

FUELS JOINT  
RESEARCH GROUP



Band 10

1. Tagung der Fuels Joint Research Group  
am 24. und 25. September 2014 in Braunschweig

# KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN

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



Cuvillier Verlag Göttingen



## Kraftstoffe für die Mobilität von morgen





1. Tagung der Fuels Joint Research Group  
am 24. und 25. September 2014 in Braunschweig

# 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, 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

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, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-802-1

eISBN 978-3-7369-4802-0



## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Tailor-Made Fuels from Biomass – Kraftstoffforschung zur Sicherung nachhaltiger Mobilität</b>	<b>9</b>
Stefan Pischinger	
<b>Zukunft Mobilität – Alternative Energieträger und Antriebe</b>	<b>13</b>
Wolfgang Steiger	
<b>Nach der Neuformierung von EU-Parlament und EU-Kommission: Wie geht es weiter mit der europäischen Biokraftstoffpolitik?</b>	<b>17</b>
Stephan Arens, Dieter Bockey	
<b>„Electrofuels“ – Elektrochemie als Werkzeug für nachhaltige Kraftstoffsynthesen</b>	<b>25</b>
U. Schröder, T. dos Santos, P. Nilges, F. Harnisch	
<b>Alternative Kraftstoffe in der Luftfahrt</b>	<b>27</b>
Ulrike C. Heckenberger	
<b>Stand und Perspektiven für Biokraftstoffe – Überblick und Forschungsschwerpunkte des DBFZ</b>	<b>29</b>
Franziska Müller-Langer, Stefan Majer, Karin Naumann, Daniela Thrän	
<b>Alternative Kraftstoffe im Dieselmotor mit erweiterter Variabilität</b>	<b>37</b>
Ingo Blei, Peter Eilts	
<b>Kraftstoffe im Spannungsfeld zwischen Qualität, CO<sub>2</sub> und Nachhaltigkeit</b>	<b>43</b>
Richard Dorenkamp	
<b>Einfluss der Biogaszusammensetzung auf die Abgase von Gasmotoren sowie deren Abgasnachbehandlung</b>	<b>49</b>
Klaus Zanter	
<b>Anpassung von Abgasnachbehandlungssystemen an neue Kraftstoffe</b>	<b>53</b>
Gennadi Zikoridse	
<b>Katalyse und Filtration des Abgases mit Biodiesel betriebener Nutzfahrzeugmotoren</b>	<b>57</b>
Uwe Gärtner	
<b>Verbrennungschemie von Biokraftstoffen – Reaktionswege und Schadstoffbildung</b>	<b>61</b>
Katharina Kohse-Höinghaus	
<b>Einfluss der Emissionen biogener Kraftstoffe auf die Umwelt</b>	<b>65</b>
Jürgen Bünger, Götz Westphal, Olaf Schröder, Axel Munack, Jürgen Krahl	
<b>Emissionen von Biokraftstoffgemischen aus Motoren mit SCR-Katalysator</b>	<b>69</b>
Christoph Pabst	
<b>Die Autoren</b>	<b>75</b>





# Kraftstoffe für die Mobilität von morgen

1. Tagung der Fuels Joint Research Group

**Politische, ökonomische und technische Randbedingungen**

Sektionsleitung: Prof. Dr. Jürgen Krahl, Hochschule Coburg





# Tailor-Made Fuels from Biomass – Fuels Research to Secure Sustainable Mobility

## Tailor-Made Fuels from Biomass – Kraftstoffforschung zur Sicherung nachhaltiger Mobilität

---

Stefan Pischinger

### Abstract

In the Cluster of Excellence Tailor-Made Fuels from Biomass newly derived biogenic fuels are being developed and investigated. Thereby, no limitation is put on the possible fuel candidates with regard to their molecular structure. Based on predicted engine-relevant property data and despite limited experience on auto-ignition of ketonic fuels, ketonic carbonyles were chosen for in-depth investigation in the gasoline engine. Exceptionally good knock resistance and mixture formation at challenging boundary conditions have been experimentally confirmed for 2-butanone, a prototype of a ketonic biofuel comprising tailored properties. To ensure the safe handling of the new fuel candidate its compatibility with seal materials and engine oils has been screened.

### 1. Introduction

The TMFB fuel design aims at the identification of molecular structures comprising engine-relevant properties and their sustainable production pathways. For this, researchers from the field of chemistry, chemical engineering and mechanical engineering have joined in the Fuel Design group to find the optimum fuel depending on the desired application. As an example of this fuel design, the derivation and investigation of the ketonic compound 2-butanone is described in this work.

### 2. Computer-Aided Molecular Design

The first challenge when designing optimal fuel components is the identification of candidates out of the +10.000.000 compounds that could theoretically be derived from lignocellulosic biomass. For this, a tool based on Quantitative Structure-Property Relationships (QSPR) [1, 2] was developed that, in a first step, generates all possible molecular structures based on valence rules and given restriction (e.g. number of carbon atoms) and can then be used to minimize the found data set by user-defined boundary conditions [3]. As in this work it was attempted to find a biomass-based gasoline type fuel, constraints were set, besides other, on the oxygen content, the maximum boiling temperatures and the ignition characteristics expressed by the Derived Cetane Number. As a result, the group of ketones was chosen for further investigations as it is characterized by low boiling temperatures as well as very low self-ignition tendencies, see [3].



### 3. Fuel properties

Table 1 lists the most relevant properties of the experimentally studied fuels.

	RON 95	Ethanol	2-Methyl- furan	2- Butanone
Boiling temperature / °C	41.5-173.5	78	64	80
Specific enthalpy of vaporization / kJ/kg <sub>air</sub> , $\lambda = 1$	28.08	101.6	35.52	46.10
Lower heating value / MJ/kg	42.13	26.84	30.37	31.45
Lower heating value / MJ/l	31.05	21.09	25.32	27.63
Stoichiometric air requirement / -	14.14	8.98	10.08	10.52
RON	96	109	101	117
MON	85	90	82	107

Table 1: Fuel Properties

Ethanol is known as an excellent biofuel for gasoline engines especially at high engine loads due to its high knock resistance and high heat of vaporization. These characteristics enable efficiency improvements of up to ~13 % compared to conventional RON 95 gasoline fuel [4, 5]. Therefore ethanol is defined as the benchmark biofuel for spark ignited engines. However drawbacks arise from the low volumetric heating value and the weak cold start capability. The high heat of vaporization and low vapor pressure in combination with an increased fuel demand due to the lower stoichiometric air requirement lead to a deterioration of mixture formation [6]. Previously performed calculations revealed that for the formation of an ignitable stoichiometric mixture at -30 °C ambient temperature a specific heat of vaporization smaller than 60 kJ/kg<sub>air</sub> is needed [7].

The engine test bench investigations revealed 2-methylfuran as a potential candidate for a future gasoline fuel [8]. The high vapor pressure and only moderate enthalpy of vaporization lead to a superior mixture formation at cold start conditions compared to ethanol. Efficiency improvement of up to ~10 % compared to conventional RON 95 gasoline fuel can be achieved at full load operation.

2-butanone is a potential biofuel candidate combining a knock resistance significantly higher than 2-methylfuran, a moderate volumetric heating value and a good mixture formation especially at cold start conditions. It is one example of the ketonic fuels structures derived in the computer-aided molecular design.



## 4. Experimental Results

The engine test bench investigations were carried out on a homogeneously operated direct injection spark ignition single cylinder research engine known from previous publications [4,8,9]. In contrast to the previously used outward-opening piezo injector, a 6-hole solenoid injector was installed. The achievable thermal efficiency of a gasoline engine predominantly depends on the compression ratio which in turn is limited by the knock resistance of the fuel. Figure 1 depicts the knock resistance in terms of the 50 % mass fraction burned point using a compression ratio of 13.5 at an engine speed of  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  and full load at 27 bar indicated mean effective pressure (IMEP). A 50 % mass fraction burned point (MFB50) at or close to the optimum of  $8^\circ \text{ CA ATDC}$  indicates a high knock resistance and hence the highest possible engine efficiency. The evaluation of the performance of 2-butanone was conducted by a comparison of measurements under equal boundary conditions for both ethanol and 2-butanone. The full load investigation confirmed the high knock resistance of 2-butanone under real engine conditions.

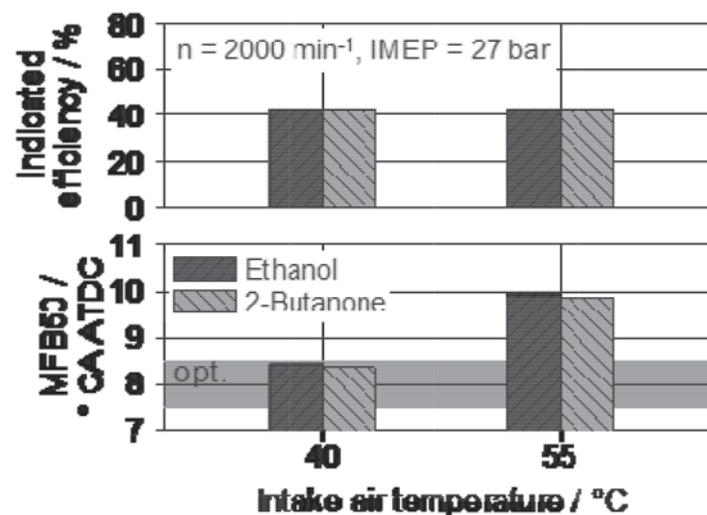


Figure 1: Full load engine test results

For both fuels the intake air temperature had to be raised to  $55^\circ \text{C}$  to exhibit knocking combustion and thus depict the need of combustion phasing (cf. Figure 1). The heating value of 2-butanone was predicted leaving some uncertainty regarding the precision. However the slight difference in efficiency can be explained by the higher heat of vaporization of ethanol and therefore reduced thermal losses.

Figure 2 shows the engine test results at the catalyst heating point. The temperature of the engine fluids was reduced to  $40^\circ \text{C}$  for engine oil and  $30^\circ \text{C}$  for coolant water. For all investigated fuels the spark timing was set to  $25^\circ \text{ CA ATDC}$ .

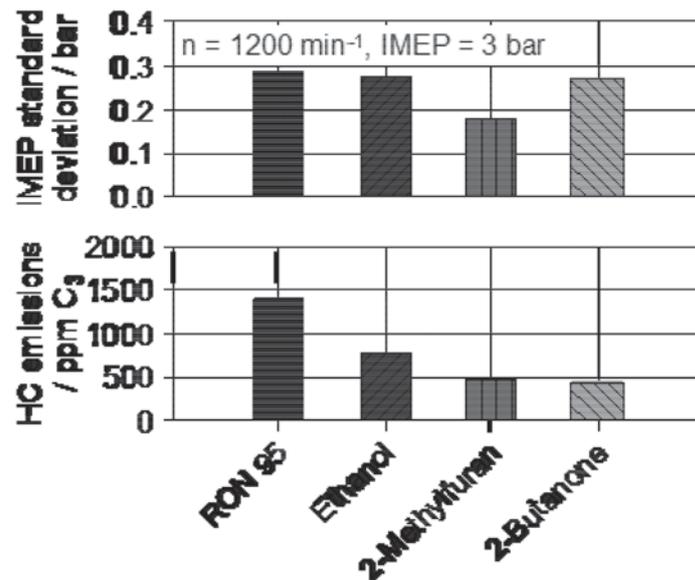


Figure 2: Engine test results at catalyst heating load point

The short burn delay and duration in case of 2-methylfuran result in a good combustion stability of 2-methylfuran indicated by the low standard deviation [9]. For ethanol and 2-butanone a nearly equal cyclic variation is measured. Although the level of HC emissions is partially influenced by the differences in post-oxidation occurring in the exhaust system due to the different temperature level, it can be stated that the low HC emissions of 2-butanone similar to those of 2-methylfuran indicate a good mixture homogenization. Hence the expectation of 2-butanone being a fuel with excellent knock resistance and mixture formation at challenging boundary conditions is experimentally confirmed.

## Literature

- [1] M. Hechinger, M. Dahmen, J.J. Victoria Villeda, W. Marquardt, In: I.A. Karimi and R. Srinivasan (Eds.): Proceedings of the 11th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE 2012), Singapore, 15.07.-19.07.2012, 1341–1345, (2012)
- [2] M. Hechinger, Dissertation, RWTH Aachen, (2014)
- [3] M. Dahmen, M. Hechinger, J.J. Victoria Villeda, W. Marquardt, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 5 (3), 990–100,3 (2012)
- [4] M. Thewes, M. Müther, A. Brassat, S. Pischinger, A. Sehr, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 5(1), 274–288, (2012)
- [5] A. Brassat, M. Thewes, M. Müther, S. Pischinger, MTZ 12, 56–63, (2011)
- [6] M. Schwaderlapp, P. Adomeit, A. Kolbeck, M. Thewes, MTZ 02, 24–29, (2012)
- [7] J. Klankermayer, M. Thewes, M. Müther, 4. TMFB International Workshop of the Cluster of Excellence “Tailor Made Fuels from Biomass”, Aachen, 25.05.-26.05.2011
- [8] M. Thewes, M. Müther, S. Pischinger, M. Budde, A. Brunn, A. Sehr, P. Adomeit, J. Klankermayer, Energy Fuels 25, 5549–5561, (2011)
- [9] M. Thewes, P. Mauermann, S. Pischinger, K. Bluhm, H. Hennert, TAE Esslingen 15.01.-17.01.2013.



# Zukunft Mobilität – Alternative Energieträger und Antriebe

---

Wolfgang Steiger

## Abstract

Energy and resource efficiency is a political and societal aim. This requires a continuous improvement in conventional powertrain efficiency and the market introduction of electrified vehicles. To result in a remarkable reduction of mobility-related CO<sub>2</sub>-emissions, in parallel an energy change for both, conventional hydrocarbons and electric energy, is necessary.

## 1. Einleitung

Die europäische politische Agenda im Energie- und Verkehrssektor wird maßgeblich durch die Eingrenzung des Treibhausgaseffektes geprägt. CO<sub>2</sub> als einer der Hauptverursacher wird daher stark reglementiert. Als technische Lösungsansätze ergeben sich in der Mobilität zwei komplementäre Strategien:

1. Die Steigerung der Effizienz aller Prozesse in Herstellung und Nutzung von Fahrzeugen, d.h. der reduzierte Einsatz von Energie.
2. Die Dekarbonisierung der genutzten Energieträger, wobei dies aufgrund des globalen Effektes der CO<sub>2</sub>-Emissionen auch in der Vorkette, d.h. bei der Herstellung der Energieträger, erzielt werden kann.

In diesem Zusammenhang spielen alternative Kraftstoffe, bzw. Energien, eine entscheidende Rolle. Wichtig ist jedoch nicht nur die CO<sub>2</sub>-Bilanz dieser Kraftstoffe, sondern auch deren Anwendbarkeit in heutigen und zukünftigen Antriebssystemen. Bei deren Bewertung ist daher auch eine Vorausschau auf zukünftige Antriebe und deren Rahmenbedingungen notwendig.

## 2. Zukünftige verbrennungsmotorische Antriebe

In der Automobilindustrie wird seit Jahren die Effizienz der Fahrzeuge kontinuierlich verbessert. So wurde der Kraftstoffverbrauch der Neuwagenflotte seit 1995 um 32% verbessert. Im Mittel werden die Kraftstoffverbräuche bis 2020 um ca. 5% je Jahr weiter reduziert um den Flottenemissionswert von 95 gCO<sub>2</sub>/km zu erreichen. Hierzu sind vor allem weitere Verbesserungen in der Antriebseffizienz notwendig. Variable Ventiltriebe und Verdichtung, höhere Einspritzdrücke und verbesserte Verbrennung, Reibungsreduzierung sowie Downsampling mit größerer Getriebespreizung sind die kommenden Maßnahmen an konventionellen Antrieben.

Diese teils extrem aufwändigen Technologien müssen durch eine entsprechende Verbesserung der Kraftstoffqualität unterstützt werden. Neben der funktionalen Qualität ist aber auch eine Dekarbonisierung notwendig. „Low-hanging-fruits“ wie die verstärkte Nutzung von Erdgas müssen durch neuartige Kraftstoffe ergänzt werden, die



in der Gesamtkette reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugen. Hierzu stehen aus der Forschung mehrere aussichtsreiche biochemische, enzymatische und thermochemische Verfahren zu Verfügung.[1] Damit wird es möglich aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen biogener Natur, oder auch aus CO<sub>2</sub> und Sonnenenergie, qualitativ hochwertige Kohlenwasserstoffe zu erzeugen.

In der weiteren Entwicklung dieser Verfahren gilt es nun deren industrielle Machbarkeit und Kosteneffizienz darzustellen.

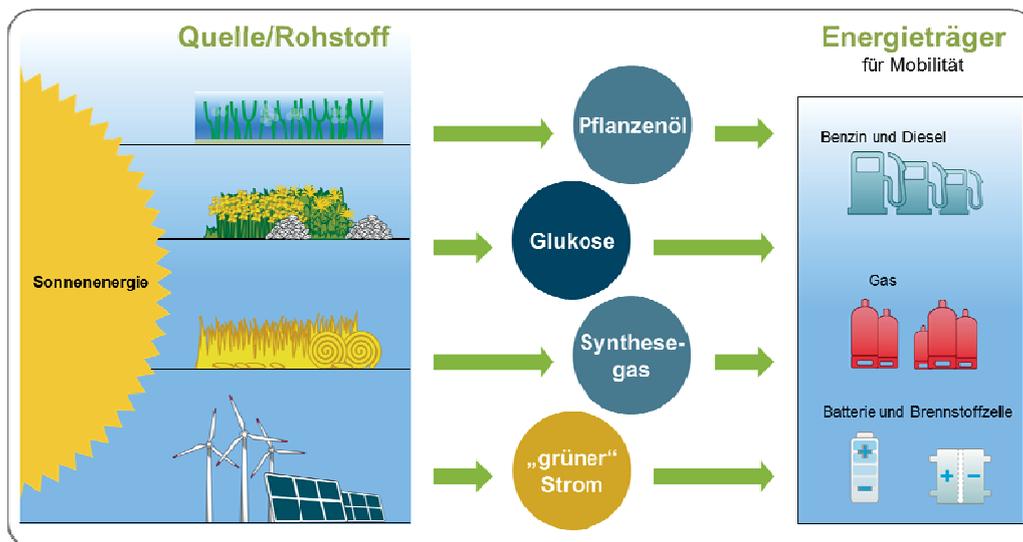


Bild 1: Alternative Energieträger in der Mobilität

Die gerade in Deutschland zunehmende Verfügbarkeit überschüssiger regenerativer elektrischer Energie fördert zudem die Entwicklung von Produktionstechnologien sog. E-fuels, d.h. von Kohlenwasserstoffen aus CO<sub>2</sub> und elektrischer Energie.

### 3. Elektrifizierte Antriebe

Neben der politischen Forderung nach reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in verschiedenen politischen Grundsatzpapieren aber auch direkt der verstärkte Einsatz von alternativen, d.h. im Wesentlichen elektrifizierten, Antrieben gefordert. Im „White Paper Transport“ der Europäischen Kommission [2] wird abweichend von der üblichen Technologieneutralität politischer Vorgaben gefordert, dass im Jahr 2030 jedes zweite in der Stadt fahrende Fahrzeug mit einem alternativen Antrieb ausgestattet sein muss. Im Jahr 2050 soll dies für alle Fahrzeuge gelten. Auch wenn die Politik unzulässigerweise damit den Grundsatz der Technologieneutralität verlässt und sich in die gefährliche Planwirtschaft bewegt, wird daraus deutlich, dass die Elektrifizierung eine klare politische Forderung ist, die durch weitere Regelungen und Rahmensetzungen erzwungen werden wird.

Um dieser Forderung gerecht zu werden, müssen marktgerechte Fahrzeuge entwickelt und angeboten werden. Dies erfordert ein fein abgestuftes, den Kundenanforderungen entsprechendes Angebot an elektrifizierten Fahrzeugen. Die Diversität der



Angebote geht dabei von Mild-Hybriden über Plug-In-Hybride zu voll batterieelektrischen Antrieben und langfristig möglicherweise den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieben. Mit diesen Angeboten wird die Industrie sowohl den Kundenanforderungen an individuelle Stadtmobilität, als auch der nach wie vor notwendigen Langstrecken- und interurbanen Mobilität gerecht. Sowohl weitere Entwicklungen zur Verbesserung der Batteriekapazitäten und damit der Reichweite der Fahrzeuge, als insbesondere auch Kostenreduzierungen sind jedoch notwendig um den elektrifizierten Fahrzeugen einen Markterfolg zu ermöglichen.

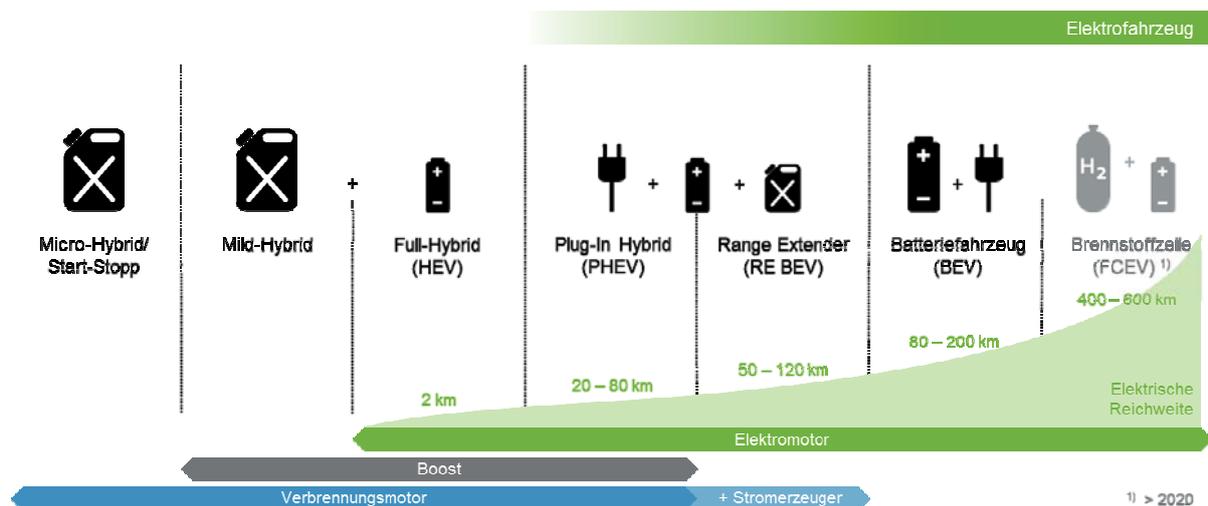


Bild 2: Elektrifizierung der Antriebe

Dem Plug-In-Hybriden wird hierbei eine bedeutende Rolle zugesprochen. In diesem Konzept wird eine elektrische Kurzstreckenmobilität von ca. 50 km mit der Langstreckenmobilität eines verbrennungsmotorischen Antriebs in einem Fahrzeug verbunden. [3] Gleichzeitig können derartige Konzepte aufgrund der geringeren Batteriegröße gegenüber rein elektrischen Antrieben preislich zwischen dem verbrennungsmotorischen und dem rein elektrischen Antrieb platziert werden.

Batterieelektrische Antriebe weisen gegenüber dem verbrennungsmotorischen Antrieb heute eine ca. 3-fach höhere Effizienz und eine lokale Schadstofffreiheit auf. Ihr CO<sub>2</sub> reduzierendes Potential können elektrische Antriebe aber nur dann ausschöpfen, wenn die Batterie mit regenerativer elektrischer Energie geladen wird. Aber auch bei der Produktion der Batterie müssen verstärkt regenerative Energien und effiziente Herstellungsmethoden zum Einsatz kommen, da sonst in den Life-Cycle-Analysen aufgrund des erhöhten Herstellungsaufwandes der Batterie erheblich höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgezeigt werden.

#### 4. Fazit

Die Steigerung der Energie- und Ressourcen-Effizienz ist eine politische und gesellschaftliche Forderung, der die Industrie nachkommen muss. Dazu ist die kontinuierliche Verbesserung konventioneller Antriebe und Fahrzeuge notwendig. Gleichzeitig müssen aber auch alternative, elektrifizierte Antriebe in den Markt eingeführt werden.



Um eine wirkungsvolle Reduzierung der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erzielen ist aber auch die Dekarbonisierung aller genutzten Energien notwendig. Daher ist nicht nur bei den kohlenwasserstoffbasierten Energien, sondern auch bei der elektrischen Energie eine Energiewende hin zu regenerativen Energien notwendig.

Mit jeder Effizienzsteigerung bei den Antrieben wird diese Energiewende erleichtert, wird doch der absolute Bedarf an alternativen Energieträgern damit reduziert.

## Literatur

- [1] Tobias Lösche-ter Horst et al., „Biofuels for sustainable mobility“, 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2011
- [2] Europäische Kommission, „**WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system**“, COM/2011/0144 final
- [3] Heinz-Jakob Neußer, „Performance und Effizienz: Zukünftige Antriebstechnologien im Volkswagen Konzern“, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, 9. Mai 2014, Wien



# Nach der Neuformierung von EU-Parlament und EU-Kommission: Wie geht es weiter mit der europäischen Biokraftstoffpolitik?

---

Stephan Arens, Dieter Bockey

## Abstract

By implementing Renewable-Energy-Directive (RED) and Fuel Quality Directive (FQD) EU member states were for the first time obliged to fulfill mandatory aims of renewable energy until 2020. Introduction and documentation of sustainability requirements within EU and in third countries is a new condition for market access. European Commission presented a proposal for amending these directives by capping conventional biofuels, implementing iLUC-factors and sub quotas for advanced biofuels. Discussions within the European Parliament and EU-member states is still going on.

## 1. Einleitung

Mit Inkrafttreten der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, 2009/28/EG) und der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD, 98/70/EG) [1] [2] wurden 2009 für alle EU-Mitgliedsstaaten erstmals Ziele für den Anteil erneuerbarer Energien festgelegt. Bis 2020 muss ein Anteil an der von ihnen verbrauchten Gesamtenergie von 20 % und als Unterziel im Transportsektor von 10 % erreicht werden. Beide Richtlinien sind die Basis für eine ambitionierte Klima- und Ressourcenschutzpolitik der EU. Sie sind auch ein wesentlicher Teil der im Jahr 2007 beschlossenen EU-Klimaziele. Bis 2020 sollen die Treibhausgas (THG)-Emissionen um mindestens 20 % gegenüber 1990 gesenkt werden. Die EU-Kommission hat im Januar 2014 Vorschläge für eine Fortschreibung dieser Ziele bis ins Jahr 2030 vorgelegt.

Biokraftstoffe sind von den Regelungen der o.g. Richtlinien besonders betroffen, weil darin nicht nur die Kriterien der Nachhaltigkeit und deren Nachweis als Voraussetzung für den Marktzugang geregelt sind, sondern auch die Qualitätsanforderungen fossiler Kraftstoffe hinsichtlich der maximal möglichen Beimischungsanteile von Biodiesel und Bioethanol. Bei solch ambitionierten Ziele stellt sich die Frage, wie bzw. mit welchen Biokraftstoffen diese erfüllt werden können. Bei der aktuellen Novellierung beider Richtlinien geht es im Kern um die Suche nach einem Kompromiss, wie das Klimaschutz- bzw. 10 %-Ziel im Lichte der Biomasseverfügbarkeit und der Anreize zur THG-Optimierung erfüllt werden kann. In diesem Umfeld diskutierten das Europäische Parlament (EP) und der EU-Energieministerrat in den vergangenen Monaten die Vorschläge der EU-Kommission intensiv. Der Beitrag erläutert die aktuelle Diskussions- bzw. Beschlusslage. Aufgrund der Neuwahl des EP und der laufenden Neuformierung der EU-Kommission stand zum Redaktionsschluss noch nicht fest, unter welchen zeitlichen Prämissen der Beratungsprozess fortgeführt wird.



## 2. Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) – Rahmenbedingungen

In dieser Richtlinie sind nicht nur die förderpolitischen Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe, sondern für alle erneuerbaren Energieträger (Strom / Wärme) geregelt. Das aktuelle Urteil des Europäischen Gerichtshofes vom 1. Juli 2014 [3] zur Ökostromförderung verdeutlicht den Spagat zwischen freiem Markt- und damit Förderzugang (Einspeisevergütung) und der Vorrangstellung der nationalen Energie- und Klimaschutzpolitik. Gerade diese Frage ist bei Biokraftstoffen geregelt. Importierte Biokraftstoffe oder zu deren Herstellung bestimmte Rohstoffe werden bzw. müssen nach EU-Recht auf Steuerbegünstigungen oder Quotenverpflichtungen angerechnet werden. Insbesondere pflanzenölbasierte Biokraftstoffe oder deren Rohstoffe zeichnen sich durch eine an Rohöl oder Dieselkraftstoff gemessene hohe Energiedichte und damit globale Transportwürdigkeit aus. Diese Eigenschaft führte vor allem bei Palm- und Sojaöl zu einer kontrovers geführten, bis heute andauernden Diskussion über die möglichen negativen Wirkungen der EU-Förderpolitik in Drittstaaten. Im Mittelpunkt standen und stehen Fragen über Auswirkungen auf Nahrungsmittelpreise und -verfügbarkeit (Food vs. Fuel) [4] und mögliche indirekte Landnutzungsänderungen (indirect Land Use Change - iLUC) [5]. Mit der Einführung des verbindlichen 10 %-Ziels für erneuerbare Energien im Transportsektor entbrannte eine Diskussion, ob zusätzliche THG-Emissionen aus der Anlage von Palmölplantagen auf Rodungsflächen zum Zwecke des Angebotsausgleichs der Klimabilanz von Biodiesel aufgeschlagen werden müssen, obwohl er hierzulande meist aus Rapsöl hergestellt wird? Diesen Bedenken versuchte die EU-Kommission bereits in der geltenden Richtlinie durch folgende Regelungen Rechnung zu tragen:

1. Einführung von Nachhaltigkeitskriterien für den Nachweis der Biomasse-Herkunft,
2. Nachweis einer steigenden Treibhausgasminderung des Biokraftstoffs im Vergleich zum fossilen Kraftstoff (THG-Effizienz),
3. Einführung von Zertifizierungssystemen für die Nachhaltigkeit und Aufbau von Zertifizierungsstellen,
4. Einführung einer umfangreichen Berichterstattung durch Mitgliedstaaten und EU-Kommission; Prüfung der iLUC-Frage.

Die EU-Kommission hat außerdem Kriterien für die Berechnung der THG-Minderung vom Anbau über den Transport bis hin zur Verarbeitung festgelegt. Die Mitgliedstaaten wurden verpflichtet, in nationalen Aktionsplänen den Biokraftstoffbedarf für die Erfüllung der Ziele aufzuzeigen. Deutschland meldete der EU-Kommission für den Dieselmotor einen Bedarf in Höhe von rund 5,2 Mio. Tonnen für das Jahr 2020 (alle EU-Mitgliedstaaten zusammen: 21,83 Mio. Tonnen). Naturgemäß kamen Fragen auf, z.B.: Woher sollen die benötigten Biokraftstoff- bzw. Rohstoffmengen kommen? Ist der Fahrzeughalter mitverantwortlich, wenn die EU mit ihrer Förderkulisse eine Biokraftstoffverwendung praktisch erzwingt? In Zeiten von Getreideüberschüssen in der EU und einer Politik der Flächenstilllegung wurden diese Fragen in der Öffentlichkeit nicht gestellt.

Gut 20 Jahre später dient ausgerechnet die EU-Biokraftstoffpolitik Nichtregierungsorganisationen als „Problemkulisse“, um mit medienwirksamen Kampagnen auf die Gefährdung von schützenswerten Biotopen, die Mitverantwortung für den Hunger in der Welt usw. hinzuweisen. Die UFOP hat es sich zur Aufgabe gemacht, auf die Er-



folge der EU-Biokraftstoffpolitik hinzuweisen. Aus Sicht der UFOP wird nicht ausreichend anerkannt, dass mit der EU-Biokraftstoffpolitik Nachhaltigkeitskriterien eingeführt wurden, die unmittelbar ordnungsrechtlich in Drittstaaten anzuwenden sind. Sie ist das bisher wirksamste und umfassendste Regelungsinstrument, EU-Recht in Drittstaaten einzuführen und zu kontrollieren. Dazu hat die Kommission aktuell 17 (!) Nachhaltigkeits-Zertifizierungssysteme zugelassen. Man stelle sich analoge Anforderungen bei fossilen Rohstoffen oder Kraftstoffen vor. Im Bereich der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe dienen diese bestehenden Kriterien und Zertifizierungssysteme als Grundlage für die Rohstoffzertifizierung (Synergieeffekte). Die Oleochemie ist bei Palmöl der mit Abstand größte Abnehmer, weit vor der europäischen Biokraftstoffindustrie. Diese Fakten sind bei der weiteren politischen Diskussion der von der Kommission vorgelegten Vorschläge zur Änderung der o. g. Richtlinien zu berücksichtigen.

### **3. Vorschlag der EU-Kommission vom Oktober 2012 zur Novellierung von RED und FQD [6]**

Entsprechend dem Auftrag zur Untersuchung indirekter Landnutzungsänderungen infolge der EU-Biokraftstoffpolitik stellte die EU-Kommission einen grundsätzlichen Korrekturbedarf fest. Das „iLUC-Phänomen“ war damit zwar politisch anerkannt, allerdings wurde einschränkend festgehalten, dass wissenschaftliches Neuland betreten wird und Forschungsbedarf besteht. Die EU-Kommission schlug folgende Kernpunkte zur Änderung der Richtlinien vor:

1. Einführung von iLUC-Faktoren als Maluswert (Angabe in g CO<sub>2</sub>/MJ) im Wege einer Berichterstattung: Getreide 12, Zucker 13, Ölpflanzen 55; ab 2021 sollen diese verpflichtend in der THG-Bilanz berücksichtigt werden;
2. Einführung einer Kappungsgrenze von 5 % für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse (Raps, Getreide, Zuckerrohr, Zuckerrüben, Palmöl);
3. Einführung einer Mehrfachanrechnung (zweifach/vierfach) von Biokraftstoffen aus Rest- bzw. Abfallstoffen;
4. Einführung einer Reststoff- bzw. Abfall-Liste sowie neuer Rohstoffkategorien (u.a. Algenöl) zur Definition entsprechender Rohstoffe für eine Vierfachanrechnung;

### **4. Beschlusslage im Europäischen Parlament [7] und im EU-Energieministerrat [8]**

Der Vorschlag der EU-Kommission wurde in den zuständigen Ausschüssen des EP und im EU-Energieministerrat kontrovers diskutiert. Neben der Frage der Zulässigkeit von iLUC-Faktoren stand die Forderung der Biokraftstoffindustrie und der Landwirtschaft nach einem Vertrauensschutz für bestehende Produktionsanlagen, die eng mit der Höhe der Kappungsgrenze für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse verbunden ist, im Mittelpunkt der Verhandlungen. Auch die Mehrfachanrechnung von Biokraftstoffen bestimmter Rohstoffherkünfte und die damit möglicherweise ausgelösten Betrugsanreize wurden sehr kritisch beurteilt.



Die Beschlusslage im Überblick:

**Klimaschutzziel:** keine Änderung: 10 % Erneuerbare Energien im Verkehrssektor bis 2020

	<b>Europäisches Parlament (Sept. 2013)</b>	<b>EU-Energieministerrat (Juni 2014)</b>
<b>Kappungsgrenze konventioneller Biokraftstoffe</b>	<b>6 % (entspricht Absatz in D) Unterziel Bioethanol: 7,5%)</b>	<b>7 % (Entwicklungspotenzial)</b>
<b>Unterquote 2. Gen.</b>	<b>mind. 2,5 % (verpflichtend)</b>	<b>0,5 % (freiwillig)</b>
<b>Zielanrechnung</b>	<b>Reststoffe: 1-fach Algenöl/Power-to-gas: 4-fach</b>	<b>2-fach – einschl. Algenöl</b>
<b>iLUC-Faktoren</b>	<b>verpflichtend ab 2020 (FQD); wissenschaftl. Prüfung</b>	<b>Berichterstattung EU-KOM; wissenschaftl. Prüfung</b>
<b>eMobilität</b>	<b>soll gefördert werden</b>	<b>Straßenverkehr: 4-fach Schienenverkehr: 2,5-fach</b>

Aus Sicht der UFOP konzentriert sich die Diskussion auf die oben beschriebenen Punkte. Praktisch unbeachtet bleibt die Tatsache, dass sich die Biokraftstoffpolitik auch an den einschlägigen Normen, den darin vorgegebenen Beimischungsgrenzen und an Mengenpotenzialen orientieren muss. Dies zeigt den Korrektur- bzw. Abstimmungsbedarf zwischen nationalen Aktionsplänen und der europäischen Biokraftstoffstrategie deutlich. Der Vorschlag der EU-Kommission für ein Klima- und Energiepaket 2030 [9] sieht kein Unterziel für den Transportsektor mehr vor. Unter dieser Voraussetzung ist kaum zu erwarten, dass Unternehmen sich auf Investitionsrisiken bei innovativen Verfahren für die Biokraftstoffherstellung einlassen. Die Fortführung der Forschungsförderung auf diesem Gebiet macht auf EU- wie nationaler Ebene dann nur noch wenig Sinn.

## Literatur

- [1] Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbare Quellen (Erneuerbare-Energien-Richtlinie – RED)
- [2] Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren (FQD)
- [3] Urteil des Europäischen Gerichtshofes (Große Kammer) vom 1. Juli 2014 – Rechtssache: C-573/12
- [4] Schmitz, M., Moleva, P. (2013): Bestimmungsgründe für das Niveau und die Volatilität von Agrarrohstoffen auf internationalen Märkten. Sind Biokraftstoffe verantwortlich für Preisschwankungen und Hunger in der Welt? Studie, Institut für Agrarpolitik und Marktforschung, Justus-Liebig-Universität Gießen
- [5] <http://www.ufop.de/iluc/einfuehrung/>



- [6] Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen
- [7] European Parliament legislative resolution of 11 September 2013 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources (COM(2012)0595 – C7-0337/2012 – 2012/0288(COD))
- [8] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources (**first reading**) – Political agreement
- [9] COM(2014) 15 final vom 22. Januar 2014, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030





# Kraftstoffe für die Mobilität von morgen

1. Tagung der Fuels Joint Research Group

**Kraftstoffe – Quellen, Potenziale, Anforderungen**

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



# „Electrofuels“ – Elektrochemie als Werkzeug für nachhaltige Kraftstoffsynthesen

U. Schröder, T. dos Santos, P. Nilges, F. Harnisch

Die Veränderungen, die wir momentan in den Sektoren Energie und Mobilität erleben, haben zu einem enormen Aufschwung der Elektrochemie geführt. Dieser Aufschwung basiert maßgeblich auf der Erforschung und Entwicklung leistungsfähiger Batterietechnologien – Voraussetzung für einen Erfolg der Elektromobilität.

Jedoch kann die Elektrochemie viel mehr leisten. Den Prinzipien der nachhaltigen (grünen) Chemie folgend, können elektrochemische Methoden interessante Alternativen zu konventionellen chemischen Prozessen – auch zur Biokraftstofferzeugung – darstellen. Dabei sind einige der zugrunde liegenden fundamentalen elektrochemischen Reaktionen mehr als 160 Jahre alt <sup>[1]</sup> und warten auf ihre Nutzung im Kontext der Energiewende.

Die elektrochemische Synthese bietet hier die potentielle Möglichkeit, Energie aus fluktuierenden Energiequellen wie Windkraft und Photovoltaik chemisch in der Form flüssiger Kraftstoffe speichern zu können und verknüpft somit die Forderung nach alternativen Energiespeichern und die Notwendigkeit der Entwicklung von Kraftstoffen für die verbrennungsbasierte Mobilität.

In diesem Beitrag möchten wir die Nutzung der elektrochemischen Synthese als alternativen Weg der Biokraftstofferzeugung vorstellen. Dies soll an drei chemischen Systemen illustriert werden: der elektrochemischen Umsetzung von (i) Lävulinsäure, (ii) Methylfurfural und 5-HMF sowie (iii) Pflanzenölen und Ölsäuren. Während Lävulinsäure, Methylfurfural und 5-HMF typische Produkte der Dehydratation von Kohlenhydraten wie Zuckern, Stärke, Cellulose und Hemicellulose darstellen, basiert die Ölumsetzung auf der direkten Nutzung von Pflanzenölen.

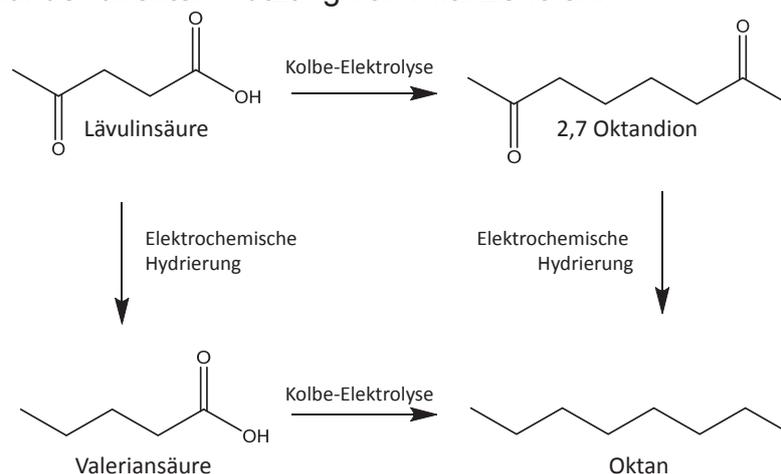


Abbildung 1: Schematische Illustration der Reaktionswege für eine elektrochemische Umsetzung von Lävulinsäure zu Oktan (adaptiert aus<sup>[2]</sup>)

Die elektrochemischen Umsetzungen, wie die in Abbildung 1 dargestellte Synthese von n-Oktan aus Lävulinsäure, können in wässrigen Lösungen durchgeführt werden, was eine einfache Produktseparation sowie die Rückführung der Elektrolytlösung in den Reaktionskreislauf ermöglicht (Abbildung 2)<sup>[2]</sup>.

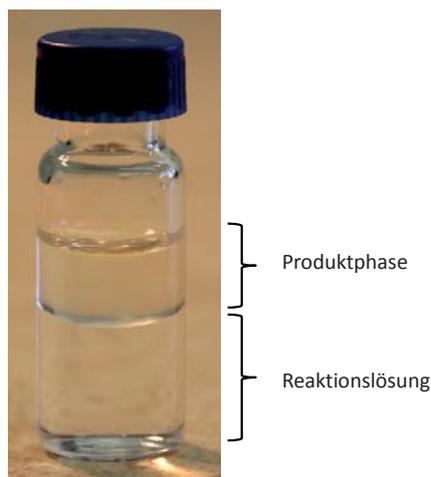


Abbildung 2: Elektrochemische Umsetzung in wässrigem Elektrolyten erlaubt einfache Produktseparation und Elektrolytrecycling

In einem weiteren Beispiel lassen sich Furfural und 5-Hydroxy-Methylfurfural (5-HMF), wie in Abbildung 3 beispielhaft für Furfural dargestellt, elektrochemisch zu Furanen hydrieren<sup>[3]</sup>. Die elektrochemische Hydrierung ersetzt dabei – wie auch im Fall der Hydrierung von Lävulinsäure zu Valeriansäure – traditionelle katalytische Verfahren, die hohe Reaktionstemperaturen und Wasserstoffpartialdrücke erfordern.

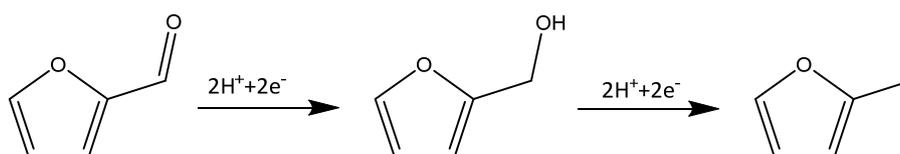


Abbildung 3: Elektrochemische Reduktion (Hydrierung) von Furfural zu Furfurylalkohol und Methylfuran (adaptiert aus <sup>[3]</sup>)

Eine energetische Betrachtung erläutert die Parameter, welche die energetische Effizienz der elektrochemischen Prozesse bestimmen<sup>[4]</sup>. Sie zeigt, unter welchen Bedingungen die Elektrosynthese konventionellen Verfahren energetisch überlegen sein kann.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Stiftungsprofessur Nachhaltige Chemie und Energieforschung an der TU Braunschweig (2008-2013) durch die Volkswagen AG und den Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie.

## Referenzen

- [1] H. Kolbe, *Annalen der Chemie und Pharmacie* **1849**, 69, 257-294.
- [2] P. Nilges, T. R. dos Santos, F. Harnisch, U. Schröder, *Energy & Environmental Science* **2012**, 5.
- [3] P. Nilges, U. Schröder, *Energy and Environmental Science* **2013**, 6, 2925-2931.
- [4] T. R. dos Santos, F. Harnisch, P. Nilges, U. Schröder, *submitted*.



# Alternative Kraftstoffe in der Luftfahrt

---

Ulrike C. Heckenberger

## Abstract

The aeronautic industry has committed itself to a carbon-neutral growth by 2020 expressing three sequential challenging goals. As for aviation safety comes first, the introduction of drop-in fuels as (interim) solution has to be backed by certification and qualification. With increasing availability of such fuels the experience is growing providing room for confidence as well as asserting the needs for investigations.

## 1. Warum beschäftigen wir uns mit alternativen Kraftstoffen?

In der Vergangenheit hat in der Luftfahrt das Thema der Gewichtsreduktion und die damit verbundene Treibstoffersparnis eine große Rolle gespielt. Auch wenn der Kerosinverbrauch nicht in demselben Maß zugenommen hat wie die Transportleistung, so hat die Luftfahrtindustrie erkannt, dass zusätzlicher Handlungsbedarf besteht. Im Zuge der nach Kyoto gestiegenen Erwartungen zum Umwelt- und Klimaschutz hat sie sich deshalb ehrgeizige Ziele bezüglich der Treibhausgas-Emissionen gesetzt. Auf der 65. Generalversammlung von den im Weltairlinerverband IATA zusammengeschlossenen Fluggesellschaften wurde 2009 die Selbstverpflichtung für ein „CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum“ mit folgenden drei Punkten beschlossen:

1. ab 2009 bis 2020 1.5 % jährliche Verbesserung der Treibstoffeffizienz,
2. ab 2020 soll der weltweite Luftverkehr CO<sub>2</sub>-neutral wachsen,
3. und bis 2050 sollen die netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50% im Vergleich zum Jahr 2005 reduziert werden.

Diesen drei Zielen verpflichtet haben sich inzwischen auch weitere Organisationen wie z.B. 2010 die ATAG (Air Transport Action Group). In der ATAG sind Mitglieder aus den verschiedensten Sektoren der weltweiten zivilen Luftfahrtindustrie organisiert (wie z.B. Fluggesellschaften, Flugzeughersteller, Triebwerkshersteller, Flughäfen etc.).

Sicherheit ist die erste Priorität in der Luftfahrt. Deshalb lassen sich auch Flugzeuge nicht so ohne weiteres „umrüsten“, was zu typischen Produktionszyklen zwischen 20 und 30 Jahren führt. Berücksichtigt man dann noch eine übliche Nutzungsdauer von ebenfalls 20 bis 30 Jahren, so stellen die Ziele 2 und 3 eine Herausforderung dar, vor allem weil die Luftfahrt zu einer Wachstumsbranche zählt.

## 2. Was zeichnet alternative drop-in Kraftstoffe aus?

Sogenannte alternative „drop-in“ Kraftstoffe scheinen eine gute (Zwischen-)Lösung darzustellen. Drop-in heißt in diesem Zusammenhang, dass der operationelle Betrieb der Flugzeuge beibehalten werden kann, weil sich der Kraftstoff im Prinzip wie



konventionelles Kerosin verhält und sich weder an der Leistung noch an den Anforderungen z.B. bzgl. der Wartung etwas ändert. Dies wird von der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA in ihrem Bulletin NE-11-56 für Kraftstoffe bestätigt, die nach ASTM-D7566 „Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“ hergestellt, zertifiziert und zugelassen sind. Im Gegensatz dazu wäre für neue, „non-drop-in“ Kraftstoffe eine (Re-)Zertifizierung der Triebwerke und ggf. sogar der Flugzeuge notwendig, die mit solchen Triebwerken ausgestattet sind.

In der ASTM Spezifikation D7566 erfasst waren 2013 zwei Sorten von synthetischem Kerosin: zum einen Kohlenwasserstoffe, die nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren aus Kohle, Biomasse oder Gas hergestellt werden, und zum anderen hydrierte Ester und Fettsäuren, die auf Pflanzenölen und/oder Tierfetten basieren. Die Anforderungen, die dabei an die Eigenschaften des synthetischen Kerosins gestellt werden, sind aus Sicherheitsgründen zum Teil sogar restriktiver als die, die für Kerosin aus fossilem Rohöl gelten. Zusätzlich ist auch festgelegt, dass das synthetische Kerosin mit mindestens 50 % an konventionellem Kerosin der Sorte Jet A oder Jet A-1 verschnitten werden muss. 2014 neu dazugekommen sind Kraftstoffe, für die Fermentationsprodukte aus Sachariden in Farnesan umgewandelt werden. Allerdings ist für diese Gruppe nur eine maximale Zumischung von 10 % zu konventionellem Kerosin zugelassen.

Bei einer angenommenen Treibhausgasreduktion von 60 %, die ab 2017 bzw. 2018 in der EU für erneuerbare Kraftstoffe nachgewiesen werden muss, würde ein angenommenes Wachstum von nur 2.5 % jährlich bei einer Zumischung von 50 % bereits nach weniger als 20 Jahren die Grenzen des CO<sub>2</sub>-neutralen Wachstums erreichen.

### 3. Wie geht's weiter?

Auch wenn der Luftverkehr im Vergleich zum Güter- und Personentransport auf der Straße nur einen Bruchteil ausmacht, so stellt die Ausgangslage für alternative Kraftstoffe eine beachtliche Herausforderung dar. Dem von der internationalen Energiebehörde IEA 2008 angegebenen Bedarf an Kerosin von 240 Mio t/Jahrstand in 2011 nur eine Anlagenkapazität von 22 kt/Jahr gegenüber.

Potentialanalysen zeigen, dass es nicht *den besten* alternativen Kraftstoff gibt, sondern dass abhängig von den lokalen Gegebenheiten unterschiedliche Prozessrouten und Rohstoffe in Frage kommen.

Neben offensichtlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, die Kosten der Herstellung von alternativen drop-in Kraftstoffen zu senken, wird auch verstärkt an der Zulassung von weiteren Herstellrouten gearbeitet. Darüber hinaus erlaubt auch die langsam steigende Verfügbarkeit von alternativen Kraftstoffen, Erfahrungen zu sammeln, um Sicherheitsbedenken aus dem Weg zu räumen und in Zukunft die Vorgaben zur Zulassung auf ein notwendiges Maß zu begrenzen.



# Stand und Perspektiven für Biokraftstoffe – Überblick und Forschungsschwerpunkte des DBFZ

---

Franziska Müller-Langer, Stefan Majer, Karin Naumann, Daniela Thrän

## Abstract

Biofuels are promoted as part of the EU decarbonisation strategy to reduce the associated GHG emissions of the transport sector and increase the share of renewable energies. In the following, an overview of the most important biofuel options, their characteristics, biofuel potentials and future perspectives are given. Moreover, research focus topics of the DBFZ are introduced.

## 1. Hintergrund

Klimaschutz im Verkehr geht über die heute etablierten Anwendungsfelder hinaus. Dabei 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 künftig stärker durch die erreichbare Klimaschutzeffizienz bestimmt sein.

Ein erster Schritt in diese Richtung ist der Systemwechsel von der derzeit geltenden energiebezogenen Biokraftstoffquote hin zu einer Treibhausgas(THG)-Quote ab 2015 als nationale Umsetzung der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD, 2009/30/EG bzw. 98/70/EG) über das §37 BImSchG / BiokraftQuG. Die Anforderungen an Biokraftstoffe sind in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, 2008/29/EG) bzw. der BiokraftNachV geregelt. Beide Richtlinien sind wesentliche Meilensteine für die Zielerreichung der Europäischen Union zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

Nachfolgender Beitrag gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der Biokraftstofftechnologien, zu erwarteten Biokraftstoffpotenzialen und Perspektiven für die Weiterentwicklung. Er endet mit einem Einblick in die Forschungsaktivitäten des DBFZ zu dieser Thematik.

## 2. Biokraftstofftechnologien

Bislang decken die heute verfügbaren konventionellen Biokraftstoffe (sog. erste Generation) ca. 2 % des weltweiten Gesamtkraftstoffverbrauchs. Dazu zählen Biodiesel auf Basis der Umesterung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten sowie Bioethanol auf Basis der Fermentation aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzenteilen sowie in Teilmärkten ebenso HVO/HEFA und Biomethan (Tabelle 1). Die öffentliche Diskussion potenzieller Nutzungskonkurrenzen (sogenannte Tank-Teller-Diskussion), aber auch die Nachfrage nach hochqualitativen Kraftstoffen, welche leicht in die bestehende Infrastruktur integrierbar sind und ein hohes Treibhausgasemissionsminderungspotenzial aufweisen, haben das Interesse von Politik, Wirtschaft und Forschung an al-



ternativen Biokraftstoffen der Zukunft (sog. zweite und dritte Generation) verstärkt. Aus der Vielzahl der in der Diskussion befindlichen diesbezüglichen Optionen werden in Tabelle 1 die Wichtigsten vorgestellt.

Tabelle 1 Technische Charakteristika relevanter Optionen (nach [1], [2])

Biokraftstoffoption	Typische Nebenprodukte <sup>a</sup>	Technikstand <sup>b</sup>	Installierte Kapazität   Produktion weltweit   Fokusregion (2013) <sup>c</sup>
Biodiesel / Fatty acid methyl ester (FAME)	Extraktionsschrot, Glycerin	kommerziell TRL 9	>70 Mio t a <sup>-1</sup>   17 Mio t a <sup>-1</sup>   US/LA: Soja, EU: Raps, SA: Palm
Hydrotreated veg. oils bzw. esters and fatty acids (HVO / HEFA)	(Extraktionsschrot), Propan, Benzinfraktionen	kommerziell TRL 9	ca. 2,3 Mio t a <sup>-1</sup>   unbekannt   EU/SA: Palm, Alt-speiseöl, tier. Fette
Bioethanol (konventionell)	Zucker: Bagasse / Vinasse  Stärke: Gluten, Schlempeprodukte wie DDGS <sup>d</sup> , Dünger, Biogas	kommerziell TRL 9	>100 Mio t a <sup>-1</sup>   70 Mio t a <sup>-1</sup>   US: Mais, BR: Zuckerrohr, EU: Weizen, Zuckerrübe
Bioethanol (Lignocellulose)	Ligninbasierte Produkte, Pentosen, Schlempeprodukte wie Dünger, Biogas	Demoanlagen TRL 7	ca. 0,111 Mio t a <sup>-1</sup>   oft Testkampagnen   US/EU: Stroh, BR: Bagasse
Biomethan / Biogas	Gärrest, Strom	kommerziell TRL 9	ca. 0,71 Mio t a <sup>-1</sup> (EU)   oft Testkampagnen   EU/DE: verschiedene
Biomethan / Synthetic Natural Gas (SNG)	Strom und Wärme	Demoanlagen TRL 7	ca. > 0,036 Mio t a <sup>-1</sup> (EU)   oft Testkampagnen   EU: Holz
Synthetic biomass-to-liquids (BTL)	Wachse, Naphtha, Strom, Wärme	Pilotanlagen TRL 6	ca. 0,140 Mio t a <sup>-1</sup>   oft Testkampagnen   EU/NA: Holz, Stroh

<sup>a</sup> abhängig vom Anlagendesign; <sup>b</sup> Bezug zum sog. Technology readiness level (TRL) der Europäischen Kommission (1 - basic principles observed, 2 - technology concept formulated, 3 - experimental proof of concept, 4 - technology validation in lab, 5 - technology validation in relevant environment, 6 - demonstration in relevant environment, 7 - demonstration in operational environment, 8 - system completed and qualified, 9 - successful mission operations), <sup>c</sup> BR – Brasilien, DE – Deutschland, EU – Europäische Union, LA – Lateinamerika, NA – Nordamerika, US – USA; <sup>d</sup> Distiller's Dried Grains with Solubles



### 3. Kraftstoffpotenziale auf der Basis von inländischer Biomasse

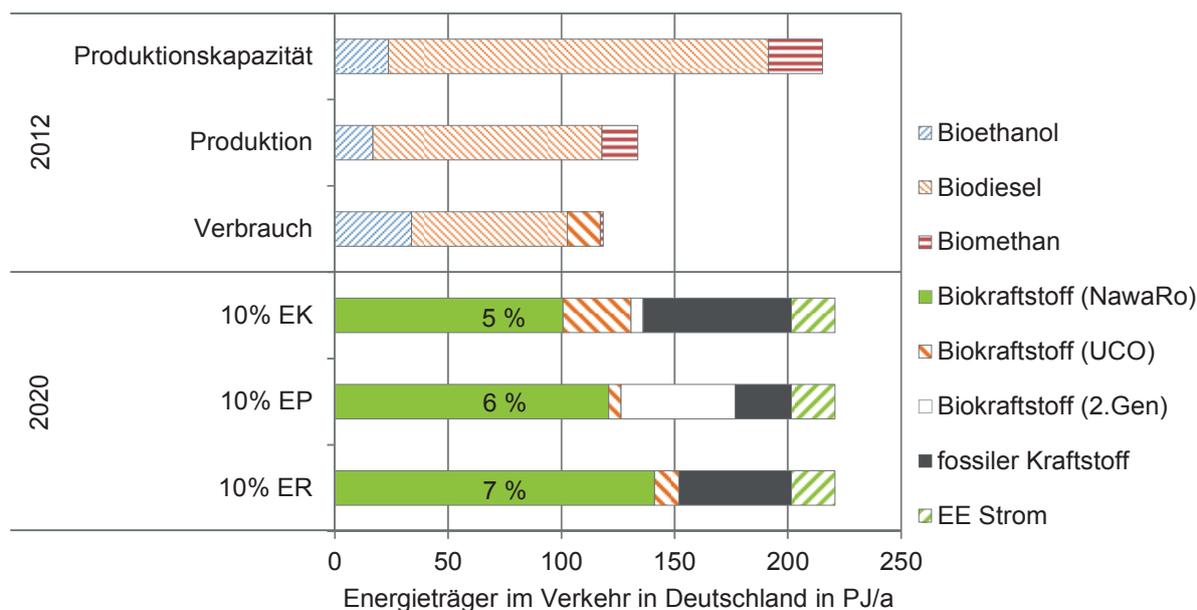
Biokraftstoffe werden international produziert und gehandelt. Die gegenwärtige Erzeugung von Biokraftstoffen in Deutschland umfasst 2,7 Mio. t Biodiesel und 0,6 Mio. t Bioethanol (Bezugsjahr 2012) [3]. Diese Menge entspricht insgesamt etwa 118 PJ, wobei die Biodieselproduktion etwa 107 % und die Bioethanolproduktion etwa 49 % des nationalen Einsatzes decken können; dabei sind Im- und Exporte von und nach Deutschland nicht berücksichtigt (Biokraftstoffeinsatz nach [4]). Derzeit werden in Deutschland etwa 2,5 Mio ha für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen genutzt. Davon entfallen wiederum ca. 1,2 Mio ha auf die Produktion von Rohstoffen für flüssige Biokraftstoffe (Biodiesel und Bioethanol) [5]. Bei der Bereitstellung von Biodiesel und Bioethanol entstehen dabei erhebliche Mengen an Nebenprodukten (v. a. eiweißreiche Futtermittel und biogenes Glycerin).

Die für den Biokraftstoffsektor verfügbaren Potenziale an Biomasse aus heimischem Anbau wie auch die Mengen geeigneter Abfall- und Reststoffe sind begrenzt. Die künftigen Biokraftstoffpotenziale werden durch eine Vielzahl von Wechselwirkungen auf der Ebene der landwirtschaftlichen Produktion sowie der förderpolitischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Berechnungen des DBFZ auf der Basis der Untersuchungen von [6] ergeben ein Biokraftstoffpotenzial aus heimischen Energiepflanzen und landwirtschaftlichen Reststoffen (z. B. Stroh) von ca. 150 bis 170 PJ im Jahr 2020 bzw. 180 bis 220 PJ im Jahr 2030. Diese Potenzialabschätzungen berücksichtigen den künftigen Biomassebedarf für die Nutzung zu stofflichen Zwecken sowie zur Produktion von Strom und Wärme. Um vor allem das Potenzial an landwirtschaftlichen Reststoffen für den Kraftstoffsektor zu erschließen, sind weitere Anstrengungen im Bereich der Forschung und Entwicklung von neuen Kraftstoffen (Bioethanol aus Lignocellulose, SNG, BTL) sowie ein verlässlicher förderpolitischer Rahmen für den Biokraftstoffsektor erforderlich.

### 4. Perspektiven im Biokraftstoffsektor

Die globale Energienachfrage wird infolge wachsender Mobilität auch zukünftig weiter stark ansteigen. Biokraftstoffe sind in diesem Kontext neben anderen notwendigen Alternativen (z. B. weitere Effizienzsteigerungen, Elektromobilität auf Basis erneuerbarer Energien) unerlässlich, um zumindest einen Teil des zu erwartenden Mehrerenergieverbrauchs zu decken. So geht die Internationale Energieagentur IEA in ihrem Bluemap-Szenario bis zum Jahr 2050 beispielsweise von einem Anstieg der Biokraftstoffproduktion auf insgesamt 32 EJ (v. a. in den Bereichen Bioethanol sowie HVO/HEFA, BTL und Biomethan) aus, die dann maßgeblich im Straßenverkehr genutzt werden [1].

Für Europa und Deutschland hingegen ist zu erwarten, dass aufgrund der derzeit diskutierten Änderungen der politischen Rahmenbedingungen bis 2020 und darüber hinaus ein Ausbau der Biokraftstoffproduktion und die Marktabklärung innovativer Technologieansätze bedingt durch die mangelnde Ziel- und Planungssicherheit nur in Einzelfällen erfolgen wird. Mögliche Beispielszenarien bei der Umsetzung der Vorgaben der Europäischen Kommission zeigt Abbildung 1.



Annahmen für 10% Ziel in 2020: Ausschöpfung maximale Anteile für Biokraftstoffe aus landw. Rohstoffen (NawaRo), nahezu keine Kraftstoffe aus Algen, über Bakterien oder Strom verfügbar, bis zu 30 PJ Biodiesel aus Altspeseölen und -fetten (UCO) verfügbar, Strommix enthält 30 % erneuerbare Energien;

Biokraftstoff (2.Gen): innovative Biokraftstoffe aus v.a. lignocellulosehaltiger Biomasse;

EK: Vorschlag zur Änderung der RED und FQD der Europ. Kommission vom 17.10.2012; EP: legislativer Beschluss des Europ. Parlaments zum Vorschlag der Kommission, 11.09.2013; ER: Political agreement des Europarates vom 03.12.2013

Abbildung 1 Beispielszenarien für Biokraftstoffentwicklung in Deutschland (aus [7])

Darüber hinaus wird die Einführung der THG-Quote ab 2015 dazu führen, dass THG-Vermeidungskosten zu einem primären Wettbewerbskriterium für Biokraftstoffe werden.

In Abhängigkeit von den ab 2015 in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffen und deren spezifischen THG-Emissionen besteht zudem eine große Schwankungsbreite der insgesamt zur Quotenerfüllung benötigten Biokraftstoffmenge.

Sowohl die Quotenumstellung in Deutschland als auch die Diskussion um Deckelung bzw. Ausschluss bis bzw. nach 2020 landwirtschaftlicher Rohstoffe für europäische Biokraftstoffe verschieben den Fokus hin zur Nutzung von Abfall- und Reststoffen. Wichtig für die Zielerreichung sind dabei v. a. weiterführende Fördersysteme für die Etablierung alternativer Kraftstoffe, die Quantifizierung und Nutzbarmachung der Potenziale präferierter Rohstoffe sowie die Anpassung und Weiterentwicklung flankierender Kontroll- und Zertifizierungssysteme. [7]

Wenn sich die Politik zu einer kontinuierlichen Biokraftstoffstrategie entschließt, können kurzfristig vor allem Biodiesel und Bioethanolsortimente mit nachgewiesener Treibhausgasreduzierung beitragen, die erst mittelfristig schrittweise durch neue Biokraftstoffe ergänzt werden [8]. Die Etablierung neuer Bioraffineriekonzepte mit verschiedenen Rohstoffen und Produkten zur stofflichen und energetischen Nutzung wird hier eine Schlüsselrolle einnehmen.

## 5. Forschungsschwerpunkte am DBFZ

Die Forschungsschwerpunkte im Themenfeld der Biokraftstoffe und Bioraffinerien umfassen im Wesentlichen die (i) Entwicklung von Verfahren zur Biokraftstoffherzeugung



gung nebst Untersuchungen im Technikum mit Fokus auf Biomethan aus Biogas und Bio-SNG, hydrothermale Verfahren und Bioethanol, (ii) Bilanzierung und Simulation von Bi Raffinerien, (iii) Laboranalytik zur chemisch-physikalischen Charakterisierung von Biokraftstoffen und Prüfstanduntersuchungen des motorischen Verhaltens. Dies wird komplettiert durch (iv) umfassende Technikbewertung einschließlich technischer (z. B. Effizienz, Technikstatus) ökonomischer (z. B. Kostenrechnung) und ökologischer (z. B. mit Hilfe der Ökobilanzierung) Parameter und (v) Abschätzung von Potenzialen und Entwicklung von künftigen Nutzungsszenarien.

Wichtige Forschungsvorhaben in diesem Bereich sind u. a. Spitzencluster BioEconomy (BMBF, <http://www.bioeconomy.de/>), Flüssige Energieträger aus einer integrierten hydrothermalen Umwandlung von Biomasse (FEBio@H<sub>2</sub>O, BMBF), SNGPro (SAB), Optimierungspotenziale von Biokraftstoffanlagen (FNR), AUFWIND – Algenproduktion und Umwandlung in Flugzeugtreibstoffe: Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Demonstration (FNR, <http://energiepflanzen.fnr.de/projekte/algen/aufwind/>), BurnFAIR (BMWV), Meilensteine 2030 – Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen nachhaltigen Bioenergiestrategie (BMUB, <http://www.energetischebiomassenutzung.de/de/meilensteine-2030/meilensteine-2030.html>), KACELLE – Kalundborg CELLulosic Ethanol project (KACELLE) (EU FP7), GRAIL – Glycerol Biorefinery Approach for the Production of High Quality Products of Industrial Value (EU FP7, <http://www.grail-project.eu/>). Darüber hinaus arbeitet das DBFZ u. a. als Partner bei der wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie mit.

## Literatur

- [1] Müller-Langer, F., Gröngroft, A., Majer, S., O’Keeffe, S., Klemm, M.: Options for Biofuel Production – Status and Perspectives. In: Stolten, D., Scherer, V. (Eds): Transition to Renewable Energy Systems, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim 2013, p. 523-553 (doi: 10.1002/9783527673872.ch26) (2013)
- [2] Naumann, K., Oehmichen K., Zeymer, M.: Monitoring Biokraftstoffsektor. DBFZ Report 11, 2. Auflage, 2014 ISSN 2190-7943 (2014).
- [3] Destatis: Erzeugung – Erhebung über Biotreibstoffe, URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Biotreibstoffe.html> (30.06.2014)
- [4] Bundesministerium der Finanzen: Statistische Angaben zur Erfüllung der Biokraftstoffquote, (2013), URL [http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Zoll/Energiebesteuerung/Statistische\\_Angaben\\_zur\\_Erfuellung\\_der\\_Biokraftstoffquote/2013-10-09-biokraftstoffquote.html?\\_\\_act=renderPdf&\\_\\_iDocId=167022](http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Zoll/Energiebesteuerung/Statistische_Angaben_zur_Erfuellung_der_Biokraftstoffquote/2013-10-09-biokraftstoffquote.html?__act=renderPdf&__iDocId=167022)
- [5] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Anbau nachwachsender Rohstoffe 2012 auf 2,5 Millionen Hektar. URL <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/presseservice/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/archive/2012/august/article/anbau-nachwachsender-rohstoffe-2012-auf-25-millionen-hektar/>
- [6] Majer, S.; Stecher, K.; Adler, P.; Thrän, D.; Müller-Langer, F.: Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen : Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen



Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima ; Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40 [online].

- [7] Naumann, K.: Die Zukunft der Biokraftstoffe – Quotenumstellung in Deutschland versus Kehrtwende der EU. Rostocker Bioenergieforum, ISBN 978-3-86009-412-9 (2014).
- [8] Lonza, L.; Maas, H.; Venderbosch, T.: EU renewable energy targets in 2020: analysis of scenarios for transport. The JEC biofuels programme. Presentation at 22<sup>nd</sup> European Biomass Conference, 23-26.Juni 2014 in Hamburg (2014).



# Kraftstoffe für die Mobilität von morgen

1. Tagung der Fuels Joint Research Group

## Kraftstoff und motorische Wechselwirkungen

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





# Alternative Kraftstoffe im Dieselmotor mit erweiterter Variabilität

---

Ingo Blei, Peter Eilts

## Abstract

In this study, several alternative liquid fuels are investigated in a state of the art passenger car diesel engine. Suitable engine control parameters are used to rate the fuels' potential in order to increase the engine efficiency and to minimize pollutant emission by engine calibration. In particular, the variable valve train contributes to engine optimization.

## 1. Einleitung

Pkw-Dieselmotoren werden derzeit überwiegend mit Flüssigkraftstoffen fossilen Ursprungs betrieben. Der hohe Energieinhalt der eingesetzten Kohlenwasserstoffe ermöglicht in Kombination mit der hohen Effizienz des Dieselmotors hohe Reichweiten.

Über die Beimischung von Biodiesel kann der konventionelle Dieselmotor teilweise substituiert werden. Derzeit ist die volumetrische Beimischungsquote von Biodiesel gemäß der EN 590 auf maximal 7% begrenzt. Grund hierfür sind Unverträglichkeiten mit der Abgasnachbehandlung, insbesondere bei der Partikelfilterregeneration durch späte Nacheinspritzungen und der daraus resultierenden Ölverdünnung.

Die fossilen Reserven sind endlich, so dass nach weiteren Alternativen geforscht wird. Aus erneuerbaren Energieträgern herstellbar sind rein paraffinische Produkte wie HVO oder BTL, aber auch sauerstoffhaltige Komponenten wie Alkohole oder Ether.

## 2. Herangehensweise und Versuchsträger

Als Vergleichskraftstoff für alle Versuche wird Referenzdiesel (CEC-RF-06-03 kurz CEC) eingesetzt, welcher sich durch seine engen Spezifikationsgrenzen bezogen auf die Norm EN 590 auszeichnet. Für die Motorversuche ausgewählt werden zum einen gebräuchliche Weltmarktkraftstoffe, bzw. Beimischungskomponenten wie der zündwillige GtL (Gas to Liquid), oder der zündunwillige US worst case Kraftstoff (USWC). Zum anderen kommen Energieträger mit molarem Sauerstoffanteil zum Einsatz. In verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen konnte bereits die rußmindernde Wirkung von Kraftstoffen mit eingelagertem Sauerstoff (O), bzw. einem erhöhten effektiven Verhältnis von Wasserstoff (H) zu Kohlenstoff (C) (Gleichung 1) aufgezeigt werden [1]-[3].

$$H/C_{Eff} = n(H)/(n(C) - n(O)) \quad (0)$$



Gemäß dem effektiven Wasserstoff- zu Kohlenstoffverhältnis hindert der einfach eingebundene Sauerstoff ein angrenzendes Kohlenstoffatom an der Teilnahme zur Rußbildung. Demnach sinkt die Rußbildungsneigung mit steigendem  $H/C_{\text{eff}}$ . Bild 1 zeigt die chemischen Strukturen der Beimischungskomponenten mit Sauerstoffanteil entsprechend den Ausführungen in [3]. Diese Komponenten sind potentiell aus nachwachsenden Rohstoffen herstellbar.

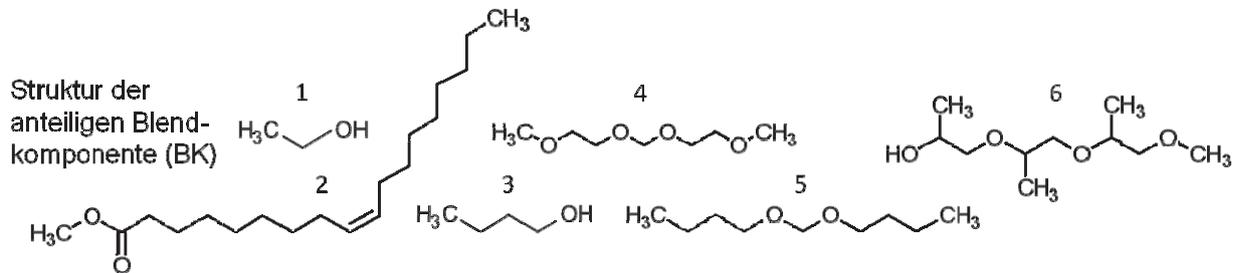


Bild 1: Chemische Strukturen ausgewählter alternativer Kraftstoffe mit eingelagertem Sauerstoff

Alle gezeigten Stoffe werden zum CEC-Referenzdiesel beigemischt. Da der relativ kurzkettige Ethanol (Bild 1, Nummer 1) relativ schlecht mit konventionellem Dieseldieselmotor mischbar ist, dient Biodiesel (RME), im gleichen Verhältnis wie Ethanol, als Lösungsvermittler. Ölsäuremethylester (Bild 1, Nummer 2) ist ein typischer Bestandteil des RME. Mit einem volumetrischen Anteil von jeweils 15 Volumenprozenten RME und Ethanol entsteht somit ein Blend mit CEC, welcher zu 30% aus erneuerbaren Energieträgern besteht. Butanol (Bild 1, Kraftstoff 3) ist relativ gut mit CEC mischbar und kommt daher ohne Lösungsvermittler aus. Bei einer Beimischungsquote von 30% weist der Butanolblend einen Sauerstoffmassenanteil von 6,2% auf. Zum Erreichen dieses Sauerstoffmassenanteils mit Biodiesel müssen 56 Volumenprozent verwendet werden.

Auf Grund des hohen Sauerstoffanteils der ausgewählten Ether müssen volumetrisch geringere Zumischquoten eingesetzt werden, um den Sauerstoffmassenanteil von 6,2% im Blend zu erreichen. Für eine derartige Mischung mit CEC sind weniger als 18 Volumenprozent Tripropylglykolmonomethylether (TPM; Bild 1, Nummer 6) nötig. Neben TPM werden auch die Ether TOU (Bild 1, Kraftstoff 4) und Butylal (Bild 1, Kraftstoff 5) motorisch angewandt.

Basisaggregat der eingesetzten Versuchsträger ist ein moderner Pkw-Reihenvierzylinder-Dieselmotor der Zweiliterklasse. Es handelt sich um eine frühe Baustufe des MDB-Dieselmotors der Volkswagen AG mit EU6-Setup. U. a. ist der Motor ausgestattet mit einem zylinderdruckgeführten Motormanagement, einer Hybrid-AGR, bestehend aus Hoch- und Niederdruckabgasrückführung, sowie einem variablen Ventiltrieb (VVT). Mit dem VVT wird eine Einflussnahme auf die Parameter Brennraumdrall, Füllung, effektives Verdichtungsverhältnis und Expansionsdauer ermöglicht [4].

Neben Vollmotoruntersuchungen werden auch detaillierte Betrachtungen am Einzylinderderivat durchgeführt.

Zur Messung der gasförmigen Schadstoffe wird ein AVL FTIR verwendet, die Rußmassenbestimmung erfolgt im stationären Motorbetrieb anhand der Filterpapiermethode (FSN) mit dem AVL Smokemeter des Typs 415S. Für detailliertere Informationen zu den eingesetzten Prüflingen und der Prüfstandsperipherie sei auf [3] verwiesen.



### 3. Ergebnisse

In vorausgehenden Untersuchungen in [3], mit den o. g. Alternativkraftstoffen und Versuchsträgern, wurden die grundsätzlichen Brenn- und Schadstoffbildungseigenschaften der Kraftstoffe analysiert. Der spezifische Kraftstoffverbrauch und die unverbrannten Schadstoffemissionen (THC und CO) werden überwiegend durch die unterschiedlichen Brenneigenschaften der alternativen Kraftstoffe beeinflusst. Wird der Schwerpunkt der Energieumsetzung über eine Anpassung des Einspritzbeginns gleichgestellt, steigen insbesondere die CO-Emissionen bei sinkender Motorlast und zündunwilligem Kraftstoff an. Über den verringerten Umsatzgrad nimmt entsprechend der spezifische Verbrauch zu. Bei sehr guten Brennbedingungen, d. h. gesteigerter Motorlast, weisen die betrachteten Kraftstoffe sehr ähnliche Brenneigenschaften auf, so dass sich die spezifischen Verbräuche gleichen und die inhärente Schadstoffbildungsneigung in den Vordergrund tritt.

Insbesondere die Verbesserung des schädlichen Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverhaltens ist eine fortwährende Entwicklungsaufgabe.

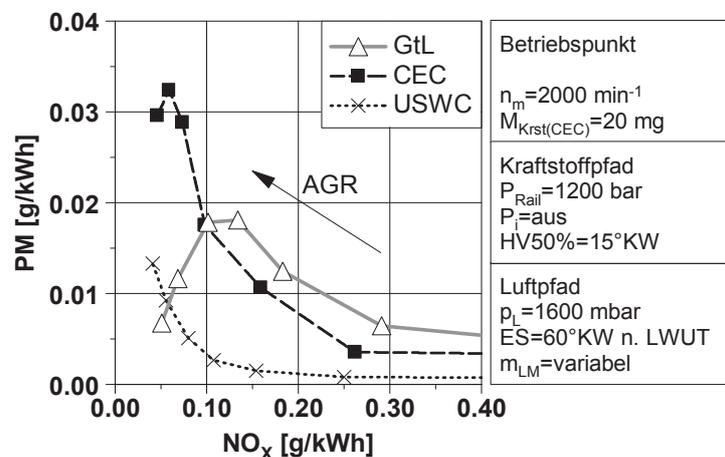


Bild 2: Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoff ausgewählter Kraftstoffe bei Variation der AGR-Rate am Einzylinderprüfling

Bild 2 zeigt das Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverhalten ausgewählter Kraftstoffe bei einer AGR-Variation. Diese Versuche werden am Einzylinderaggregat durchgeführt, wobei für alle Kraftstoffe die Einspritzmenge konstant gehalten wird und einer Energiemenge von 20 mg CEC pro Arbeitsspiel entspricht. Sonstige motorische Einstellparameter aus Luft- und Kraftstoffpfad werden über der AGR-Variation ebenfalls konstant gehalten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Kraftstoffe untereinander wird bezüglich der Einspritzstrategie eine Haupteinspritzung gewählt.

Wie erwartet wirkt sich eine moderate Anhebung der AGR-Rate (AGR < 40%; NO<sub>x</sub> > 0,15 g/kWh) mindernd auf NO<sub>x</sub>, jedoch steigernd auf die Partikelmassenemissionen (PM) aus. Der direkte Kraftstoffeinfluss auf die Stickoxidemissionen ist gering gegenüber der Wirkung der Abgasrückführung. Große Auswirkung jedoch haben die verschiedenen Kraftstoffe auf die resultierenden PM-Emissionen.

GtL weist trotz eines gegenüber CEC erhöhten H/C<sub>eff</sub> gesteigerte PM- und USWC trotz verringertem H/C<sub>eff</sub> stark reduzierte PM-Emissionen auf. Neben den inhärenten Kraftstoffeigenschaften überwiegt die Auswirkung der Brenneigenschaften, insbesondere des Zündverzuges (ZV). Entsprechend der Cetanzahlen (CZ) ist der ZV des



GtL (CZ>80) kürzer gegenüber CEC (CZ=53) und vor allem gegenüber dem des zündunwilligen USWC (CZ≈40).

Durch den verlängerten Zündverzug steht mehr Zeit zur Gemischaufbereitung zur Verfügung, so dass beim Übergang ins Verbrannte lokal weniger Ruß gebildet wird. Der ZV-Einfluss überwiegt bei moderaten AGR-Raten gegenüber den inhärenten Rußbildungseigenschaften.

Eine Verbesserung der Gemischaufbereitung im Teillastbereich kann auch über die VVT-Variabilität erreicht werden. Eine Spätverstellung des Einlass-Schlusses (ES) führt zu einer effektiven Verdichtungsabsenkung und so zu einem ansteigenden ZV. Zudem wird durch eine kombinierte Verstellung des Einlass-Öffnens die Drallintensität erhöht und so zusätzlich die Gemischaufbereitung in diesem Motorbetriebsbereich verbessert. Für die in Bild 2 zugrunde liegenden Randbedingungen ist der für alle Kraftstoffe gewählte späteste mögliche ES am günstigsten. Eine weitere Verdichtungsabsenkung über eine geänderte Kolbenmuldengeometrie zeigt besonders bei dem zündwilligen GtL weiteres Ruß-NO<sub>x</sub>-Verbesserungspotential auf (nicht dargestellt).

Bei einem weiteren AGR-Anstieg über 40% in Bild 2 ist besonders für GtL ein Abfallen der Rußemissionen erkennbar. Mit der ansteigenden AGR nehmen die lokalen Temperaturen im Brennraum so weit ab, dass die Bedingungen für die Rußbildung unterschritten werden können. Eine derartige Niedertemperaturverbrennung ist besonders für GtL ersichtlich. Offenbar ist die Rußbildungsintensität in Abhängigkeit der lokalen Temperatur und des lokalen Verbrennungsluftverhältnisses entsprechend des erhöhten H/C<sub>eff</sub> reduziert.

Eine weitere Erhöhung des H/C<sub>eff</sub> durch die Verwendung der sauerstoffhaltigen Alternativkraftstoffe birgt weiteres Potential zur Verbesserung des PM-NO<sub>x</sub>-Tradeoffs (nicht dargestellt). Eine maximale Rußminderung wird durch zündunwillige Kraftstoffe mit erhöhtem H/C<sub>eff</sub> erreicht. Am Beispiel des Butanolblends mit 30% Alkoholanteil kann die Partikelmasse bei gleichem Stickoxidniveau um über 90% gegenüber CEC abgesenkt werden.

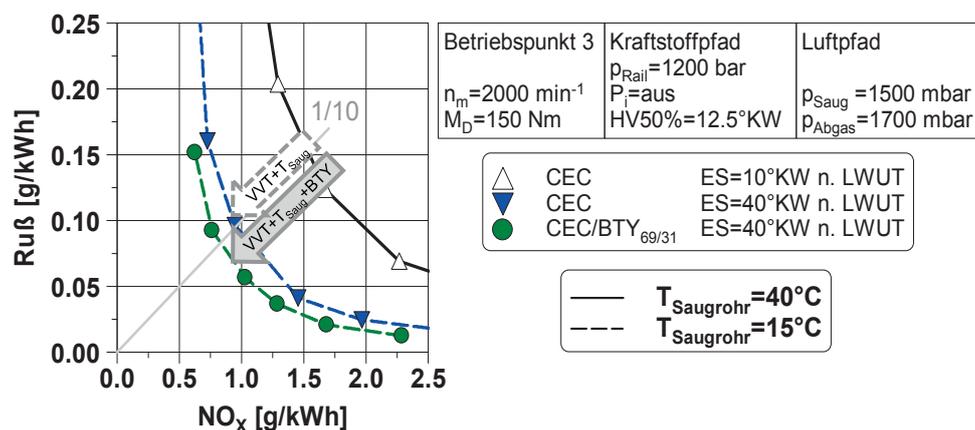


Bild 3: Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoff ausgewählter Kraftstoffe bei Variation der AGR-Rate am Vollmotor

Bild 3 zeigt das Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverhalten ausgewählter Kraftstoffe bei einer AGR-Variation und gesteigerter Motorlast am Vollmotor. Die maximal möglichen AGR-Raten liegen bei unter 40% und es zeigt sich über dem gesamten AGR-Variationsbereich das typische Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverhalten.



Während luftpfadseitige Strategien wie Hoch-AGR-Konzepte und besonders später ES zur PM-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverbesserung im Teillastbereich nutzbar gemacht werden können, fehlt bei erhöhter Last meist der Abstand zur Rußgrenze.

Bezogen auf CEC mit frühem ES resultiert sowohl ein um 20°KW verspäteter ES, als auch eine Saugrohrtemperaturminderung von 40°C auf 15°C in einer Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoffverbesserung von jeweils unter 15%. Erst die Kombination aus der Saugrohrtemperaturabsenkung und dem späten ES bringt einen Vorteil von 38% für ein Ruß- zu NO<sub>x</sub>-Verhältnis von Eins zu Zehn. Wird zudem der CEC-Butylalblind verwendet, kann entsprechend des erhöhten H/C<sub>eff</sub> eine Tradeoffverbesserung von 46% erreicht werden.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Rußminderungspotential alternativer Kraftstoffe setzt sich aus dem Brennverhalten und der inhärenten Rußbildungsneigung zusammen. Eine reduzierte Zündwilligkeit führt bei niedrigeren Motorlasten im Allgemeinen zu verlängerten Zündverzugszeiten und daher zu einer verbesserten Kraftstoffaufbereitung und somit zu einer reduzierten Rußbildung. Der Zündverzugseinfluss nimmt mit steigender Motorlast ab und es verbleibt die inhärente Kraftstoffeigenschaft bzgl. der Rußbildung. Die Rußbildungsneigung nimmt mit gesteigertem H/C<sub>eff</sub> ab, so dass besonders sauerstoffhaltige Kraftstoffe auch bei erhöhten Lasten rußarm verbrennen.

Maximale Rußminderungspotentiale werden durch die Kombination von Kraftstoffeigenschaften und motorischen Stellparametern erreicht. Über die eingesetzte VVT-Strategie und der damit verbundenen Zündverzugs- und Brennraumdrallsteigerung kann der Ruß-NO<sub>x</sub>-Tradeoff weiter verbessert werden. Des Weiteren kann durch eine ergänzende Ladelufttemperaturabsenkung auch bei höheren Motorlasten weiteres Tradeoffverbesserungspotential gehoben werden.

#### Literatur

- [1] C. Weiskirch, M. Kaack, I. Blei, P. Eilts  
Alternative Fuels for Alternative and Conventional Diesel Combustion Systems  
SAE Technical Paper 2008-01-2507, 2008
- [2] D. M. González, W. Piel, T. Asmus, W. Clark, et al.  
Oxygenates screening for Advanced Petroleum-Based Diesel Fuels: Part 2. The Effect of Oxygenate Blending Compounds on Exhaust Emissions  
SAE Technical Paper 2001-01-3632, 2001
- [3] I. Blei  
Alternative Kraftstoffe im variablen Pkw-Dieselmotor  
Dissertationsschrift, TU-Braunschweig, 2014
- [4] Groenendijk, A.; Kahrstedt, J.; Blei, I.; Röpke, K.; Neßler, A.  
Variabler Ventiltrieb – neuer Emissionsbaustein für Volkswagens zukünftige Dieselmotoren  
7. Tagung Design of Experiments (DoE) in der Motorenentwicklung, Berlin, 2013





# Kraftstoffe im Spannungsfeld zwischen Qualität, CO<sub>2</sub> und Nachhaltigkeit

## Fuels in the Area of Conflict between Quality, CO<sub>2</sub> and Sustainability

---

Richard Dorenkamp

### Abstract

The worldwide emission standards become more and more stringent, concerning especially the absolute limits, the application range and the long term stability. The necessary engine measures determine high fuel quality. These demands have to be adjusted with the properties of fuel components, which are introduced or even developed in order to make the fuel deliver a significant contribution to CO<sub>2</sub> reduction.

### 1. Einleitung

Weltweit steigen die Anforderungen an die Emissionen kontinuierlich an. Neben der Emissionserfüllung in definierten Testzyklen und der verbindlichen Emissionssicherheit werden zukünftig die so genannten Real Driving Emissions (RDE) verpflichtend. Die genauen Grenzwerte und die Messmethoden sind heute, in der Mitte des Jahres 2014 hierfür noch nicht verbindlich festgelegt, obwohl die neue Emissionsvorschrift in Europa bereits 2017 in Kraft treten soll.

### 2. Anforderungen moderner Motoren an die Kraftstoffqualität

Moderne Motoren wie der in Bild 1 abgebildete MDB – Motor verfügen über zahlreiche Maßnahmen zur Emissionsminderung. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine hohe Leistungsdichte aus. Die Komplexität des Gesamtsystems führt zu zahlreichen Anforderungen an den Kraftstoff.

Für die Abstimmung des Brennverfahrens sind unter anderem gute Zündfähigkeiten (Cetanzahl) und enge Fenster der Viskosität und der Dichte notwendig. Wenn Kraftstoffe eingesetzt werden, welche nicht durch Destillation von Erdöl gewonnen werden und die deshalb eine größere Varianz der stofflichen Zusammensetzung aufweisen, kann es zielführend sein, künftig die Energiedichte statt der Dichte zu reglementieren. Moderne Abgasnachbehandlungen erfordern schwefel- und phosphorfremde Kraftstoffe, aufgrund der Regeneration ist der mögliche Anteil von Biodiesel stark eingeschränkt. Der Plug – In Hybrid erfordert aufgrund der möglichen längeren Verweildauer im Fahrzeug hohe Oxidationsstabilitäten und gute Kälteeigenschaften.

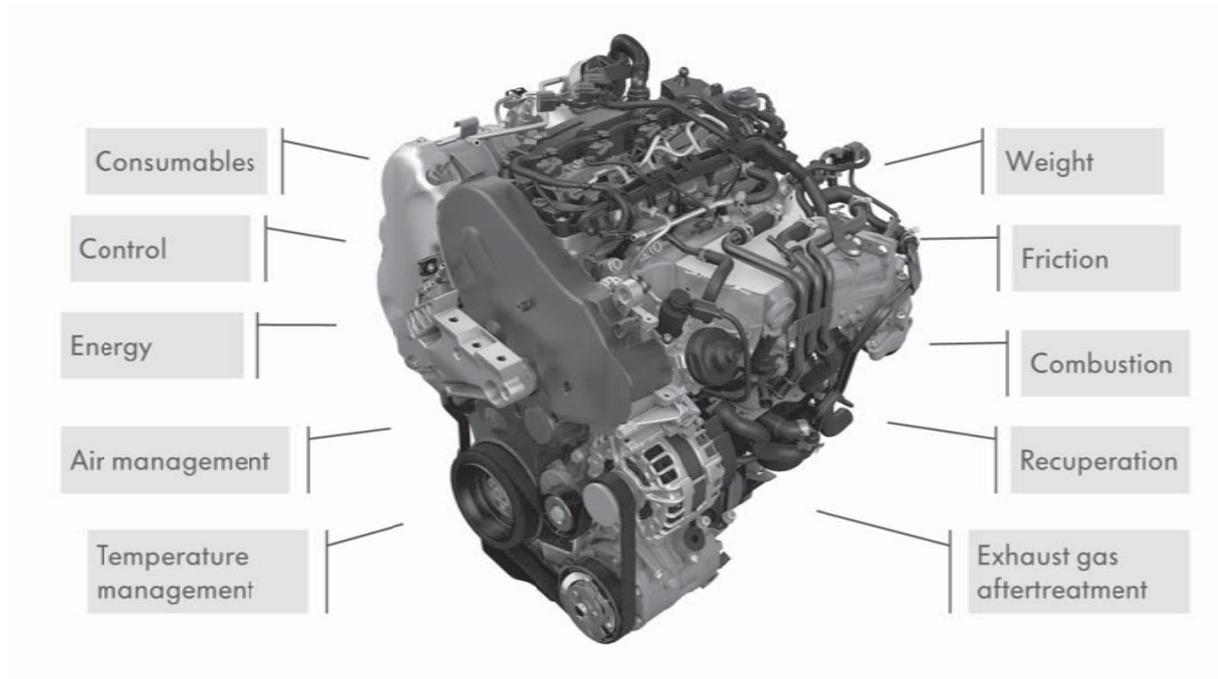


Bild 1: Aufbau des Volkswagen MDB – Motors [1]

### 3. Potentiale von Biokraftstoffen

Während in den 1990er Jahren Biodiesel im Vergleich zu Diesel durchaus einige technische Vorteile aufwies (Schwefelfreiheit, partikelarme Verbrennung), wurde der mineralische Diesel weiterentwickelt, so dass Biodiesel keine technischen Vorteile mehr aufweist. Durch die Entwicklung des Partikelfilters, bei dessen Regeneration stets Kraftstoff ins Motorenöl eingetragen wird, wurde die dem Kraftstoff zumischbare Menge stark eingeschränkt, da Biodiesel nicht wieder ausgetragen wird und zudem im Motorenöl massiv altert. Mit hydriertem Pflanzenöl ist allerdings eine neue Kraftstoffkomponente in den Markt gekommen, die nicht nur in großen Mengen beigemischt werden kann, sondern zudem die Kraftstoffparameter verbessert.

Im Jahr 2013 wurde im Auftrag einiger Automobil- und Ölfirmen von der Firma E4tec bewertet, wie hoch das Biokraftstoff – Potential für die Jahre 2020 und 2030 ist.. Dabei wurden neben den motorischen Rahmendbedingungen auch das Erzeugungspotential unter dem Hintergrund der Nahrungsmittelkonkurrenz sowie der Landnutzungskonkurrenzen bewertet. Für die Entwicklung staatlicher Vorgaben und das Wirtschaftswachstum in Europa wurden vier Szenarien entwickelt und bewertet. Je nach den Rahmenbedingungen liegt das Potential bei 12 bis 14 %, der Beitrag von Biokraftstoffen zur CO<sub>2</sub> – Minderung bei etwa 8%.

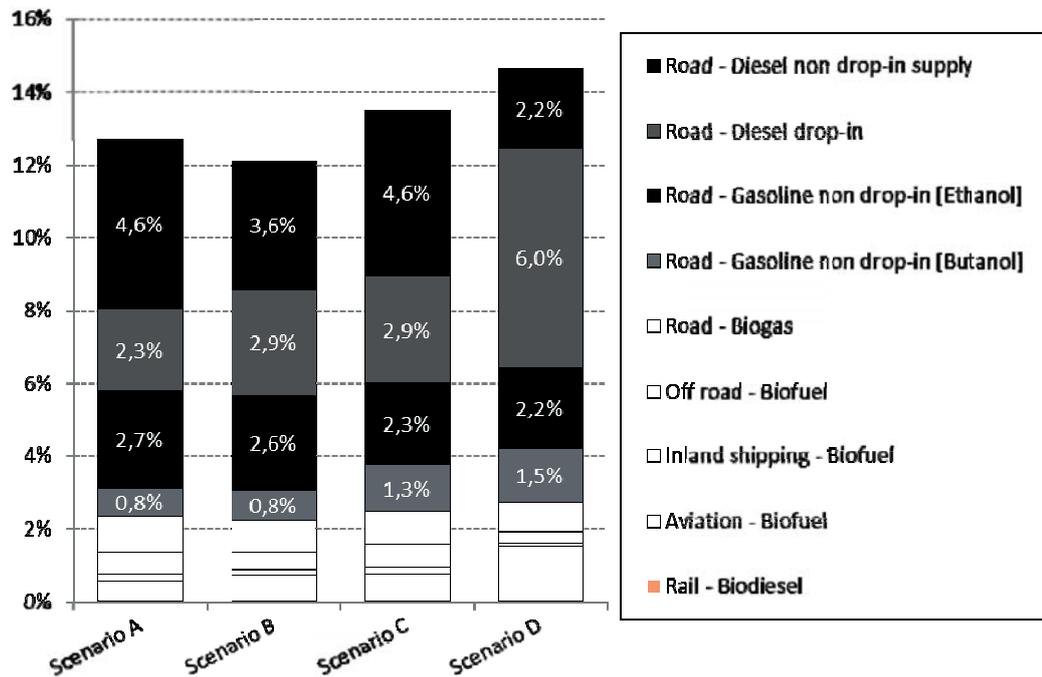


Bild 2: mögliche Anteile von Biokraftstoffen am Kraftstoffmix 2030 [2]

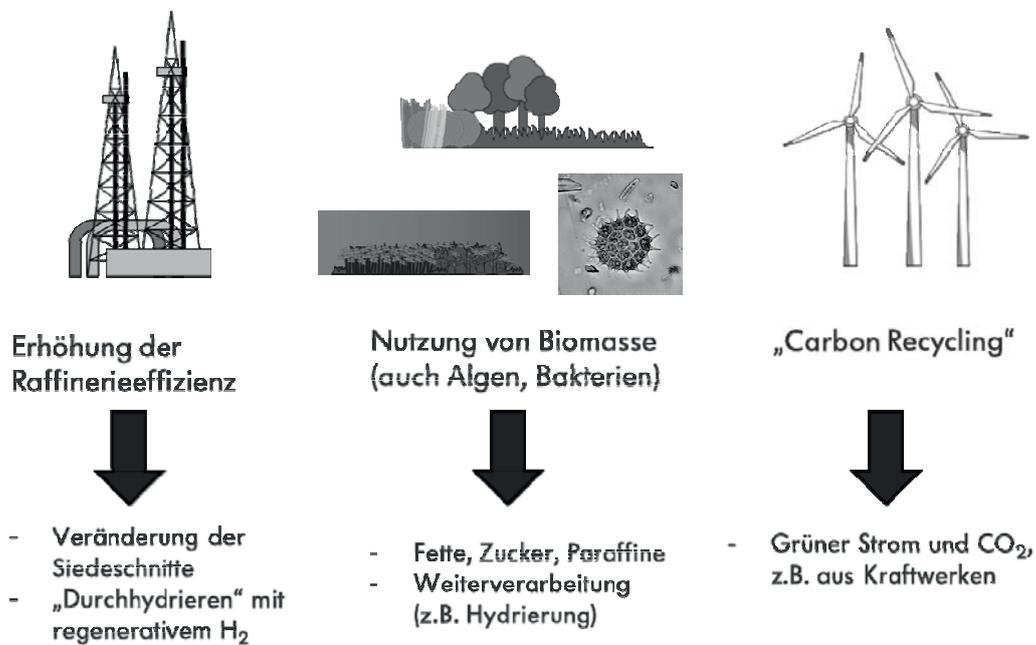


Bild 3: Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub> – Minderung durch Kraftstoffe



#### **4. Weitere Möglichkeiten zur Minderung der CO<sub>2</sub> – Emissionen durch Kraftstoffmaßnahmen**

Zahlreiche Möglichkeiten zur Senkung der CO<sub>2</sub> – Emissionen werden aktuell diskutiert. Die resultierenden Kraftstoffkomponenten zeigen bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften eine deutlich größere Varianz als bisher bekannte Kraftstoffe.

Aktuell gibt es noch keine verlässlichen, ganzheitlichen Abschätzungen über das Mengenpotential der in diesem Abschnitt beschriebenen Kraftstoffe.

#### **5. Notwendige Untersuchungen**

Eine genaue Bewertung der dargestellten Optionen, welche überwiegend nach 2020 einsetzen können, muss umgehend erfolgen, um frühzeitig die Voraussetzungen für Investitionen in hohem Umfang zu schaffen.

Vordringlich müssen die Optionen hinsichtlich ihres Potentials zur CO<sub>2</sub> – Vermeidung bewertet werden. Auch die sonstigen Umweltwirkungen (ILUC, LUC, Schadstoffbelastung bei der Herstellung, Einfluss auf Wasser,...) müssen untersucht werden. Zur motorischen Nutzung müssen potentielle neue Komponenten hinsichtlich ihrer Materialverträglichkeit, Verträglichkeit mit Motorenöl, Alterungsstabilität und Eignung für Arbeitsverfahren und Abgasnachbehandlung bewertet werden.

Das übergeordnete Ziel ist bei diesen Bewertungen und den nachfolgenden Motor- und Fahrzeugentwicklungen, eine möglichst CO<sub>2</sub> – reduzierte Mobilität mit Verbrennungsmotoren zu realisieren.

#### **Literatur**

- [1] R. Dorenkamp, Der neue modulare Dieselmotor von Volkswagen zur Erfüllung der weltweiten Emissionsstandards, Vortrag FAD – Konferenz, 2013
- [2] E4tech (UK) Ltd, A harmonised Auto-Fuel biofuel roadmap for the EU to 2030, 2013



# Kraftstoffe für die Mobilität von morgen

1. Tagung der Fuels Joint Research Group

## Abgasnachbehandlung

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





# Einfluss der Biogaszusammensetzung auf die Abgase von Gasmotoren sowie deren Abgasnachbehandlung

Klaus Zanter

## Abstract

In general gas engines are running with a high amount of methane in the fuel gas, e.g. natural gas in automotive applications. These fuel gases have a quite defined composition. When it comes to a gas mixture from a biogas fermentation process this situation will dramatically change. The lecture describes the effect of this changing composition to the exhaust gas of engines and its exhaust gas after-treatment system.

## 1. Vergleich Erdgas zu Biogas

In der Regel ist die Zusammensetzung des Brenngases von Gasmotoren sehr gut definiert. Neben den typischen Brenngasen (Methan, Ethan, usw.) liegen weiterhin nur sehr geringe Mengen an anderen Störgasen vor. Dies erleichtert die Auslegung eines Gasmotors und sorgt ebenfalls für klar definierte Abgase, welche daraufhin mit einer geeigneten Abgasnachbehandlung gereinigt werden können. Die Gaszusammensetzung eines aus einem Fermentationsprozess hergestellten Biogases ist hingegen nicht gleichmäßig und stark abhängig von den äußeren Bedingungen (Fermenter-Design; Input-Stoffe; Verweilzeiten; etc.). Durch die Verwendung eines Naturproduktes für die Erzeugung von Biogas entstehen zusätzlich Störstoffe bei der Fermentation. Die Zusammensetzung von Biogas weist somit deutliche Unterschiede zum Erdgas auf (Tabelle 1). Als Störstoffe können für die innermotorische Verbrennung folgende Gase genannt werden:

- Kohlendioxid  $\Rightarrow$  Reduziert die Flammgeschwindigkeit; fördert die Korrosion
- Wasserdampf  $\Rightarrow$  Reduziert den Heizwert; kann auskondensieren
- Schwefelwasserstoff  $\Rightarrow$   $\text{SO}_x$ -Emissionen; stark korrosiv; sehr giftig
- Ammoniak  $\Rightarrow$   $\text{NO}_x$ -Emissionen; korrosiv; reduziert Klopfverhalten; giftig

Komponente		Erdgas (H-Gas)	Erdgas (L-Gas)	Biogas
Methan	$\text{CH}_4$	87-98%	83-87%	50-75%
Alkane	$\text{C}_n\text{H}_m$	1-9%	1-5%	--
Kohlendioxid	$\text{CO}_2$	0-2%	1-2%	25-45%
Wasserdampf	$\text{H}_2\text{O}$	--	--	2-7%
Stickstoff	$\text{N}_2$	1-2%	9-10%	0-2%
Sauerstoff	$\text{O}_2$	--	--	0-2%
Wasserstoff	$\text{H}_2$	--	--	0-1%
Schwefelwasserstoff	$\text{H}_2\text{S}$	--	--	0-2%
Ammoniak	$\text{NH}_3$	--	--	0-1%

Tabelle 1 – Typische Zusammensetzungen methanhaltiger Brenngase [1; 2]



## 2. Einfluss der Brenneigenschaften von Biogas auf die innermotorische Verbrennung

Durch den höheren Anteil an  $\text{CO}_2$  als Inertgas wird im Wesentlichen die laminare Flammengeschwindigkeit beeinflusst. Diese ist ein Maß für die Schnelligkeit, mit der sich die Flamme ausbreitet. Zum einen ist charakteristisch, dass sich die laminare Flammengeschwindigkeit mit zunehmendem Lambda verringert. Zum anderen senken aber auch die Inertgase deutlich diese Flammengeschwindigkeit. Biogasmische mit einem Anteil von 50% Methan oder weniger können deshalb sehr häufig nur bei sehr „fetten“ Gemischen per Zündfunken (Gasmotor) gezündet werden [3]. Bei diesen Lambda-Verhältnissen steigen aber auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen deutlich an, so dass erforderliche Grenzwerte für Gasmotoren (z.B. TA Luft) nicht mehr erreicht werden können. Der BHKW-Betreiber befindet sich somit ständig im Spannungsfeld zwischen einem hohen Wirkungsgrad bei niedrigerem Lambda und der Erfüllung von  $\text{NO}_x$ -Grenzwerten.

Einen weiteren Einfluss besitzt das  $\text{CO}_2$  im Biogas auf den Gemischheizwert ( $\text{kWh/Nm}^3$ ). Dieser wird durch die Zunahme an  $\text{CO}_2$  abgesenkt. Sowohl die laminare Flammengeschwindigkeit als auch der Gemischheizwert haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung des Motors. In die gleiche Richtung kann auch die Bedeutung der Feuchtigkeit auf die Verbrennung bewertet werden, wobei sehr hohe Feuchtigkeitswerte schon vor dem Motor zur Vermeidung von Kondensat-Bildung im Ansaugbereich entfernt werden müssen.

Zusätzlich zum  $\text{CO}_2$  hat das  $\text{H}_2\text{S}$  einen entscheidenden innermotorischen Einfluss. Durch die Verbrennung entstehen saure Zwischenprodukte (vor allem  $\text{SO}_2$ ), welche durch das Motoröl neutralisiert werden müssen. Reicht bei langen Ölstandzeiten die Pufferfähigkeit des Motoröls nicht mehr aus, so können buntmetallhaltige Werkstoffe – wie z.B. Pleuelbuchsen – geschädigt werden. Speziell bei der Verarbeitung von industriellen Biomasseabfällen können bei der Fermentation noch weitere problematische Spurenstoffe entstehen. Besonders erwähnenswert sind organische Silicium-Verbindungen (Siloxane), die einen starken Verschleiß auf Zylinderköpfe, Kolben und Turbolader ausüben, aber auch Oxidationskatalysatoren (Oxi-Kat) schädigen.

Weiterhin ist bei den Motorenherstellern für das Biogas in den letzten Jahren ein zunehmender Trend zu immer höherem elektrischen Wirkungsgrad zu verzeichnen. Bei gleichem Grundmotor wurde (z.B. über eine höhere Turboaufladung) der elektrische Wirkungsgrad bei Gas-Otto-Motoren von 37% auf über 42,5% gesteigert [4]. Diese Tendenzen führen unabhängig von der Biogaszusammensetzung zu einer deutlicheren Beanspruchung des Motoröls und steigern dadurch in der Regel auch den Motorölverbrauch. Typische mittlere Schmierölverbräuche bei Volllast liegen häufig bei 0,20 g/kWh [5], was sich bei einer elektrischen Leistung von 500 kW am Tag auf 2,4 kg Ölverbrauch addiert. Hinzu kommt bei Annahme gleicher Leistung eine tägliche Schwefelfracht im Abgas von ca. 0,75 kg bei einem Schwefelwasserstoffwert von 50 ppm im Biogas. Weiterhin führte die Tendenz der immer höheren Aufladung zur Entwicklung sehr spezieller Zündkerzen (mit Vorkammer; Abschirmring, etc.), damit das Gemisch weiterhin hinreichend gezündet werden kann.



### 3. Abgasnachbehandlung von Gasmotoren

In Deutschland wird in der Regel die TA Luft bei der innermotorischen Verbrennung von stationären Gasmotoren herangezogen. Aufgrund lokaler Behördenauflagen (dokumentiert im Genehmigungsbescheid von BImSch-Anlagen) sowie durch das erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) können die Grenzwerte von Anlage zu Anlage abweichen. Weiterhin variieren die Grenzwerte im europäischen Ausland durch das Fehlen einer übergeordneten europäischen Norm.

Die bei der innermotorischen Verbrennung von Gasmotoren am häufigsten reglementierten fünf Schadstoffe sind:

- I) Kohlenmonoxid (CO)
- II) Kohlenwasserstoffe (THC), sehr oft in Form von Formaldehyd (HCHO)
- III) Stickoxide (NO<sub>x</sub>)
- IV) Schwefeloxide (SO<sub>x</sub>)
- V) Staub (nur Zündstrahler)

Das CO kann bei den vorherrschenden Abgastemperaturen bei Vollast (400-600 °C nach Turbolader) durch einen geeignet ausgelegten Katalysator problemlos abgebaut werden. Eine deutlich größere Herausforderung stellen hingegen die THC sowie das HCHO dar. HCHO entsteht durch eine unvollständige Verbrennung von Methan und ist im Abgas häufig proportional zum Methan vorhanden (siehe Bild 1).

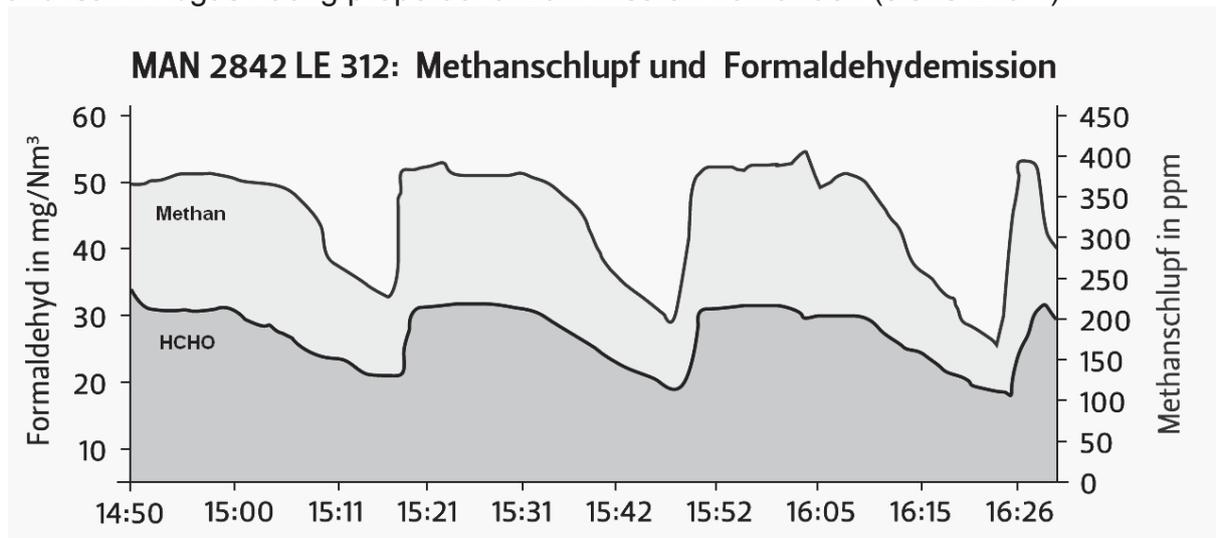


Bild 1: Verlauf von Methan- und HCHO-Emissionen im Abgas über der Zeit

Die Methanemissionen – und somit auch die Formaldehydemissionen – steigen weiterhin bei steigendem Mitteldruck aufgrund eines schlechteren Ausbrandes an [6]. Stark Palladium-haltige Oxi-Kats, welche häufig in der Automobilbranche verwendet werden, sind bei Biogas aufgrund der Schwefelfracht nicht einsetzbar. Mit einem geeignet ausgelegten Oxi-Kat (genügend Reserve bezüglich der Alterung gegen Öl- asche und Sulfate) sind aber HCHO-Emissionsgrenzwerte auch dauerhaft (> 8.000 Bh) einzuhalten. Für die Oxidation von Methan unter mageren Abgasbedingungen reicht die Aktivität und Dauerhaltbarkeit von derzeitigen Katalysatoren jedoch nicht aus [7].



Für die Einhaltung von Grenzwerten von Stickoxidemissionen werden zurzeit häufig innermotorische Lösungen gefunden. Dabei werden die Motoren in der Regel auf einen Lambdabereich  $> 1,6$  abgemagert. Während bei Gas-Otto-Motoren jetzt bei Mitteldrücken im Bereich von 6-8 bar die NO<sub>x</sub>-Werte relativ konstant bleiben, steigen die NO<sub>x</sub>-Werte für Zündstrahler bei steigendem Mitteldruck sehr stark an [8]. Aus diesem Grund wäre es vor allen Dingen bei Zündstrahlmotoren sehr sinnvoll, nicht die Motoren weiter abzumagern, sondern SCR-Katalysatoren einzusetzen [9]. Mit Hilfe dieser Technologie wird der Betreiber einer Biogasanlage nicht mehr vor die Wahl gestellt: Verbrauchsoptimierter BHKW-Betrieb oder Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, sondern er kann beides erreichen.

Schwefeloxide sowie Staub lassen sich nicht mit einer Katalysatortechnik aus dem Abgasstrang entfernen. Um die Schädigungswirkung von Schwefeloxiden am Katalysator deutlich zu reduzieren sowie die Oxidation von SO<sub>2</sub> zu SO<sub>3</sub> durch einen Katalysator zu unterdrücken wurden schwefelresistente Entwicklungen unternommen [10]. Eine Deaktivierung des Katalysators durch Ascheablagerungen kann in der Regel nur durch geschickte Auslegung mit einem Hauptaugenmerk auf die Raumgeschwindigkeit erreicht werden.

## Literatur

- [1] Werschy, M.: *Gasqualität von Erdgas oder Bio(Erd)gas in gewerblichen Anlagen*; Fachveranstaltung „Erdgas und Gewerbe“, Wernigerode, 11.11.2011
- [2] <http://www.responsiblebusiness.eu/display/rebwp7/Biogas+Production>
- [3] Herdin, R.: *Standesanalyse des Gasmotors im Vergleich zu den Zukunftstechniken (Brennstoffzellen und Mikroturbine) bei der Nutzung von aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen*, [http://www.herzogaenda21.de/\\_PDF/AnalyseGasmotorMitBiomasse.pdf](http://www.herzogaenda21.de/_PDF/AnalyseGasmotorMitBiomasse.pdf)
- [4] 2G Newsletter Q1 / 2014, [http://www.2-g.com/module/dateidownload/newsletter\\_q1\\_2014.pdf](http://www.2-g.com/module/dateidownload/newsletter_q1_2014.pdf)
- [5] Technisches Datenblatt MWM 50 Hz TCG 2016 V08 C, Biogas, 500 NO<sub>x</sub>, VT-E; 18.05.2009
- [6] *Formaldehydbildung – Wirkmechanismen. Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter*, FVV-Vorhaben Nr. 918, Bericht
- [7] Baas, H.: *Emissionen aus der Gasverwertung im Biogas*, VDI-Wissensforum; Nürtingen, 13.Juni 2013
- [8] Kampmann, H.-J.: *Gas-Otto-Motor oder Zündstrahl-Gas-Motor für Nutzungsmöglichkeiten und deren Einordnung*, [http://biogas-infoboard.de/pdf/H\\_Kampmann.pdf](http://biogas-infoboard.de/pdf/H_Kampmann.pdf)
- [9] Goeman, D., Zanter, K.: *3-Wege SCR Katalysator für Biogasanlagen, Abgasnachbehandlung 2.0?*, Tagungsband 7. Innovationskongress Biogas 2014, ISBN 978-3-98137-764-4
- [10] Goeman, D., Zanter, K.: *Einrichtung und Verfahren zum Behandeln von Abgasen von mit Biogas betriebenen Verbrennungskraftmaschinen und Verwendung eines Katalysators dazu*, DE 102011101474 A1



# Anpassung von Abgasnachbehandlungssystemen an neue Kraftstoffe

---

Gennadi Zikoridse

## Abstract

In the future, the diversification of fuels will increase continuously, starting with the biogenic fuels, synthetic fuels thereupon and as a long term option hydrogen. This influences the combustion process and therefore the exhaust gas composition and exhaust gas aftertreatment. Therefore, an adjustment of exhaust aftertreatment to new fuels will be required.

## 1. Einleitung

Die Massenmobilität unserer Zeit wird bislang durch den Verbrennungsmotor, als einzige Antriebsquelle, sichergestellt. Die überwiegend fossilen Kraftstoffe zum Betrieb des Verbrennungsmotors sind hochenergiereich und garantieren Unabhängigkeit und Reichweite. Problematisch ist jedoch der Fakt, dass die Vorräte an Rohstoffen, aus denen die Kraftstoffe gewonnen werden, endlich sind. Aktuelle Ereignisse zeigen zudem, dass zur Förderung dieser Rohstoffe steigende Risiken eingegangen werden müssen. Außerdem sind alle Prozesse, die mit der Verbrennung fossiler Energieträger einhergehen, CO<sub>2</sub> emittierend.

Die aktuelle und zukünftige Abgasgesetzgebung stellt eine große Herausforderung für die Fahrzeugindustrie dar. In der nahen Zukunft müssen neben der weiteren Optimierung der herkömmlichen Antriebssysteme auch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben entwickelt werden. Langfristig wird der Verkehr überwiegend auf fossile Brennstoffe verzichten müssen, damit die angestrebten Klimaschutzziele erreicht werden können.

Fossile flüssige Kraftstoffe werden bei den konventionellen Antrieben voraussichtlich noch in den nächsten Jahrzehnten eine dominierende Rolle spielen. Allerdings wird die Bedeutung der alternativen Kraftstoffe, wie z.B. Biodiesel, Bioethanol und synthetische Kraftstoffe, in der Zukunft stetig zunehmen.

Die neuen Kraftstoffe besitzen gegenüber den konventionellen fossilen Kraftstoffen unterschiedliche Qualitäten und chemische Zusammensetzungen. Dies beeinträchtigt sowohl die motorische Verbrennung und Emissionen als auch die Funktionalität der Abgasnachbehandlungstechnologien. Daher ist eine funktionale Anpassung der Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung an die neuen Kraftstoffe erforderlich.



## 2. Beeinträchtigung der Funktionalität und Anpassung von Abgasnachbehandlungssystemen an neue Kraftstoffe

Die gegenwärtig serienmäßig verwendeten Abgasnachbehandlungssysteme sind für einen Betrieb des Motors mit konventionellen fossilen Kraftstoffen entwickelt worden. Alternative und herkömmliche Kraftstoffe unterscheiden sich wesentlich in der chemischen Zusammensetzung, in der Molekülstruktur sowie in für den motorischen Prozess relevanten Eigenschaften.

Einige Eigenschaften der alternativen Kraftstoffe wirken sich nachteilig auf die Funktionsweise von Abgasnachbehandlungssystemen wie DOC, DPF und DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren aus, insbesondere wird die Dauerhaltbarkeit stark beeinträchtigt.

Durch die Diversifizierung der Kraftstoffe werden neue Anforderungen an die Abgasnachbehandlungstechnologien gestellt. Eine funktionale Anpassung der Abgasnachbehandlung an neuen 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.

Am Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden sind Untersuchungen der Beeinträchtigungen der Funktionalität von Abgasnachbehandlungssystemen bei Einsatz von Biokraftstoffen durchgeführt worden. Aus den Untersuchungsergebnissen sollten Schlussfolgerungen abgeleitet werden, welche Anforderungen an die Kraftstoffqualität gestellt werden müssen, damit Abgasnachbehandlungssysteme (AGN-Systeme), die für konventionellen Dieseldieselkraftstoff ausgelegt sind, in ihrer Funktionalität nicht signifikant beeinträchtigt werden. [1]

Folgende grundlegende Aussagen können an Hand der bisherigen Ergebnisse formuliert werden:

- Beim Einsatz von reinem Biodiesel im Vergleich zu handelsüblichem Dieseldieselkraftstoff (B7) verringert sich die Partikelemission deutlich, ebenfalls kommt es bei der CO-Emission zu einer Verringerung. Die NO<sub>x</sub>-Emission steigt leicht an und bei der HC-Emission ist eine Absenkung zu erkennen.
- Bei der Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung sind eine starke Abnahme der Gesamtanzahl mit steigendem biogenem Kraftstoffanteil und eine Verschiebung des Maximums zu kleineren Partikeln um ca. 25 nm erkennbar.
- Bei den Untersuchungen zum Beladungsverhalten wurde festgestellt, dass sich die reduzierten Partikelmassenemissionen signifikant auf die Beladungsdauer des Filters auswirkten. Beim Einsatz von reinem Biodiesel ergab dies eine 7-fach längere Beladungsdauer im Vergleich zu normalem Dieseldiesel.
- Für die Versuche zum Regenerationsverhalten mittels NO<sub>2</sub> (CRT-Prinzip), konnten unterschiedliche Umsatzraten für die verschiedenen Kraftstoffe ermittelt werden. Dabei wurde die im Filter eingelagerte Partikelmasse bei steigendem biogenem Anteil schneller umgesetzt.



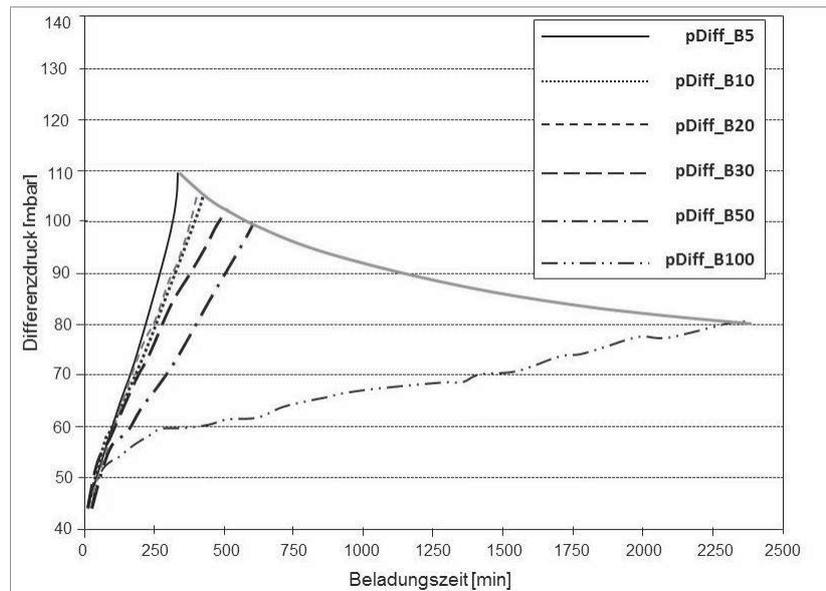


Bild 3: Beladungsverhalten bei verschiedenen Kraftstoffgemischen

Bei den Untersuchungen im Rahmen des FVV-Vorhabens Nr. 6010280 „Einfluss von Biokraftstoffblends auf moderne Dieselmotoren“ wurde gezeigt, dass sich der Einfluss der unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften auf Grund der modernen und fortgeschrittenen Motorsteuerung im Brennverhalten kaum detektieren lässt. Es konnte bestätigt werden, dass der FAME-Anteil im Kraftstoff eine Minderung der Partikel-Emission bewirkt. Ein Einfluss der Kraftstoffblends auf das Abgasnachbehandlungssystem konnte in den Kurzzeitversuchen nicht nachgewiesen werden. [2]

Für die Verwendung von Biodiesel und den daraus hergestellten Dieselmotoren-Biodiesel-Mischungen hat sich in den Projektversuchen gezeigt, dass keine wesentlichen Nachteile bezüglich der Funktionalität der angewandten Abgasnachbehandlungssysteme zu verzeichnen waren. Ein Nachteil ist mit der Erhöhung der Stickoxidemissionen gegeben, welche aufgrund des höheren Sauerstoffgehaltes im Kraftstoff und den höheren Verbrennungstemperaturen entstehen. Als nachteilig ist auch die Verschiebung der Partikelgröße hin zu kleineren Partikeln einzuordnen.

## Literatur

- [1] Zikoridse, G.; Lindner, R.; Hofmann, U.: Untersuchung der Beeinträchtigung der Funktionalität von Abgasnachbehandlungssystemen bei Einsatz von Biokraftstoffen und Ableitung von Qualitätsanforderungen an neue Kraftstoffe, Schlussbericht – AiF FKZ 17N0507, BMBF Förderprogramm „Ingenieur Nachwuchs“, 2010
- [2] Harndorf, H.; Richter, B.; Sadlowski, Th.; Schümann, U.; Wichmann, V.: Einfluss von Biokraftstoffblends auf moderne Dieselmotoren und deren Abgasnachbehandlungssysteme, Abschlussbericht, FVV-Vorhaben Nr. 6010280, 2012

# Katalyse und Filtration des Abgases mit Biodiesel betriebener Nutzfahrzeugmotoren

Uwe Gärtner

## Abstract

The complexity of advanced aftertreatment systems applied to EURO VI Heavy Duty engines has increased significantly during the last years. High standards of Ffuel and lube oil are required to meet the exhaust gas limits and OBD specifications. This paper describes the impact of FAME on the performance and emissions of modern commercial vehicle engines based on the experiences of a truck manufacturer.

Die Komplexität moderner Abgasnachbehandlungssysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren ist in den vergangenen Jahren extrem angestiegen. Bei heutigen EURO VI Anlagen kommen ausnahmslos Kombinationen von Oxidationskatalysatoren, Dieselpartikelfiltern und SCR-Katalysatoren zum Einsatz, siehe auch Bild 1. Motor und Abgasreinigung stellen dabei extrem hohe Anforderungen an die Qualität der verwendeten Betriebsstoffe, wie den Dieselkraftstoff, das Motoröl und das Reduktionsmittel AdBlue.

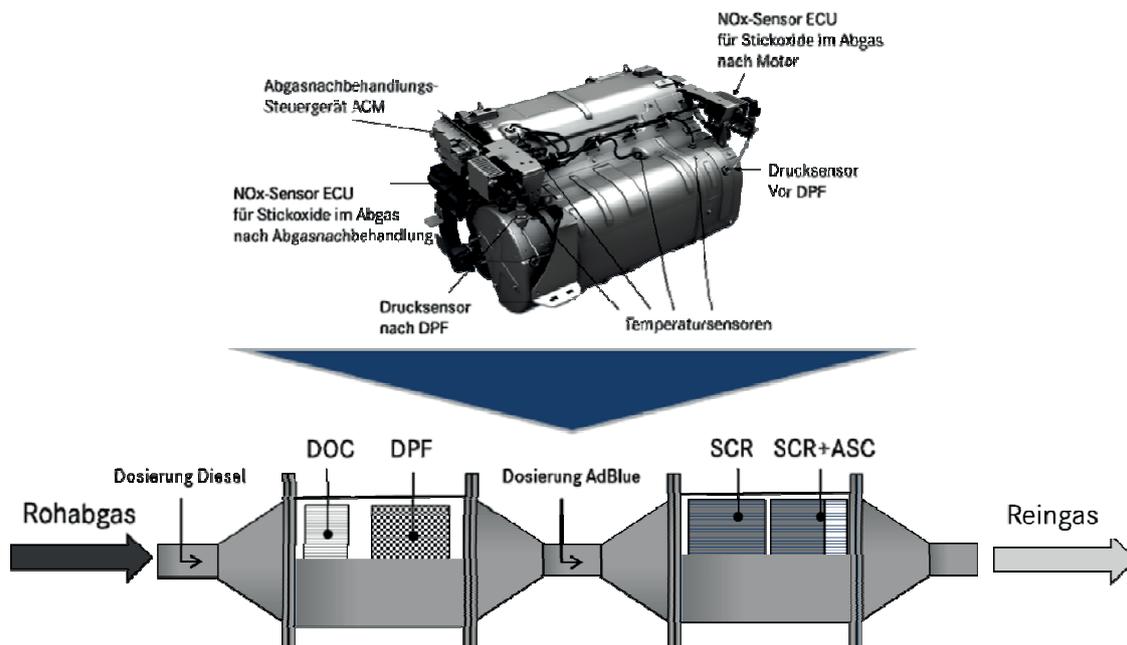


Bild 1: Anordnung von DOC/DPF/SCR/ASC ( EURO VI Medium Duty ) nach /1/

Am Beispiel verschiedener Betankungen mit Biodiesel ( FAME ) beschreibt der vorliegende Beitrag exemplarisch die Auswirkungen auf die motorischen Rohemissionen und insbesondere auf den Betrieb der Katalysatoren und Partikelfilter. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen sofort eintretenden Veränderungen, wie bspw. den Rück-



gang der katalytischen Stickstoffdioxid-Bildung ( Bild 2 ),als auch Langzeitwirkungen, wie bspw. der erhöhte Ascheeintrag in den Partikelfilter, siehe bspw. auch /3/. Das erstere Phänomen beeinflusst sowohl die passive Filterregeneration als auch die SCR-Reaktion negativ. Eine im Vergleich zu Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 vergrößerte Ascheakkumulation im DPF verkürzt die ursprünglichen Aschereinigungsintervalle erheblich.

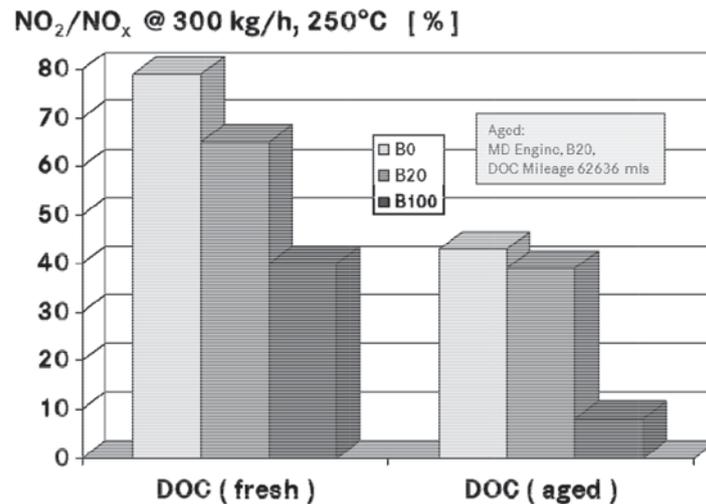


Bild 2: Auswirkungen von Biodiesel-Betrieb auf die NO<sub>2</sub>-Bildung im DOC

Ein störungsfreier Betrieb moderner Nutzfahrzeugmotoren der Stufe EURO VI mit Biodiesel der ersten Generation würde zur Erfüllung der aktuellen Abgasgrenzwerte zusätzliche, umfangreiche Applikationsarbeiten an den Steuergeräten des Motors und der Abgasnachbehandlung bedeuten. Weiterhin ist zusätzliche Sensorik zur Bestimmung der Kraftstoffzusammensetzung erforderlich. Für den Partikelfilter ist mit höheren Wartungskosten zurechnen. Die erhöhte chemische Alterung der ATS-Komponenten aufgrund des FAME-Betriebs bedarf weiterer Untersuchungen, siehe auch /2/.

## Literatur

- [1] U. Gärtner, P. Benz, M. Ernst, J. Lehmann: Thermodynamik und Emissionskonzept der neuen mittelschweren Motoren von Mercedes-Benz für weltweiten Einsatz. Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Graz, September 2013
- [2] FVV Abschlussbericht Heft R566-2014, Vorhaben Nr. 1057  
Alterung von Dieselabgaskatalysatoren im Betrieb mit Biokraftstoffen
- [3] F. Zimmermann, M. Florack, P. Lanzerath, U. Gärtner: Biodiesel operation and aftertreatment systems – a truck manufacturer’s experience. SAE Symposium on Heavy Duty Emissions, Gothenburg, Sweden. September 2012



# Kraftstoffe für die Mobilität von morgen

1. Tagung der Fuels Joint Research Group

## Emissionen und Umweltwirkungen

Sektionsleitung: Prof. Dr. med. Jürgen Bünger, Ruhr-Universität Bochum





# Verbrennungschemie von Biokraftstoffen – Reaktionswege und Schadstoffbildung

---

Katharina Kohse-Höinghaus

## Abstract

Today, more than 85% of the global energy consumption is derived from fossil sources. Biofuels are being discussed and used as an alternative to conventional petroleum-based fuels for transportation. Due to additional functional groups in the fuel molecule, their combustion reactions differ from those of hydrocarbon fuels, with consequences regarding potentially undesired or harmful emissions.

## 1. Verbrennungschemie

Verbrennungsreaktionen von Kraftstoffen setzen im Kraftstoffmolekül gespeicherte chemische Energie in Form von Wärme frei, die für die technische Anwendung, so zum Beispiel beim Verbrennungsmotor, in mechanische Energie für die gewünschte Antriebsleistung umgesetzt werden kann. Die Anforderungen an den technischen Verbrennungsprozess sowie an die dafür geeigneten chemischen Substanzen sind vielfältig. Wichtig für eine Bewertung sind Eigenschaften wie Energiedichte, Zündwilligkeit, Klopfestigkeit, Viskosität und andere physikalische und chemische Parameter. Allerdings sind inzwischen zusätzliche Erfordernisse zu beachten, die insbesondere mit steigenden Umweltauflagen und der Klimawirkung von Verbrennungsemissionen einhergehen. Um die Schadstoffbelastung aus Verbrennungsprozessen einzuschränken, sind profunde Kenntnisse der Verbrennungsmechanismen notwendig. Die Entwicklung schadstoffärmerer, effizienter Verbrennungsverfahren verfolgt verschiedene Wege. Eine viel diskutierte Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Quellen zu verringern und die Kohlendioxidbilanz positiv zu beeinflussen, ist der Einsatz von Biokraftstoffen. Dabei handelt es sich allerdings nicht um eine einzige chemische Stoffklasse – Biokraftstoffe umfassen Substanzen wie Alkohole, Ether oder Ester. Die Zusammenhänge zwischen eingesetztem Kraftstoff und potentiellem Emissionsspektrum sind für solche Biokraftstoffe in weitaus geringerem Detail bekannt als für die konventionellen Erdöl-basierten Kraftstoffe. Die Entwicklung und Bereitstellung detaillierter Reaktionsmechanismen für prototypische Biokraftstoffe ist derzeit ein sehr aktives Forschungsfeld; einige aktuelle Aspekte zu diesem Thema sind in [1,2] zusammengefasst.

## 2. Messtechniken

Detaillierte Mechanismen für die Verbrennung technisch relevanter Biokraftstoffe wie zum Beispiel Biodiesel können Tausende bis Zehntausende von Elementarschritten umfassen, von denen etliche nicht genau bekannt sind. Diese umfangreichen chemischen Mechanismen sind für technische Umgebungen, bei denen turbulente Strö-



mungsvorgänge eine Rolle spielen, viel zu groß. Für die Anwendung müssen solche Modelle der Flammenchemie daher reduziert werden. Eine globale Bruttoreaktion gibt zwar die Wärmefreisetzung gegebenenfalls annähernd realistisch wieder, erlaubt jedoch keine Vorhersage zu erwartender Schadstoffemissionen. Um Mechanismen auf wenige, aber hinreichende Schritte reduzieren zu können, müssen sie an geeigneten Experimenten validiert werden. Hierfür stehen insbesondere eine Reihe von Versuchsträgern im Labor zur Verfügung, wie Stoßwellenrohre, Reaktoren und eindimensionale Flammen [3], an denen für den chemischen Nachweis zahlreicher, zum Teil nur in Spuren gebildeter Substanzen geeignete Verfahren, u.a. der Laserspektroskopie [4] und Massenspektrometrie [5-7] eingesetzt werden. Wichtig ist es dabei, dass möglichst während des Reaktionsverlaufs alle Intermediate identifiziert und quantitativ detektiert werden. Dies ist ein analytisch hochkomplexes Problem, da (1) vor der Analyse nicht notwendig bekannt ist, welche chemischen Spezies überhaupt entstehen, (2) eine hohe Dynamik in den zu detektierenden Konzentrationen (bis hin zu Spurenstoffen im ppb-Bereich) zu erwarten ist, (3) zahlreiche labile und reaktive Radikale entstehen, deren quantitativer Nachweis schwierig ist, (4) die Methode möglichst keine systematischen Messfehler aufweisen darf und (5) die Ergebnisse auf die technisch relevante Situation übertragbar sein sollen.

Als eine für die chemische Flammenanalyse sehr geeignete Technik hat sich die Molekularstrahl-Massenspektrometrie (MBMS) bewährt, die zumeist mit Ionisation durch Elektronenstoß (EI) arbeitet. Damit lässt sich eine Übersichtsanalyse einer Flamme durchführen, bei der im Regelfall etwa 40-50 Intermediate nachgewiesen werden. Allerdings ist der getrennte Nachweis von Isomeren, denen bei der Analyse der brennstoffspezifischen Reaktionswege eine große Bedeutung zukommt, mit dieser Technik nicht möglich. Ein Durchbruch wurde mit Photoionisation (PI) mittels sehr intensiver Synchrotronstrahlung und Kopplung an die MBMS erzielt: mit durchstimmbarer Strahlung im Bereich der Ionisationsschwellen der Moleküle und hoher Energieauflösung können mit PI-MBMS die Intermediate nicht nur bezüglich ihrer Masse, sondern auch ihrer chemischen Struktur unterschieden werden [5,6]. Die Technik wurde kürzlich in [7] im Detail beschrieben und visualisiert.

### 3. Anwendung

Wenn man Details über chemische Reaktionspfade in Flammen in Erfahrung bringen möchte, so wählt man dafür oft ebene, also eindimensionale, vorgemischte Flammen bei reduziertem Druck aus. Damit wird die Reaktionszone gedehnt; Intermediate sind also gut zugänglich. Eine Charakterisierung einer Flamme eines ausgewählten Brennstoffes erzielt dann einen möglichst vollständigen Satz an Speziesprofilen, bei denen der Molenbruch der betreffenden Verbindung als Funktion des Reaktionsfortschritts (hier der Höhe über dem Brenner) quantitativ bestimmt wird. Ferner ist es für die Entwicklung von Reaktionsmechanismen sinnvoll, zunächst den Reaktionsverlauf für chemisch einfache Brennstoffe im Detail zu analysieren und zu verstehen und sodann für komplexere Brennstoffe darauf aufzubauen. Da gerade für Radikale die quantitative Kalibrierung schwierig ist, sind Messunsicherheiten in diesem Fall groß; sie können gegebenenfalls Faktoren von 2-3 betragen [3]. Eine gute Strategie, unter solchen Bedingungen sensitiv auf die Einflüsse der chemischen Struktur des Brennstoffs zu sein, ist der relative Vergleich zwischen den Reaktionsmechanismen isomerer Brennstoffe, die also die gleiche chemische Summenformel, aber unterschiedliche Struktur haben.



Ein Beispiel ist der Vergleich der Flammenchemie von Dimethylether ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) und Ethanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) [8,9], beides oxygenierte Brennstoffe, die aus Biomasse hergestellt werden können. Die Ether- bzw. Alkoholstruktur führt bei den oxygenierten Intermediaten zu Unterschieden. So entstehen in beiden Fällen unerwünschte Carbonylverbindungen, für Dimethylether jedoch bevorzugt Formaldehyd, und bei Ethanol vornehmlich Acetaldehyd. Unsicherheiten in den Mechanismen bestehen hier insbesondere noch im Niedertemperaturbereich der Zündung [8] sowie für die Übertragung auf technisch relevante höhere Druckbereiche [9]. Bild 1 zeigt ausgewählte Speziesprofile für Butanolflammen [10]. Butanol existiert in vier Strukturvarianten, von denen *n*-Butanol (Biobutanol) am häufigsten untersucht wurde. Mittels PI-MBMS lassen sich die Isomere Acetaldehyd und Ethenol unterscheiden (*oben*); der Vergleich von mit PI-MBMS und EI-MBMS gewonnenen Resultaten (*unten*) erhöht dank der unterschiedlichen Messanlagen die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Deutlich zu erkennen sind unterschiedliche Konzentrationen der Intermediate für die vier strukturell verschiedenen Butanole unter gleichen Flammenbedingungen.

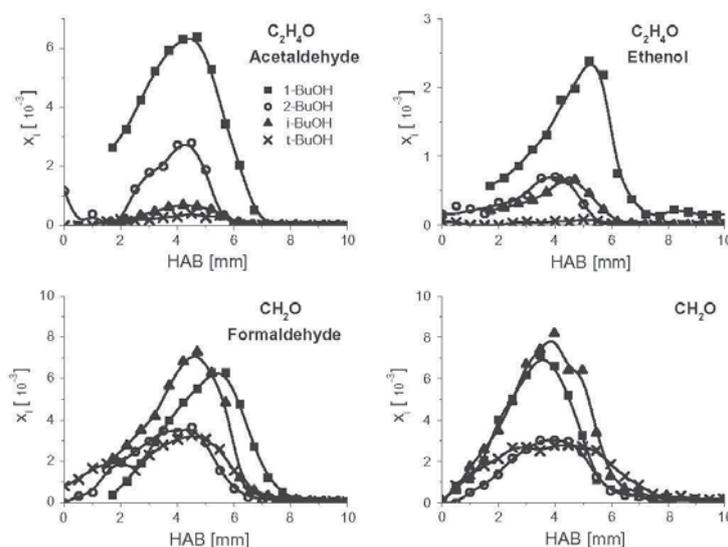


Bild 1: Profile ausgewählter Zwischenprodukte in Butanol-Flammen, erhalten mittels PI-MBMS (*oben und unten links*) und EI-MBMS (*unten rechts*) [10].

Analog wurde auch für die Untersuchung von Estern vorgegangen, den chemischen Verbindungen in Biodiesel. Wiederum wurden zunächst einfache, also kurzkettige, Verbindungen eingesetzt [11,12]. Strukturvarianten, die für die Modellentwicklung wichtig sind, umfassen Anzahl und Position von Doppelbindungen, lineare oder verzweigte Alkylketten sowie Methoxy- oder Ethoxy-Gruppen. Bei Paaren oder Triplets isomerer Ester-Brennstoffe werden Einflüsse der Kraftstoffstruktur auf die Verbrennungschemie deutlich erkennbar. Wiederum fallen insbesondere wieder strukturspezifisch entstehende Carbonylverbindungen auf. Etliche Arbeiten weisen inzwischen auf ein breites Spektrum von Carbonylen hin, das bei Verwendung von Biodiesel im Motor im Abgas nachgewiesen werden kann.

Zyklische Ether wie Furan, Tetrahydrofuran (THF), 2-Methyltetrahydrofuran (MTHF), 2-Methylfuran (MF) und 2,5-Dimethylfuran (DMF) werden ebenfalls sehr intensiv diskutiert, da sie über zellulose Biomasse zugänglich sind. Details ihrer Verbrennungschemie werden erst seit kurzem erforscht. Eine erste vergleichende Studie von Furan, MF und DMF [13-15] unter identischen Bedingungen zeigt eine Reihe interes-



santer Ergebnisse auf. Anhand kombinierter Messungen mit MBMS und Gaschromatographie (GC) in Bielefeld und Nancy konnte von der französischen Gruppe ein erstes gemeinsames Reaktionsmodell für alle drei Brennstoffe entwickelt werden. Unerwartet waren hohe Konzentrationen von Aromaten beim Einsatz von DMF. Im Vergleich dazu zeigt die Verbrennung des MTHF [16] deutlich geringere Neigung zur Bildung von Aromaten. Ebenso entstehen für alle zyklischen Ether – wie für die anderen untersuchten oxygenierten Kraftstoffe – wieder unterschiedliche, zum Teil toxische Carbonylverbindungen.

Solche aus den Analysen der Verbrennungschemie und den daraus entwickelnden Modellen absehbaren Hinweise zum möglichen Schadstoffaufkommen sollten in die Bewertung von Biokraftstoffen einfließen.

## Literatur

- [1] K. Kohse-Höinghaus, P. Oßwald, T.A. Cool, T. Kasper, N. Hansen, F. Qi, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **49**, 3572–3597, **2010**
- [2] S.M. Sarathy, P. Oßwald, N. Hansen, K. Kohse-Höinghaus, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **2014**, DOI: 10.1016/j.pecs.2014.04.003
- [3] F.N. Egolfopoulos, N. Hansen, Y. Ju, K. Kohse-Höinghaus, C.K. Law, F. Qi, *Prog. Energy Combust. Sci.* **43**, 36–67, **2014**
- [4] K. Kohse-Höinghaus, R.S. Barlow, M. Aldén, J. Wolfrum, *Proc. Combust. Inst.* **30**, 89–123, **2005**
- [5] N. Hansen, T.A. Cool, P.R. Westmoreland, K. Kohse-Höinghaus, *Prog. Energy Combust. Sci.* **35**, 168–191, **2009**
- [6] C.A. Taatjes, N. Hansen, A. McIlroy, J.A. Miller, J.P. Senosiain, S.J. Klippenstein, et al., *Science* **308**, 1887–1889, **2005**
- [7] N. Hansen, S.A. Skeen, H.A. Michelsen, K.R. Wilson, K. Kohse-Höinghaus, *J. Vis. Exp.* **87**, e51369, **2014**
- [8] D. Liu, J. Santner, C. Togbé, D. Felsmann, J. Koppmann, A. Lackner, et al., *Combust. Flame* **160**, 2654–2668, **2013**.
- [9] F. Herrmann, B. Jochim, P. Oßwald, L. Cai, H. Pitsch, K. Kohse-Höinghaus, *Combust. Flame* **161**, 384–397, **2014**
- [10] P. Oßwald, H. Güldenbergl, K. Kohse-Höinghaus, B. Yang, T. Yuan, F. Qi, *Combust. Flame* **158**, 2–15, **2011**
- [11] P. Osswald, U. Struckmeier, T. Kasper, K. Kohse-Höinghaus, J. Wang, T.A. Cool, et al., *J. Phys. Chem. A* **111**, 4093–4101, **2007**
- [12] C.K. Westbrook, W.J. Pitz, P.R. Westmoreland, F.L. Dryer, M. Chaos, P. Oßwald, et al., *Proc. Combust. Inst.* **32**, 221–228, **2009**
- [13] D. Liu, C. Togbé, L.-S. Tran, D. Felsmann, P. Oßwald, P. Nau, et al., *Combust. Flame* **161**, 748–765, **2014**
- [14] L.-S. Tran, C. Togbé, D. Liu, D. Felsmann, P. Oßwald, P.-A. Glaude, et al., *Combust. Flame* **161**, 766–779, **2014**
- [15] C. Togbé, L.-S. Tran, D. Liu, D. Felsmann, P. Oßwald, P.-A. Glaude, et al., *Combust. Flame* **161**, 780–797, **2014**
- [16] K. Moshhammer, S. Vranckx, H.K. Chakravarty, P. Parab, R.X. Fernandes, K. Kohse-Höinghaus, *Combust. Flame* **160**, 2729–2743, **2013**



# Einfluss der Emissionen biogener Kraftstoffe auf die Umwelt

---

Jürgen Bünger, Götz Westphal, Olaf Schröder, Axel Munack, Jürgen Krahl

## Abstract

During the last 20 years, our study group (Fuels Joint Research Group) conducted more than 30 studies on diesel engine emissions from biogenic and petrol diesel fuels using analytical chemistry and biological short-term assays. In summary, we confirmed a convincing decrease of toxicants in diesel engine emissions over time for both kinds of fuels indicating a significantly reduced human health risk.

## 1. Einleitung

Weltweit sind ein Großteil der Bevölkerung und Beschäftigte an zahlreichen Arbeitsplätzen durch Dieselmotoremissionen (DME) exponiert. DME können zu verschiedenen Gesundheitsrisiken der Atemwege und der Lunge sowie des Herz-Kreislauf-Systems beitragen. Aus arbeitsmedizinisch-epidemiologischen Studien geht hervor, dass akute und chronische Effekte von DME vor allem mit hohen Partikelexpositionen assoziiert sind. Im Jahr 2012 wurden DME von der International Agency for Research on Cancer (IARC), einer Tochterorganisation der WHO, als mutagen und humankarzinogen eingestuft [1].

In unserem interdisziplinären Forschungsverbund aus Ingenieuren, Chemikern, Biologen und Ärzten (Fuels Joint Research Group, FJRG) werden seit über zwei Jahrzehnten DME und ihre biologischen Effekte untersucht. Immer werden (neue) biogene Kraftstoffe (Biodiesel) im Vergleich zu herkömmlichem Diesel (DK) getestet. Aus 32 Projekten wurden die Daten der DME zu gesetzlich limitierten Komponenten und biologischen Effekten zusammengestellt und im Zeitverlauf analysiert.

## 2. Methoden

Getrennt nach biogener oder fossiler Herkunft der Kraftstoffe wurden die Ergebnisse für Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Partikelmasse (PM) und Mutagenität der DME aus der Verbrennung von Pkw- und Lkw-Motoren erfasst und dargestellt. Neben chemisch-analytischen Untersuchungen wurden immer auch biologische Kurzzeittests zur Bestimmung der Mutagenität durchgeführt. Die Mutation ist der erste Schritt der Karzinogenese. Daher ist die Bestimmung mutagener Effekte der DME ein Surrogatmarker für das karzinogene Potenzial der Emissionen.



### 3. Ergebnisse

Für alle genannten Emissionskomponenten zeigte sich im Zeitverlauf eine Reduktion der Emissionen [3]. Zur Reduktion trugen sowohl die modernen Motoren als auch die weiter- bzw. neuentwickelten Kraftstoffe und insbesondere die Abgasnachbehandlung mittels Dieseloxydationskatalysator (DOC), Dieselpartikelfilter (DPF) oder selektiver katalytischer Reduktion (SCR) bei.

Mit DOC wurde CO auf weniger als 0,01 g/kWh und HC auf unter 0,0005 g/kWh abgesenkt. Insgesamt lagen die Werte im Zeitverlauf immer weit unter den zulässigen EU-Grenzwerten. Beide Abgaskomponenten sollten unter den aktuellen Expositionsbedingungen kein Gesundheitsrisiko mehr darstellen.

Die NO<sub>x</sub>-Reduktion betrug etwa 75% (Abb.1) und wurde durch den Einsatz von SCR-Systemen auf über 95% gesteigert. Allerdings lagen die Emissionen für die fossilen Kraftstoffe jeweils nur knapp unter dem Limit für NO<sub>x</sub>. Bei den Biodieselskraftstoffen überschritten die Emissionen den Grenzwert um bis zu 25%. Stickoxide sind ein Sammelbegriff für Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). Letzteres besitzt eine Reizwirkung auf die Atemwege.

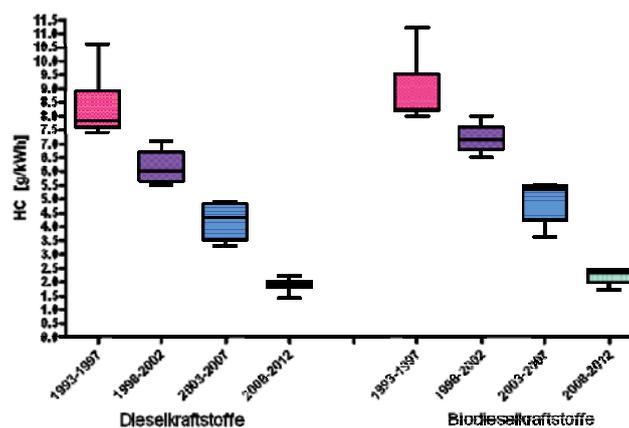


Abb. 1: Reduktion der Stickoxide im Dieselabgas ohne Abgasnachbehandlung

Obwohl eine Übersichtsarbeit experimenteller und epidemiologischer Studien eindeutige akute Effekte bei Gesunden erst ab 400 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> und bei Patienten mit leichtem Asthma oberhalb von 200 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> ergab und die Datenlage zur Ableitung eines Jahresmittelwertes nicht ausreichte, wurde aus umweltmedizinischer Sicht empfohlen, einen jährlichen Mittelwert von 20 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> in der Außenluft einzuhalten [5]. In der EU gilt für die Außenluft ein 1h-Wert von 200 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> und ein Jahresmittelwert von 40 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Die PM-Reduktion betrug bis zu 90% ohne und bis zu 99,9% mit DPF (Abb. 2). Da der größte Teil der mutagenen PAH an Partikel gebunden ist, resultierte auch eine Minderung mutagener Effekte (Abb. 3). Da nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand die Partikel die wesentlichen Effekte der DME verursachen, bedeutet deren Reduktion mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass auch gesundheitliche Risiken entsprechend abgesenkt wurden.

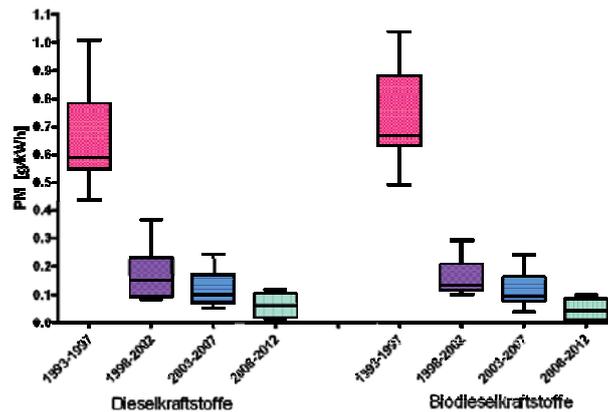


Abb. 2: Reduktion der Partikelmasse im Dieselabgas im Zeitverlauf

Eine anhaltende Diskussion betrifft die ultrafeinen Partikel (Nanopartikel), deren gesundheitliche Bedeutung größer sein soll als die größerer Partikel. Für diese Hypothesen fehlen aber bislang stichhaltige wissenschaftliche Beweise [4]. Unsere Messungen von Partikelanzahl- und Partikelgrößenverteilungen zeigen im Zeitverlauf eine Abnahme bei modernen Motoren. Darüber hinaus halten DPF auch ultrafeine Partikel zurück, wenn auch die Effektivität geringer als für größere Partikel ist. Die insbesondere für DK in den ersten Studien [7] beobachtete hohe Mutagenität sank über die zwei Jahrzehnte relativ kontinuierlich ab (Abb. 3). Bei Pkw mit Euro 5- und Euro 6-Zertifizierung und einem Lkw mit Euro VI-Standard war die Mutagenität in dem durchgehend seit 1993 verwendeten Standard-Protokoll des bakteriellen Rückmutationstestes gegenüber der Spontanmutationsrate nicht mehr signifikant erhöht.

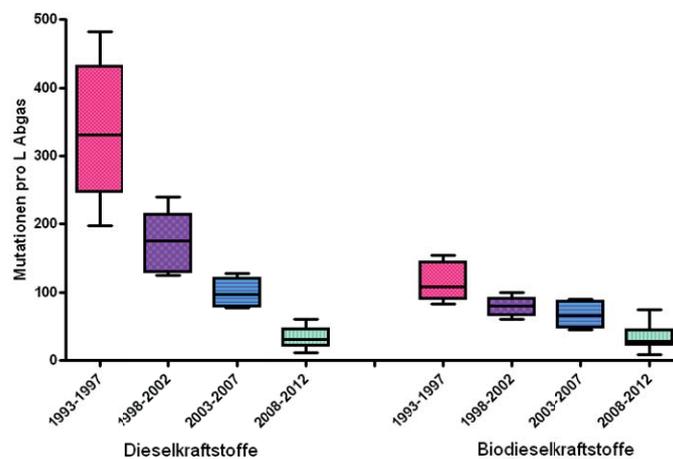


Abb. 3: Reduktion der mutagenen Effekte von Dieselabgas im Zeitverlauf

In einigen Kraftstoffprojekten wurden allerdings unerwartet hohe mutagene Effekte beobachtet, obwohl die gesetzlich limitierten Emissionen für diese Kraftstoffe keine oder nur geringe Auffälligkeiten ergaben. So wiesen die Abgaspartikulate von Rapsöl wie schon 1993 [7] auch in einem modernen Serien-Lkw-Motor eine stark erhöhte Mutagenität auf [2]. Mischkraftstoffe (80% DK, 20% RME) führten in einem Versuchsmotor (Euro 0) und 2 verschiedenen Lkw-Motoren (Euro III und Euro IV) eben-



falls zu einem Anstieg der mutagenen Effekte der Partikelemissionen. Die Ursache könnte die Bildung von Oligomeren aus den Kraftstoffkomponenten sein [6].

#### 4. Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden DME aus Pkw und Lkw und das damit verbundene Gesundheitsrisiko bedeutend abgesenkt. In allen anderen Arbeitsbereichen, vor allem beim Betrieb von Dieselmotoren in Gebäuden und unter Tage muss dieses niedrige Emissionsniveau auch erreicht werden (Minimierungsgebot).

Ob auf dem derzeit erreichbaren niedrigen Niveau noch ein erhöhtes Risiko durch diese DME am Arbeitsplatz oder für die Allgemeinbevölkerung existiert, ist nach der vorliegenden Datenlage nicht sicher abschätzbar.

Zur Risikobewertung und im Sinne der Prävention müssen neue Technologien und Kraftstoffe durch Emissionsmessungen und Kurzzeit-Screening-Tests zeitnah hinsichtlich der zu erwartenden Emissionen und Risiken untersucht werden. Aus diesem Grunde ist die FJR in aktuelle Projekte namhafter Automobil- und Kraftstoffhersteller eingebunden, da in der Vergangenheit in einigen Studien unerwartete mutagene Effekte neuer Kraftstoffe bzw. Mischkraftstoffe (Blends) auftraten, die aus der Messung der gesetzlich limitierten Emissionen von CO, HC, NO<sub>x</sub> und PM nicht erkennbar waren [2, 6].

#### Literatur

- [1] Benbrahim-Tallaa L, Baan RA, Grosse Y, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Guha N, Loomis D, Straif K, International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group: Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *Lancet Oncol* 13, 663 – 664 (2012).
- [2] Bünger J, Krahl J, Munack A, Ruschel Y, Schröder O, Emmert B, Westphal G, Müller M, Hallier E, Brüning T: Strong mutagenic effects of diesel engine emissions using vegetable oil as fuel. *Arch Toxicol* 81, 599 – 603 (2007).
- [3] Bünger J, Krahl J, Schröder O, Schmidt L, Westphal GA: Potential hazards associated with combustion of bio-derived versus petroleum-derived diesel fuel. *Crit Rev Toxicol* 42,732-750 (2012).
- [4] Gebel T: Small difference in carcinogenic potency between GBP nanomaterials and GBP micromaterials. *Arch Toxicol* 86:995-1007 (2012).
- [5] Kraft M, Eikmann T, Kappos A, Künzli N, Rapp R, Schneider K, Seitz H, Voss JU, Wichmann E: The German view: effects of nitrogen dioxide on human health—derivation of health-related short-term and long-term values. *Int J Hyg Environ Health* 208, 305–318 (2005).
- [6] Schröder O, Bünger J, Munack A, Knothe G, Krahl J: Exhaust emissions and mutagenic effects of diesel fuel, biodiesel and biodiesel blends. *Fuel* 103, 414-420 (2013).
- [7] Stalder K, Gerhard V, Frohmann H, Krahl J: Zytotoxizität und Mutagenität von Dieselruß bei Verwendung von Rapsmethylester als Kraftstoff. In: Triebig G, Stelzer O (Hrsg.) *Verh Dt Ges Arbeitsmed* 33, Gentner Verlag, Stuttgart, 75-78 (1993).



# Emissionen von Biokraftstoffgemischen aus Motoren mit SCR-Katalysator

---

Christoph Pabst

## Abstract

The influences of fuel mixtures, which were composed of diesel fuel, rapeseed oil methyl ester and hydrotreated vegetable oil, on the emissions of a heavy duty engine with SCR catalyst were studied during the project presented here. The regulated emissions as well as the mutagenicity of the exhaust gas were analyzed and could be reduced by ternary fuel mixtures.

## 1. Einleitung

Um den Anteil der regenerativen Energien zu erhöhen, die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken, erfordert die Gesetzeslage aktuell eine Quote von 7% Biodieselbeimischung zu Dieselkraftstoff [1]. Von der Europäischen Union ist für das Jahr 2020 ein regenerativer Energieanteil von 10% am Transportsektor vorgeschrieben [2], was eine weitere Erhöhung der Beimischung biogener Komponenten erfordern könnte. Die verwendeten Mischkomponenten und die zukünftige Zusammensetzung der Kraftstoffe werden jedoch mit Blick auf neue Technologien und Abgasgrenzwerte ständig weiterentwickelt.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden am Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig Untersuchungen zu den Einflüssen von Kraftstoffgemischen mit hohem Biogenitätsgehalt, bestehend aus Dieselkraftstoff (DK), Rapsölmethylester (RME) und hydriertem Pflanzenöl (HVO), auf die Emissionen eines für die Serie applizierten Motors mit SCR-Abgasnachbehandlung durchgeführt. Dabei wurden sowohl limitierte Emissionen als auch die Mutagenität des Abgases bestimmt. Außerdem sollte geprüft werden, ob sich die aus der Literatur bekannten Trends für die Beimischung von RME und HVO in binären Gemischen auf den Einsatz in ternären Gemischen übertragen lassen [2, 3, 4].

## 2. Material und Methoden

Die Untersuchungen erfolgten am Emissionsprüfstand des Instituts für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Johann Heinrich von Thünen-Instituts. Der eingesetzte Motor war ein Nfz-Motor der Daimler AG vom Typ OM 904 LA (4,25 L; 130 kW; 675 Nm). Er war mit einem auf Vanadiumoxid basierenden SCR-Katalysator zur Stickoxidreduzierung ausgestattet. Der Motor war mit einer Asynchronmaschine der Firma AVL gekoppelt und wurde im ETC-Test betrieben. Die Harnstofflösung (AdBlue) wird aus dem entsprechenden Tank über ein Dosiersystem direkt in den Abgasstrang eingedüst und setzt sich dort zu Ammoniak und Kohlenstoffdioxid um. Anschließend reduziert das Ammoniak die Stickoxide am Katalysator.



Der Betrieb des Systems und die Einstellung der Dosiermenge erfolgten durch das Steuergerät des Motors. Zur Freigabe der Dosierung müssen Grenztemperaturen am Ein- und Ausgang des Katalysators überschritten sein und der Motor muss mit ausreichender Last betrieben werden. Durch die Vorgabe von minimalen Temperaturen und die unterstöchiometrische Dosierung werden die Bildung von Ablagerungen am Katalysator und Ammoniakschlupf vermieden.

Die Abgasanalyse der Stickoxide wurde mit einem Chemilumineszenz-Detektor (CLD 700 EL ht, EcoPhysics, München), die der Kohlenwasserstoffe mit einem Gasanalysator mit Flammen-Ionisationsdetektor (RS 55-T, Ratfisch Company, Poing) und die des Kohlenstoffmonoxid mit nicht dispersem Infrarotlicht im BA5000-Gasanalysator (Bühler Technologies, Ratingen) durchgeführt. Die Bestimmung der Partikelmasse wurde durch Abscheidung und Wägung auf mit PTFE beschichteten Borosilikatfiltern (EMFAB TX40HI20-WW, Fa. Pall) durchgeführt. Die Beprobung für die Untersuchung der Mutagenität erfolgte mit einem konstanten Abgasstrom von 25 L/min aus dem unverdünnten Abgas über einen Dimrothkühler und einen Intensivkühler mit einer Temperatur von  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nach dem zweiten Kühler wurde dann die Partikelfraktion auf mit PTFE beschichteten Glasfaserfiltern (Pallflex Fiberfilm, TA60A20, 70 mm, Fa. Pall) abgeschieden. Das in den Kühlern abgeschiedene Kondensat wurde mit Methanol für die spätere Analyse in einen Rundkolben gespült. Nach der Extraktion der Partikulate wurden sämtliche Mutagenitätsproben in DMSO umgelöst und anschließend an der Ruhr-Universität Bochum im Ames-Test [5, 6] auf ihre Mutagenität untersucht.

### 3. Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Messungen enthalten zum einen die Reinkraftstoffe DK und RME und HVO und ternäre Gemische aus den drei Komponenten. Bei den ternären Gemischen gibt die Zahl hinter den biogenen Komponenten jeweils die prozentualen Anteile an. Durch die Analyse von limitierten Emissionen und der Mutagenität sollten sowohl die gesetzlichen Vorgaben als auch die gesundheitlichen Auswirkungen der Motoremissionen betrachtet werden. Für die limitierten gasförmigen Abgasbestandteile wurden auch die Rohemissionen des Motors gemessen.

Als erstes erfolgt die Betrachtung der Stickoxidemissionen. Die Ergebnisse der Messreihen sind in *Bild 1* dargestellt. Es sind sowohl die Messungen des Rohabgases vor dem Katalysator als auch die des nachbehandelten Abgases abgebildet.

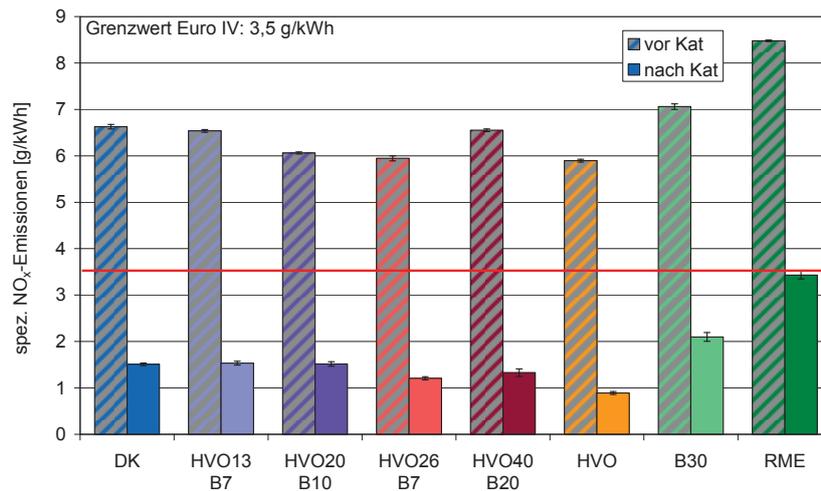


Bild 1: Spez.  $\text{NO}_x$ -Emissionen am OM 904 LA im ETC-Test

Wie nicht anders zu erwarten zeigen sich im Rohabgas deutlich höhere Stickoxidemissionen zwischen 5,9 g/kWh und 8,5 g/kWh. Dabei steigen die Werte wie schon aus der Literatur bekannt [3, 4] für RME an und sinken für HVO ab. Für die ternären Gemische kommt es trotz der RME-Beimischung von bis zu 20% nicht zu einem Anstieg der Stickoxidemissionen, da dieser für den Kraftstoff typische Effekt offenbar durch den HVO-Anteil kompensiert wird. Auch im nachbehandelten Abgas führen lediglich B30 und RME zu gesteigerten Stickoxidemissionen. Aufgrund der ähnlichen Rohemissionen und der gleichbleibenden AdBlue-Dosierung zeigen sich für die ternären Gemische ähnliche Emissionen wie bei DK, wobei mit steigendem HVO-Anteil ein Trend zu verringerten Stickoxidwerten erkennbar ist. Zur Kompensation der erhöhten  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch RME wurden ergänzende Versuche mit einem gesteigerten Ammoniakmassenstrom durchgeführt. Hierbei wurde deutlich, dass sich auch die Emissionen eines B30-Blends auf das DK-Niveau absenken lassen. Ammoniakemissionen können bei diesen Tests vermieden werden. Damit wird deutlich, dass eine Anpassung des Abgasnachbehandlungssystems an den verwendeten Kraftstoff erforderlich ist.

Betrachtet man die Partikelmasseemissionen so geht die Emission sowohl für RME als auch für HVO deutlich zurück. Auch die ternären Gemische liegen klar unterhalb von DK. Lediglich für HVO40B20 lässt sich mit einem stärkeren Rückgang ein deutlicher Unterschied zu den anderen Gemischen ermitteln, der auch den Wert des reinen HVO unterschreitet. Hier scheinen sich die emissionsverringenden Eigenschaften von RME und HVO zu ergänzen.

Bezüglich der Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxidemissionen gehen die Rohemissionen für alle ternären Gemische verglichen mit denen des DK klar zurück. Ähnlich der Partikelmasse sind auch hier die Unterschiede zwischen den Gemischen sehr gering. HVO40B20 mit dem höchsten biogenen Anteil führt tendenziell zu den geringsten Emissionen. Der SCR-Katalysator zeigt auf die CO-Emissionen nur geringen Einfluss. Die HC-Emissionen werden hingegen nahezu vollständig umgesetzt, so dass im Abgas dann nur noch wenige ppm an HC-Emissionen messbar waren und eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Kraftstoffen im Rahmen der Messgenauigkeit nicht mehr möglich war.

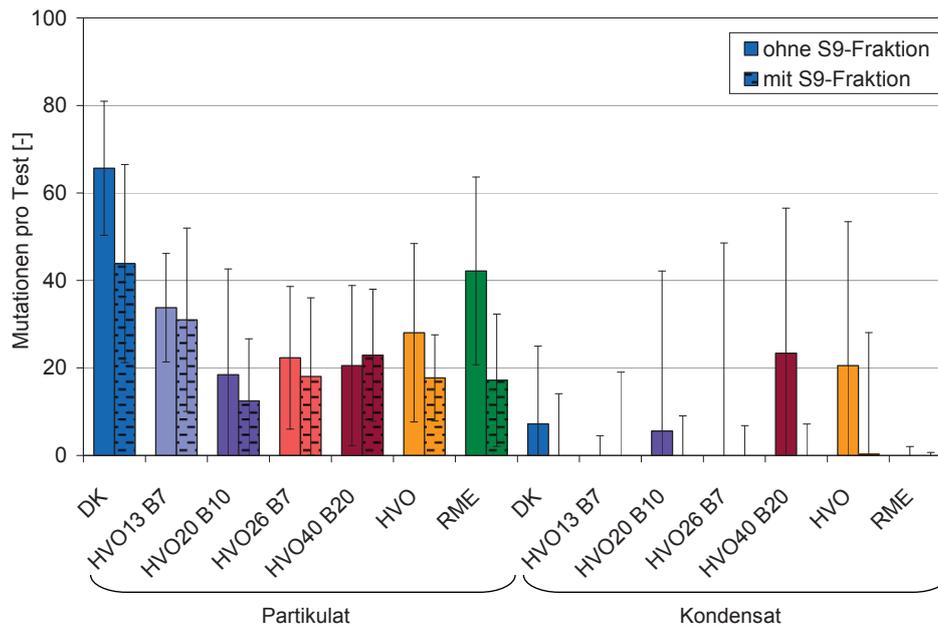


Bild 2: Vergleich der Mutagenität im Partikulat und Kondensat am OM 904 LA im ETC-Test mit dem Bakterienstamm TA100

Zusätzlich zu den für Euro IV-Motoren limitierten Abgaskomponenten erfolgte bei den Prüfläufen auch eine Analyse der erst mit der Euro VI-Norm auf 10 ppm limitierten Ammoniakemission. Bei der Größenordnung der Messergebnisse von 0,1 bis 0,2 ppm lassen sich keine Unterschiede zwischen den Kraftstoffen feststellen. Aufgrund der hohen Temperaturgrenzen von 250 °C und der unterstöchiometrischen Dosierung waren auch keine NH<sub>3</sub>-Emissionen zu erwarten.

Neben den limitierten Emissionen erfolgte an der Ruhr-Universität Bochum auch eine Untersuchung der Mutagenität von Partikulat und Kondensat des Abgases. Beim Vergleich der ternären Gemische lassen sich lediglich im Partikulat geringe mutagene Tendenzen ermitteln (Bild 2). Tendenziell liegen die Werte für DK etwas oberhalb der übrigen Kraftstoffe, was sich auch anhand von anderen Messreihen mit DK, RME und HVO bestätigen lässt [4].

#### 4. Zusammenfassung

Bezüglich der Biodieselbeimischung von RME und HVO in ternären Gemischen ergaben sich für den untersuchten Nfz-Motor mit SCR-Katalysator limitierte Emissionen im Rahmen der Trends, die bei Übertragung der bekannten Ergebnisse der binären Gemische zu erwarten waren. Die Trends eines Stickoxidanstiegs mit steigender Biodieselskonzentration lassen sich durch die Beimischung von HVO kompensieren. Die PM-, HC-, und CO-Emissionen gehen durch die Biokraftstoffbeimischung deutlich zurück. Durch die Kombination von RME und HVO ist eine Einstellung der Stickoxidemissionen des Rohabgases in der Größenordnung von DK möglich. So ließen sich bereits am Markt befindliche Nfz-Motoren mit den serienmäßigen Abgasnachbehandlungssystemen auch ohne eine Änderung der Parametrierung mit erhöhten Biokraftstoffbeimischungen betreiben. Für die Zukunft ist eine Abstimmung zwischen Kraft-



stoff, Motor und Abgasnachbehandlungssystem zwingend erforderlich um die Ziele der Emissionsminderung zu erreichen.

## Literatur

- [1] BioKraftQuG: Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften. Bundesgesetz (2006), BT-Drs 16/2709
- [2] EG 2009/28 (2009). Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG
- [3] Hoekman, S.K., Robbins, C. (2012). Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. Fuel Processing Technology 96, 237-249
- [4] Kuronen, M., Mikkonen, S., Aakko, P., Murtonen, T. (2007). Hydrotreated Vegetable Oil as Fuel for Heavy Duty Diesel Engines. SAE Technical Paper Series 2007-01-4031
- [5] Pabst, C., Munack, A., Bünger, J., Krahl, J. (2014) Emissionen von Biokraftstoffgemischen aus Motoren mit SCR-Katalysator. MTZ – Motortechnische Zeitschrift, Nr. 2, 64-71
- [6] Ames, B.N.; Lee, F.D.; Durston, W.E. An improved bacterial test system for the detection and classification of mutagens and carcinogens. Proc. Natl. Acad. Sci. USA (1973) Nr. 70, 782-786
- [7] Ames, B.N.; McCann J.; Yamasaki, E.; (1975): Methods for detecting carcinogens and mutagens with the Salmonella/mammalian-microsome mutagenicity test. Mutat. Res. (1975), Nr. 31, 347-363





## Die Autoren

---

### Herausgeber

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

Prof. Dr.-Ing. Axel Munack  
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

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

Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University

Dr.-Ing. Dipl.Wirt.-Ing. Florian Kremer, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University

Dipl.-Ing. Fabian Hoppe, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Steiger, Volkswagen AG, Konzern Außen- und Regierungsbeziehungen, Wolfsburg

Stephan Arens, Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Berlin

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

Prof. Dr. Uwe Schröder, Technische Universität Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie, Braunschweig

Tatiane R. dos Santos, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

Peter Nilges, TU Braunschweig, Braunschweig

Waldemar Sauter, TU Braunschweig, Braunschweig

Dr. Falk Harnisch, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ – Leipzig



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

Dipl.-Ing. Stefan Majer, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Dipl.-Ing. Karin Naumann, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH, Lehrstuhl Bioenergiesysteme, Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Leipzig

Dr.-Ing. Ingo Blei, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Braunschweig

Dr. Klaus Zanter, Emission Partner GmbH & Co. KG, Saterland

Dipl.-Ing. Dirk Goeman, Emission Partner GmbH & Co. KG, Saterland

Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse, HTW Dresden, Dresden

Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner, Daimler AG, Stuttgart

Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus, Physikalische Chemie I, Universität Bielefeld, Bielefeld

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

Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Götz Westphal, Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA), Bochum

Dr. rer. nat. Olaf Schröder, Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg (TAC), Coburg

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

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Krahl, Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg (TAC), Coburg

Christoph Pabst, ehemaliger Mitarbeiter des Thünen-Institus für Agrartechnologie, Braunschweig



**Bildnachweise** (Buchumschlag):

Markus Gann / photocase.de  
crocodile / photocase.de





