
Graz University of Technology, Graz, Austria

Dipl.-Ing. agr. Dieter Bockey  
Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Berlin

Flemming Cassee  
National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Netherlands, Institute for Risk Assessment Sciences, Utrecht University, Netherlands



Dr.-Ing. Ralph-Uwe Dietrich  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart

Simon Eiden  
Oel-Wärme-Institut, An-Institut der RWTH Aachen

Dr.-Ing. Peter Emberger  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sachgebiet Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Dipl.-Ing. (FH) Mustafa Eskiner  
Technologietransferzentrum Automotive (TAC) der Hochschule Coburg, Coburg

Dipl.-Ing. Barbara Fey  
Thünen Institut für Agrartechnologie (TI), Braunschweig

Dr. Thomas Garbe  
Volkswagen AG, Wolfsburg

Bernhard Geringer  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien

Dr. Ir. Miriam Gerlofs-Nijland  
National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Netherlands

Andrew Gillespie  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Götz M. Eng.  
Technologietransferzentrum Automotive (TAC) der Hochschule Coburg, Coburg

Philipp Haltenort M. Sc.  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen

Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf  
Inhaber des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock (LKV), Rostock

Dipl.-Ing. (FH) Johann Hauber  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Zentrum für Angewandte Forschung der TH Ingolstadt (ZAF), Ingolstadt

S. Heitzig  
Institute for Fluid Power Drives and Controls, RWTH Aachen University, Aachen, Germany



Dipl.-Ing. Benedikt Heuser  
Institute for Combustion Engines, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Prof. Dr.-Ing. Karl Huber  
Leiter des Labors für Motoren- und Fahrzeugtechnik, Technische Hochschule Ingolstadt (THI), Ingolstadt

Paul Janssen  
National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Netherlands

Aleksandra Jedynska  
The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Utrecht, Netherlands

Gerrit Kadijk  
The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Utrecht, Netherlands

Dipl.-Ing. (FH) Markus Knorr  
Technologietransferzentrum Automotive (TAC) der Hochschule Coburg, Coburg

Winfried Koch  
Oel-Wärme-Institut, An-Institut der RWTH Aachen

Alexander Koder  
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH), Regensburg

Dipl.-Ing. Daniel H. König  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart

Gertjan Koornneef  
The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Utrecht, Netherlands

Ingeborg Kooter  
The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Utrecht, Netherlands

F. Kremer  
Institute for Combustion Engines, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Josie Kunze  
TUM-Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Freising, Germany

Claus-Gunter Kummer  
HTW Dresden



Dr. Mark Lee  
University of Missouri Dept. of Chemistry, Columbia, MO, USA

Dr. Bernd Leuchtle  
Institut für Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

Dr. Klaus Lucka  
Oel-Wärme-Institut, An-Institut der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer  
Hochschule Kempten

Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer  
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Leipzig

M. Murrenhoff  
Institute for Fluid Power Drives and Controls, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Karin Naumann  
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Leipzig

Prof. Dr. Peter Pfeifer  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel  
John Deere GmbH & Co. KG European Technology Innovation Center (ETIC), Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger  
Institute for Combustion Engines, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl  
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH), Regensburg

Dr. Edgar Remmele  
Leiter des Sachgebiets Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Prof. Dr., Michael Rossner  
Fakultät Elektrotechnik und Informatik der Hochschule Coburg, Coburg

Dipl.-Chem. Kevin Schaper  
Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig

Dr. Thomas Schlick  
Roland Berger GmbH, Frankfurt am Main



Prof. Dr. Dr. Karl-Werner Schramm  
Helmholtz-Zentrum München (GmbH), German Research Center for Environmental Health, Molecular EXposomics (MEX), Munich, Germany, TUM-Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Freising, Germany

Dr. Olaf Schröder  
Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig, Technologietransferzentrum Automotive (TAC) der Hochschule Coburg, Coburg

Conrad Schulz  
University of Missouri, Physics Department, Columbia, MO, USA

Florian Seydel  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Adam Smith  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

David Stalla  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Mark Sweany  
University of Missouri Dept. of Physics and Astronomy, Columbia, MO, USA

Dr. Klaus Thuncke  
stellvertretender Leiter des Sachgebiets Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Michael Urbanek  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien

Wendy Vercrujssse  
National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Netherlands

Dr. Wolfgang Warnecke  
Shell Technology Center Hamburg

A. Weinebeck  
Institute for Fluid Power Drives and Controls, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

PD Dr. Götz Westphal  
Institute for Prevention and Occupational Medicine, Ruhr-University Bochum





Paul White  
Environmental Health Science and Research Bureau (Health Canada), Ontario, Canada

Wei Xie  
IMD Natural Solutions GmbH

Florian Zacherl  
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH), Regensburg

Thiemo Zambanini  
Institut für Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

Tim Zander  
TU Berlin

Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse  
HTW Dresden

Dr. Martin Zimmermann  
Institut für Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen



