



Olaf Jens Schröder (Autor)

Änderung der Emissionen limitierter und nicht limitierter Abgaskomponenten durch die Einführung biogener Kraftstoffe als Substitut für fossile Dieselkraftstoffe



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6647>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist im Zeitraum von 1996 bis 2012 an Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Johann Heinrich von Thünen-Instituts, vTI (bis zum 31.12.2007 Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, FAL) entstanden. Sie befasst sich mit der Änderung der Emissionen limitierter und nicht limitierter Abgaskomponenten durch die Einführung biogener Kraftstoffe als Substitut für fossile Dieselkraftstoffe.

Diese kumulative Dissertation umfasst 13 wissenschaftliche Arbeiten, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Im Folgenden wird mit der jeweiligen römischen Nummer auf die Publikation Bezug genommen, die sich im Anhang befinden. Zusätzlich wird auf Analysemethoden, die in den Publikationen nicht ausführlich beschrieben sind, genauer eingegangen und zusammenfassend wird die Entwicklung der Emissionen von Dieselmotoren im Betrieb mit Dieselkraftstoff und Biodiesel für die während des Berichtszeitraums genutzten Motorgenerationen aufgezeigt.

Tabelle 1: Publikationen der kumulativen Dissertation

	Publikation	Art der Publikation
I	Schröder O , Krahl J, Munack A, Bünger J (1999) Environmental and health effects caused by the use of biodiesel. SAE Techn Pap 1999-01-3561: 1-11	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
II	Krahl J, Munack A, Schröder O , Bünger J, Bahadir M (2002) Environmental and health impacts due to biodiesel exhaust gas. Fresenius Envir Bull 11(10b): 823-828	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
III	Krahl J, Bünger J, Munack A, Bahadir M, Schröder O , Stein H, Dutz M (2003) Biodiesel and Swedish low sulfur Diesel fuel as ecologically compatible fuels in modern Diesel engines. Fresenius Envir Bull 12(6): 640-647	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
IV	Krahl J, Munack A, Ruschel Y, Schröder O , Bünger J (2007) Comparison of emissions and mutagenicity from biodiesel, vegetable oil, GTL and diesel fuel. SAE Pap 2007-01-4042: 1-7	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift

V	Krahl J, Munack A, Grope N, Ruschel Y, Schröder O , Bünger J (2007) Biodiesel, rapeseed oil, gas-to-liquid, and a premium diesel fuel in heavy duty diesel engines: endurance, emissions and health effects. Clean 35(5): 417-426	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
VI	Schröder O , Bünger J, Munack A, Knothe G, Krahl J (2013) Schröder O et al. Exhaust emissions and mutagenic effects of diesel fuel, biodiesel and biodiesel blends. Fuel 103: 414-420 online: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.050	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
VII	Munack A, Krahl J, Wilharm T, Ruschel Y, Schaak J, Schröder O , Schmidt L (2009) Emissionsprüfung synthetischer Dieselmotoren. Landbauforsch 59(4): 345-356	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
VIII	Krahl J, Knothe G, Munack A, Ruschel Y, Schröder O , Westphal GA, Bünger J (2009) Comparison of exhaust emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels. Fuel 88: 1064-1069	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
IX	Krahl J, Munack A, Schröder O , Ruschel Y (2010) 500 hours endurance test on biodiesel running a Euro IV engine. SAE Int J Fuels Lubric 3(2): 982-994	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift
X	Munack A, Bittner P, Schönfeld H, Schröder O , Semmler J, Speckmann H, Stein H, Timrott C, Krahl J (2003) Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodiesel-Kraftstoffsensors. Braunschweig: FAL, Landbauforsch Völkenrode SH 257: 1-76	Forschungsbericht
XI	Munack A, Capan E, Schröder O , Stein H, Krahl J (2003) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen mit fossilem Dieselmotoren auf limitierte Emissionen". Braunschweig: FAL, 1-37	Forschungsbericht
XII	Munack A, Pabst C, Schaak J, Schmidt L, Schröder O , Krahl J, Bünger J (2010) Fuel and technology alternatives for buses - measurements with NExBTL and Jatropha oil methyl ester in a Euro III heavy duty engine: research project report. Braunschweig, vTI: 1-61	Forschungsbericht
XIII	Schröder O , Munack A, Schaak J, Pabst C, Schmidt L, Bünger J, Krahl J (2012) Emissions from diesel engines using fatty acid methyl esters from different vegetable oils as blends and pure fuel. Journal of Physics: Conference Series 364: 012017.	Referierte wissenschaftliche Zeitschrift

Insgesamt wurden am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik sechs verschiedene Motoren eingesetzt. Dabei wurden hauptsächlich Motoren untersucht, die im Nutzfahrzeugsbereich bzw. bei landwirtschaftlichen Maschinen Verwendung fanden. Drei Motoren waren nach keiner Abgasnorm klassifiziert. Dabei handelt es sich um zwei MWM-Motoren (MWM D 226.4.2), die baugleich in zwei Fendt-Schleppern eingesetzt waren, und einen Einzylinder-Motor (Farymann 18 D), der sich durch geringen Kraftstoffverbrauch auszeichnete. Ab 2001 wurden jeweils Motoren für die Versuche genutzt, deren Emissionsklasse einen Großteil der am Markt befindlichen Motoren abdeckte. Sie entsprachen den Emissionsklassen Euro II, Euro III und Euro IV (Daimler OM 904 LA, Daimler OM 906 LA, MAN D0836 LFL 51).

Entwicklung der Analytik

Gesetzlich limitiert sind die Emissionen von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen, Stickoxiden und Partikelmasse. Ab der Emissionsklasse Euro VI, die 2013 in Kraft tritt, ist auch die Partikelanzahl limitiert (Europäische Kommission, 2011). Neben diesen limitierten Abgaskomponenten enthält das Abgas noch viele weitere Komponenten wie Ozonvorläufersubstanzen und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die zu Umwelt- und Gesundheitsbelastung beitragen. Daneben kann auch die Bestimmung der Mutagenität sowie der Partikelanzahl und der Partikelgrößenverteilung Auswirkungen auf die Gesundheitsbelastung aufzeigen.

Für die Ermittlung der gasförmigen limitierten Abgasbestandteile standen handelsübliche Analysatoren zur Verfügung. Die Bestimmung der Partikelmasse erforderte jedoch die Probenahme aus verdünntem Abgas. Dazu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechende Verdünnungssysteme entwickelt und an die jeweiligen Motoren und Testzyklen angepasst (siehe Kapitel 4.1).

Die Ozonvorläufersubstanzen setzen sich aus den Substanzklassen der Carbonyle, der Alkene und der Aromaten zusammen. Um die Carbonyle ohne Missweisungen bestimmen zu können, mussten etablierte Verfahren auf die jeweilige Probenmatrix angepasst werden (siehe Kapitel 4.2). Für die Alkene und Aromaten wurde ein Verfahren entwickelt, das diese Substanzen für die GC/MS-Analyse mittels Thermosorption und -desorption mit anschließender Kryofokussierung anreichert (siehe Anhang I bis III).

Die Bestimmung der Mutagenität wurde in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. med. Bünger (Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV, Institut der Ruhr-Universität Bochum) mittels Ames-Test durchgeführt. Die Probenahme von Partikulat auf Filtern und

Kondensaten aus gekühltem Abgas fand an den Prüfständen in Braunschweig statt (siehe Kapitel 4.4). Die Aufarbeitung dieser Proben und der anschließende Ames-Test wurden von der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Büniger in Göttingen und Bochum durchgeführt.

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und der im Abgas vorhandenen PAK wurden weitestgehend von Dr. Hendrik Stein, Dr. Yvonne Ruschel und Dr. Jens Schaak durchgeführt und sind in deren Dissertationen (Stein, 2008, Ruschel, 2010 und Schaak, 2012) beschrieben.

Entwicklung der Emissionen bei Nutzung von Dieselkraftstoff und Biodiesel über den Betrachtungszeitraum von 1996 bis 2012

Als biogener Kraftstoff im Dieselpbereich wurde bisher hauptsächlich Biodiesel (Fettsäuremethylester, FAME) eingeführt. Daher ist dieser Kraftstoff bei allen Versuchsreihen einbezogen. Zuerst stand der direkte Vergleich von Biodiesel aus Raps zu fossilem Dieselkraftstoff (DK) im Mittelpunkt der Untersuchungen (Anhang I und II). Im Weiteren dienten Biodiesel aus Raps und Dieselkraftstoff dazu, ihre Emissionen mit anderen biogenen Kraftstoffen zu vergleichen. Daraus ergibt sich eine hohe Zahl an Versuchsreihen in unterschiedlichen Motorengenerationen, bei denen Biodiesel mit Dieselkraftstoff verglichen wurde. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.1 beschrieben.

Grundsätzlich ist tendenziell festzustellen, dass die Emissionen mit der Entwicklung der Motoren deutlich abnehmen. Dabei ergibt sich aber bei allen Motorgenerationen ein Nachteil für Biodiesel für die Stickoxidemissionen. Sie sind im Schnitt um 10 % erhöht. Dagegen sind die Kohlenwasserstoffemissionen und die Kohlenmonoxidemissionen meist geringer. Eine Besonderheit ergibt sich bei der Mutagenität. Sie ist bei Vergleichsmessungen mit Motoren der Emissionsklasse Euro II und darunter bei Biodiesel deutlich geringer als bei Dieselkraftstoff. Mit Einführung des Euro III-Motors nimmt das mutagene Potenzial des Abgases weiter ab, aber gleichzeitig verschiebt sich die Mutagenität ab dem Euro III-Motor zu Ungunsten von Biodiesel. Diese Tendenz kann durch die Verbesserung des Dieselkraftstoffs (z.B. Entschwefelung) und die immer bessere Abstimmung der Motoren auf den Standard-Dieselpkraftstoff bedingt sein.

Weitere biogene Kraftstoffe

Neben Biodiesel wurde in den Jahren von 2005 bis 2008 auch Pflanzenöl als Kraftstoff im Straßenverkehr in größeren Mengen eingesetzt. So erreichte der Verbrauch von Pflanzenölkraftstoff 2007 mit 756 kt in der Bundesrepublik Deutschland ein Maximum. Daher wurde das Emissionsverhalten von Rapsölkraftstoff im Euro III-Testmotor untersucht.

Als herausragendes Ergebnis ist die bis zu zehnfach erhöhte Mutagenität bei der Verwendung von Rapsöl anzusehen. Aber auch die Stickoxidemissionen waren mehr als 20 % gegenüber Dieseldieselkraftstoff erhöht (Anhang IV, V und VIII).

Der Anbau von Pflanzenöl steht in Flächenkonkurrenz zum Anbau von Nahrungsmitteln und anderen Energiepflanzen, wie z.B. Mais für die Biogasproduktion. Eine Möglichkeit, diese Konkurrenzsituation zu umgehen, ist die Nutzung von Biomasse aus Abfallstoffen (Restholz, Grünschnitt etc.). Dabei kann nicht nur das Pflanzenöl, sondern die gesamte Pflanze zur Kraftstoffherzeugung genutzt werden. Ein Weg, an dem intensiv geforscht wird, ist die Umwandlung von Biomasse mittels Pyrolyse in Synthesegas und die Weiterverarbeitung zu Kraftstoffen mittels Fischer-Tropsch-Synthese. Um die Auswirkungen solcher zukünftigen Kraftstoffe auf das Abgasverhalten zu untersuchen, wurde als Prototyp für einen eventuellen Biomass-to-Liquid-Kraftstoff (BtL) ein Gas-to-Liquid-Kraftstoff (GtL) eingesetzt, da bisher keine Produktionsanlage für Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus Biomasse, die BtL hätte liefern können, existiert. Zusätzlich wurden Kraftstoffe aus verschiedenen Siedeschnitten eines GtL-Kraftstoffs untersucht, um die Auswirkung von Kraftstoffvariationen zu ermitteln. Die untersuchten „Designer“-Kraftstoffe zeigten alle ein günstigeres Abgasverhalten im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff (Anhang IV, V und VII, VIII).

Ein ähnlich gutes Emissionsverhalten wie die GTL-Kraftstoffe zeigte auch ein Kraftstoff, der durch die Hydrierung von Pflanzenölen (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) hergestellt wurde (Anhang XII).

Mischkraftstoffe

Biogene Kraftstoffe können den fossilen Dieseldieselkraftstoff bisher nur zu einem einstelligen Prozentbereich ersetzen. Nach Bickert (2007) können weltweit durch alle verfügbaren Pflanzenöle nur 140 Mt/a (21 %) des Dieseldieselkraftstoffverbrauchs von 670 Mt/a ersetzt werden. Daher stellt sich die Frage, ob der biogene Kraftstoff als Reinkraftstoff angeboten und genutzt werden soll, oder ob Mischungen aus fossilen und biogenen Anteilen in Hinblick auf die Emissionen besser sind. Diese Frage stellte sich insbesondere für Biodiesel, da dieser Kraftstoff als erster biogener Kraftstoff auf dem Kraftstoffmarkt eingeführt wurde und dort 2007 mit über 10 % den größten Marktanteil erreichte. Mit der Einführung einer Quote von 5 vol% Biodiesel im Dieseldieselkraftstoff ab 2008 (7 vol% ab 2010) und der ab 2006 zunehmenden Besteuerung des Reinkraftstoffes hat diese Frage an Dringlichkeit verloren, da Biodiesel unter diesen Rahmenbedingungen ab 2009 zu über 90 % als Beimischung zum fossilen Dieseldieselkraftstoff verkauft wird.

Um zu klären, ob Blends oder Reinkraftstoffe hinsichtlich der Abgasemissionen günstiger sind, wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Motoren durchgeführt (Anhang I, VI und XI). Zusätzlich wurden verschiedene Blends mit 20 % Biodiesel untersucht (Anhang V und VI). Dabei ergaben sich für die limitierten Abgaskomponenten lineare Veränderungen mit dem Biodieselanteil. Im Gegensatz zu den limitierten Abgaskomponenten zeigte sich für das mutagene Potenzial ein Maximum bei 20 % Biodiesel im Kraftstoff (Anhang V, VI).

Sensorik und Dauerlauf

Dieselmotoren weisen bei dem Betrieb mit Biodiesel im Gegensatz zum Dieselmotorkraftstoffbetrieb eine im Mittel um 10 % erhöhte Stickoxidemission auf (Lapuerta et al., 2008, Bünger et al., 2012 und Anderson, 2012). Dadurch können viele Motoren die Grenzwerte für die Stickoxidemissionen mit Biodiesel nicht mehr einhalten. Es ist jedoch möglich, durch Änderung des Einspritzzeitpunkts die Stickoxidbildung innermotorisch zu verringern (Syassen et al., 2001, Hoepke und Breuer, 2008). Damit die erforderliche Verstellung im laufenden Betrieb durch das Motorsteuergerät eingestellt werden kann, muss die Information vorliegen, ob und in welchem Prozentsatz Biodiesel im Kraftstoffsystem vorhanden ist. Dies kann durch einen Sensor erfolgen, der auf der Bestimmung der Dielektrizitätszahl beruht. Im Anhang X ist die Entwicklung eines solchen Biodieselsensors aufgezeigt. Dabei ist die Messung der Dielektrizitätszahl bei unterschiedlichen Frequenzen beschrieben, und der Einfluss von Störgrößen wie Temperatur, Verunreinigungen, Additiven wird untersucht.

Ab Abgasstufe Euro IV sind Abgasnachbehandlungssysteme notwendig, um die strengeren Abgasvorschriften einzuhalten. Hierzu wurde in einigen MAN-Motoren ein kontinuierlich arbeitender Partikelfilter (PM-Kat[®]) eingesetzt. Um den Motor auch mit Biodiesel betreiben zu können, musste sichergestellt sein, dass dieser Filter auch im Dauerbetrieb seine Wirksamkeit behält. Daher wurde ein solcher Partikelfilter in einem 500-Stunden Dauertest mit Biodieselabgas beladen. Im Testzeitraum wurden limitierte und nicht limitierte Emissionen bestimmt. In Ergebnis zeigte sich nur eine minimale Abnahme der Aktivität des Filters. (Anhang IX)

Fazit

Mit den hier beschriebenen Arbeiten konnte das Wissen über biogene Kraftstoffe – insbesondere mit Hinblick auf ihre Emissionen – deutlich erweitert werden.

Bekanntermaßen zeigte Biodiesel bei den Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Partikelmasseemissionen zumeist geringere Emissionen im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Dagegen sind die Stickoxidemissionen im Schnitt um 10% erhöht. Erstmals wurde das Ozonbildungspotenzial von Biodiesel untersucht. Für die geprüften Motoren ergaben sich höhere Emissionen von Alkenen und Aldehyden und damit ein höheres Ozonbildungspotenzial bei der Nutzung von Biodiesel.

Ebenfalls wurden die Emissionen von Kraftstoffblends aus Dieselkraftstoff und RME erstmalig ausführlich beschrieben. Dabei zeigte sich in fast allen Testreihen für die limitierten Komponenten ein linearer Zusammenhang zwischen dem Biodieselanteil im Kraftstoff und dem Emissionsniveau. Im Gegensatz dazu fanden sich aber in mehreren Messreihen bei einem Biodieselanteil von ca. 20 % jeweils die höchsten Mutationsraten in Ames-Test.

Daneben wurden auch die Emissionen weiterer Kraftstoffe (Rapsöl, GTL, HVO) getestet. Während GTL und HVO insgesamt ein niedrigeres Emissionsniveau gegenüber Dieselkraftstoff zeigten, sind die Emissionen von Partikelmasse und Stickoxiden bei Rapsöl bis zu 20 % erhöht, und das mutagene Potenzial kann um den Faktor 10 ansteigen. Diese Aspekte wurden auf Grundlage der hier ermittelten Ergebnisse intensiv und mit Schwerpunkt auf die PAK-Analytik in der Dissertation von Schaak (2012) untersucht.

Für die Messung nicht limitierter Komponenten wurden analytische Methoden entwickelt, mit denen eine sichere Bestimmung von Carbonylen, Aromaten und Alkenen möglich ist. Zusätzlich wurde ein Probenahmeverfahren für Mutagenitätsuntersuchungen entworfen, mit dem es möglich ist, die Probenahme zu standardisieren. Ebenfalls wurde ein Abgasverdünnungstunnel zur normgerechten Probenahme aus verdünntem Abgas für transiente Motortests entwickelt.

Weiterhin wurden mit den Grundlagen zum Bau eines Biodieselsensors und mit Versuchen zur Dauerstabilität von Abgasnachbehandlungssystemen Voraussetzungen geschaffen, biogene Kraftstoffe für den Verkehrssektor weiterhin nutzbar zu machen.



2 Einleitung

Seit dem 2. Weltkrieg werden Dieselmotoren in vielen Industriezweigen sowie in den Bereichen Transport und Verkehr eingesetzt. Neben ihrer guten energetischen Effizienz wurde später auch auf die besondere Umweltverträglichkeit verwiesen, da die Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen vergleichsweise niedrig sind.

Fortgeschrittene Erkenntnisse führten jedoch zu einer Neubewertung des Dieselmotors. Im Vordergrund dieser Diskussion stehen die deutlich höheren Stickoxid- und Partikelemissionen des Dieselmotors im Vergleich zum Ottomotor. So sind Dieselmotoremissionen ab 2012 als krebserregend eingestuft (IARC, 2012). Neben diesen Komponenten ist noch eine Vielzahl weiterer Substanzen im Abgas für die Schädlichkeit von Dieselmotorabgasen verantwortlich. Dieselmotoremissionen und die damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen sind natürlich auch für den Einsatz von biogenen Kraftstoffen, die einen Teil des fossilen Kraftstoff ersetzen sollen, von Bedeutung.

Diesekraftstoff

Fossiler Diesekraftstoff ist ein Siedeschnitt der Erdölraffination. Je nach Zusammensetzung der Grundöle ergeben sich unterschiedliche Zusammensetzungen des Diesekraftstoffs. Zusätzlich wird ein Teil des Diesekraftstoffs aus den Mitteldestillatfraktionen aus Crackanlagen hergestellt (Aral, 2012).

Diesekraftstoff hat einen Siedebereich zwischen 160 °C und 380 °C. Der Siedeverlauf des Kraftstoffs ist in Anhang VII dargestellt. Der Diesekraftstoff besteht hauptsächlich aus Alkanen, Cycloalkanen und aromatischen Kohlenwasserstoffen mit etwa 10 bis 22 Kohlenstoffatomen pro Molekül (Pitz und Mueller, 2011). Daneben können Additive zur Verbesserung der Zündwilligkeit und des Kälteverhaltens zugegeben sein.

Die Eigenschaften des Diesekraftstoffs werden durch die DIN EN 590 (2010) festgelegt. Nach dieser Norm darf Diesekraftstoff bis zu 7 % Biodiesel beigemischt werden. Neben Diesekraftstoffen nach DIN EN 590 ist für die Zertifizierung der Abgasemissionen ein „European Emission Certification Fuel RF-06-03 (Euro IV)“ erhältlich (CEC, 2009). Dieser Kraftstoff enthält keinen Biodiesel und seine Spezifikationen sind wesentlich enger gesetzt (Tabelle 2).



Tabelle 2: Spezifikation von Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 (2010) und Referenzkraftstoff RF-06-03 (CEC, 2009)

	Grenzwert DIN EN 590		Grenzwert RF-06-03 (CEC)		Testmethode
	Min.	Max.	Min.	Max.	
Dichte (15 °C) [kg/m ³]	820	845	833	837	ISO 3675
kin. Viskosität (40 °C) [mm ² /s]	2,0	4,5	2,3	3,3	ISO 3104
Flammpunkt [°C]	55		55		ISO 2719
C.F.P.P. [°C]		0 / -20 ^{*)}		-5	EN 116
Schwefelgehalt [mg/kg]		10		10	ISO 20884/ ISO 14596
Koksrückstand [% (m/m)]		0,3		0,2	ISO 10370
Aschegehalt [% (m/m)]		0,01		0,01	EN-ISO 6245
Cetanzahl [-]	51		52	54	EN ISO 5165
Cetanindex [-]	46				EN ISO 4264
Wassergehalt [mg/kg]		200		200	EN-ISO 12937
Gesamtverschmutzung [mg/kg]		24			EN ISO 12662
Kupfer Korrosion [Korr.Grad]		1		1	ISO 2160
Oxidationsstabilität [g/m ³]		20		25	EN-ISO 12205
H.F.R.R. [µm]		460		400	EN ISO 12156-1/ CEC F-06-A-96
PAK [% (m/m)]		8,0	3,0	6,0	EN 12916
Destillationsverlauf Volumen bei 250 °C [% (V/V)] Volumen bei 350 °C [% (V/V)]	85	65			EN ISO 3405
Destillationsverlauf 50 %-Punkt [°C] 95 %-Punkt [°C] Endpunkt [°C]		360	245 345	350 370	ISO 3405
FAME-Gehalt [% (V/V)]		7		0	EN 14078
Neutralisationszahl [mgKOH/g]				0,02	EN ISO 3405

In den letzten Jahrzehnten ist besonders die Absenkung des Schwefelgehalts zu erwähnen. Er ist durch den Einsatz von Entschwefelungsanlagen von über 0,25 % im Jahr 1985 auf unter 10 ppm gesunken (Abbildung 1). Damit war eine Reduzierung der Partikelemissionen verbunden (Garing et al. 1997, Bello et al., 2000 und Lapuerta et al., 2003). Zudem können bei den geringen Schwefelgehalten in Kraftfahrzeugen Katalysatoren eingesetzt werden, da sie nicht mehr durch Schwefel im Kraftstoff vergiftet werden.

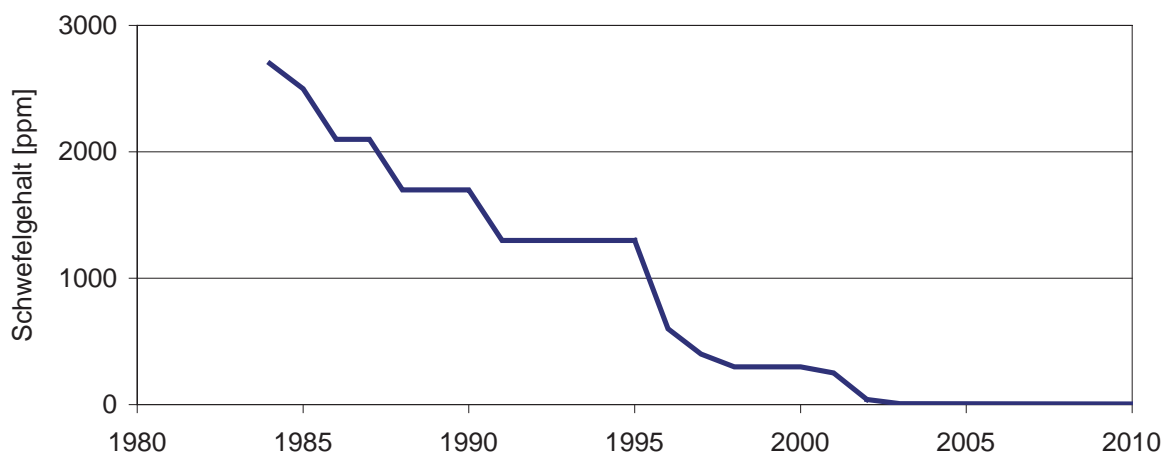


Abbildung 1: Entwicklung der Schwefelgehalts in (West-)Deutschland im Dieseldieselkraftstoff (Daten nach IFEU, 2011)

Zudem wurde durch die DIN EN 590 der maximale Gehalt an polyaromatischen Verbindungen im Jahr 2000 auf 11 % und im Jahr 2010 weiter auf 8 % begrenzt und die Cetanzahl im Jahr 2000 auf mindestens 51 festgelegt (Greim et al., 2003, DIN EN 590, 2010).

Biogene Kraftstoffe

Bei den biogenen Kraftstoffen ist Pflanzenölmethylester (Biodiesel) als Ersatz für Dieseldieselkraftstoff am verbreitetsten. Pflanzenölmethylester wurden zuerst in einem belgischen Patent 1937 erwähnt (Chavanne, 1937) und 1938 in einem Linienbus zwischen Leuven und Brüssel eingesetzt (Chavanne, 1944). Als Folge des günstigen und leicht verfügbaren Erdöls wurde nach 1950 nur noch selten über Pflanzenöle und Pflanzenölmethylester als Kraftstoff berichtet. Die Auswirkungen der zweiten Ölkrise Ende 1978/1979 führten zu einer Wiederaufnahme der Forschung auf dem Gebiet der biogenen Kraftstoffe (Batel et al., 1980). So wurde die Tauglichkeit von Rapsölmethylester als Dieseldieselkraftstoffsubstitut erwiesen (Vellguth, 1983) und 1985 wurde die erste Produktionsanlage für Biodiesel in Österreich in Betrieb genommen. Da Biodiesel die Abhängigkeit von Erdölimporten vermindern helfen sollte, wurde es in Deutschland, Österreich und vielen weiteren Ländern steuerlich begünstigt (Bensmann, 2005). Aber erst mit steigendem Rohölpreis wurde ab 2000 auch die Nutzung von Biodiesel finanziell interessanter. Insbesondere auf dem Nutzfahrzeugsegment wurde auf Biodieseltauglichkeit geachtet. Bei den Personenkraftwagen war vor allem der Volkswagen-Konzern Wegbereiter, der für die meisten seiner Dieselfahrzeuge der Produktionsjahre von 1996 bis 2004 eine generelle Freigabe für Biodiesel erteilte.

2003 wurde die Norm für Biodiesel (EN 14214: Fettsäuremethylester FAME für Dieselmotoren) vom Europäischen Komitee für Normung festgelegt. Diese Norm ist aus der deutschen Norm DIN 51606 hervorgegangen und entspricht in etwa einem Biodiesel, der aus Rapsöl hergestellt wurde. Biodiesel, der aus Soja- oder Palmöl hergestellt wurde, kann die Norm EN 14214 hingegen nicht erfüllen, da Sojaölmethylester eine zu hohe Jodzahl aufweist und Palmölmethylester die Anforderungen an die Kältefestigkeit nicht erfüllt.

Unter diesen Rahmenbedingungen stiegen seit Ende der 1990iger Jahre die europäischen Produktionskapazitäten und insbesondere der deutsche Verbrauch von Biodiesel stark an (Abbildung 2). Ab 2006 wurde in Deutschland auf Biodiesel eine Energiesteuer erhoben, die sich schrittweise von 9 Euro-Cent in 2006 auf 45 Euro-Cent ab 2013 erhöhen sollte (Ufop 2009). 2009 wurde die stufenweise Erhöhung vom Gesetzgeber (Deutscher Bundestag, 2011) für die Jahre bis 2012 ausgesetzt, jedoch der Steuersatz ab 2013 gegenüber der Planung von 2006 nicht verringert (Abbildung 3). Damit wurde reiner Biodiesel ab 2009 aus finanzieller Sicht für den Verbraucher unattraktiv.

Gleichzeitig wurde jedoch mit dem Biokraftstoffquotengesetz (Deutscher Bundestag, 2006) eine Zumischquote für Biodiesel zum normalen Dieselkraftstoff eingeführt. Demnach müssen bezogen auf den Energiegehalt ab 2007 4,4 %, ab 2009 5,25 % und ab 2010 6,25 % Biodiesel dem Dieselkraftstoff zugemischt werden. Durch diese Quote blieb der Absatz von Biodiesel in den Jahren 2008 bis 2011 stabil (Abbildung 2).

In den 1990iger Jahren wurde der Kraftstoff zunächst nur an wenigen, insbesondere freien Tankstellen angeboten. Bis 2008 stieg die Zahl der Tankstellen, die Biodiesel anboten, auf über 1900 an. Durch die steigende Besteuerung von Biodiesel ging die Anzahl der Tankstellen im Folgejahr auf 250 zurück. Daneben wurde der Kraftstoff noch über nicht öffentliche Tankstellen zum Beispiel bei Speditionen und auf landwirtschaftlichen Betrieben verwendet. Biodiesel hat hier den Vorteil, dass aufgrund seiner geringeren Wassergefährdungsklasse die behördlichen Auflagen geringer sind.

Insbesondere im Individualverkehr kann nicht sichergestellt werden, dass ein Fahrzeug mit Herstellerfreigabe für RME nur mit reinem Biodiesel betankt wird. Die Fahrzeugführer entscheiden sich je nach Preis und Verfügbarkeit für Biodiesel oder den konventionellen Dieselkraftstoff. Auch bei Fahrzeugflotten kann eine reine Betankung mit Biodiesel als Reinkraftstoff nicht zu 100 % sichergestellt werden. Bei großen Entfernungen von der zentralen Tankstelle muss meist konventioneller Dieselkraftstoff zwischengetankt werden.

Damit vermischen sich Biodiesel und Dieselkraftstoff im Tank und Blends mit unterschiedlichem Biodieselanteil entstehen.

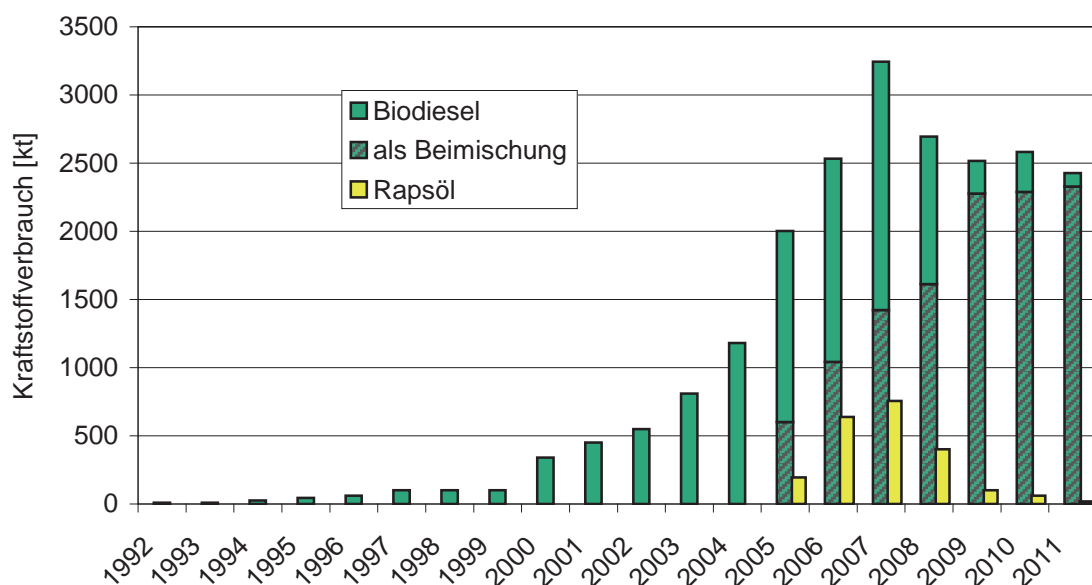


Abbildung 2: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von Biodiesel und Pflanzenöl in Deutschland (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2011a)

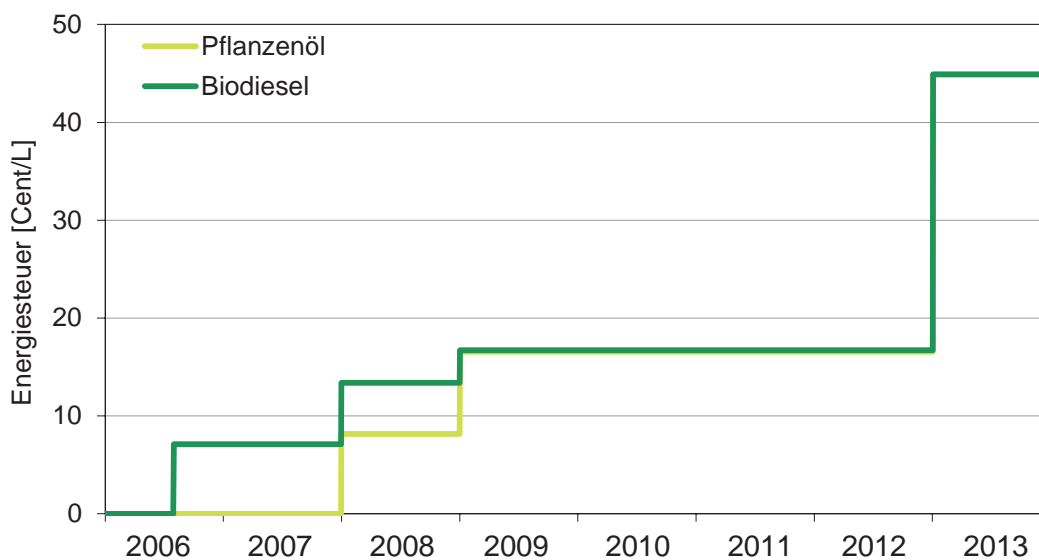


Abbildung 3: Entwicklung der Energiesteuer von Biodiesel und Pflanzenöl in Deutschland (Deutscher Bundestag, 2011)

Parallel zur Entwicklung des Biodiesels wurde auch reines Pflanzenöl als Kraftstoff erprobt (Vellguth, 1988, Bouche et al., 1997 und Remmele et al., 2007). Insbesondere durch die hohe Viskosität – laut DIN-Norm bei 40 °C maximal 36 mm²/s gegenüber 5 mm²/s bei Biodiesel – und den schlechten Kälteeigenschaften ist es jedoch notwendig, die jeweiligen Motoren auf

den Pflanzenölkraftstoff umzurüsten. Die Umrüstung beschränkte sich zum Großteil auf den Einsatz anderer Kraftstofffilter, um der höheren Viskosität Rechnung zu tragen, und einigen technischen Ansätzen, um das Kaltstartverhalten zu verbessern. Hier wurde entweder ein Zweitanksystem eingesetzt, das beim Start und Abschalten des Motors Dieselkraftstoff verwendet, oder eine Vorheizung des Kraftstoffs realisiert. Der Motor und seine Ansteuerung blieben jedoch bei vielen dieser Lösungen unverändert. Für einen wirtschaftlichen Motorbetrieb mit Pflanzenöl müssten die durch die Umrüstung entstehenden Kosten durch Einsparungen bei der Kraftstoffbeschaffung wieder kompensiert werden.

Ab 2005 wurde reines Rapsöl als Kraftstoff in Deutschland im größeren Umfang verkauft und der Absatz erreichte 2007 ein Maximum. Da aber auch hier wie schon beim Biodiesel eine Energiesteuer eingeführt wurde, nahm der Absatz in Folge deutlich ab und ist heute in Deutschland zu vernachlässigen.

2011 wurden deutschlandweit 2426 kt Biodiesel verkauft. Damit ergibt sich bei einem Verbrauch an Dieselkraftstoffen (einschließlich Biodiesel und Pflanzenöl) von 32,128 Mt ein Anteil von 7,3 % des Dieselkraftstoffverbrauchs (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2011b).

Dieser Anteil kann nicht aus einheimischem Ölpflanzenanbau (vorrangig Winterraps) gedeckt werden. So wurden 2011 in Deutschland 5610 kt Pflanzenöle verbraucht (OVID, 2012). Dagegen steht eine Erntemenge von ca. 3,9 Mt Rapssaat, die bei einem durchschnittlichen Ölgehalt von 40 % ca. 1560 kt Pflanzenöl entspricht (BMELV, 2012a). Dabei ist zu beachten, dass die durchschnittliche Erntemenge pro Hektar 2011 um ein Viertel niedriger lag als in den Vorjahren. 2010 waren 2711 kt der in Deutschland verbrauchten 6092 kt Pflanzenöl inländischer Herkunft. Dabei wurden 1358 kt als Nahrungsmittel, 432 kt als Tierfutter und 4302 kt für technische Zwecke verbraucht (BMELV, 2012b). Zu den technischen Verwendungen zählen neben der Produktion von Biodiesel (2581 kt) die Verwendung der Pflanzenöle als Schmierstoffe und der Einsatz in der chemischen Industrie als Grundstoff für die Tensid- und Polymerherstellung.

Bei der Einführung von Biodiesel in den 1990iger Jahren konnte noch darauf verwiesen werden, dass der vermehrte Anbau von Raps in Deutschland vor allem auf Stilllegungsflächen erfolgte. Dadurch ergaben sich für die Volkswirtschaft durch die Einsparung von Stilllegungsprämien als auch durch die Sicherung von Arbeitsplätzen Vorteile. Mittlerweile stehen sowohl Biodiesel als auch reines Pflanzenöl weltweit in Konkurrenz zum Anbau von

Nahrungsmitteln und anderen Energiepflanzen. 2011/2012 wurden weltweit 13,4 % (24,5 Mt) des Pflanzenölverbrauchs von 183 Mt für Biokraftstoffe eingesetzt (Mielke, 2012)

Aufgrund steigender Nahrungsmittelpreise ergibt sich in der Öffentlichkeit eine vermehrte Diskussion, ob Nahrungsmittel als Rohstoff eingesetzt werden dürfen (Unesco ,2008, Braig, 2012, Schuh, 2012a, Schuh, 2012b). Auch wenn die Biokraftstoffherstellung nicht Auslöser starker Preissteigerungen auf dem Nahrungsmittelmarkt ist (Trechow, 2012), wird im Zuge dieser „Teller-Tank-Diskussion“ gefordert, die Produktion von Biotreibstoffen zu begrenzen.

In Folge der Diskussion um die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln werden nicht essbare Pflanzenöle wie das Jatrophäöl erwogen. Die Jatropha-Pflanze wächst auch in ariden Gebieten auf wenig fruchtbaren Böden. Die anfängliche Euphorie über diese Pflanze hat sich jedoch gelegt. Bei mehreren staatlich geförderten Projekten zeigte sich, dass die Pflanze auf Böden, die nicht zur Nahrungsmittelproduktion verwendet werden, nur unzureichende Erträge erbringt (Kent und Wu, 2011).

Eine weitere Möglichkeit der Konkurrenz zu Nahrungsmitteln auszuweichen ist die Produktion von Biomass-to-Liquid- (BtL-) Kraftstoffen. Dabei wird Biomasse – z.B. aus Durchforstungsholz, Grünschnitt oder Kurzumbruchplantagen – durch Pyrolyse zu Synthesegas und dieses mittels Fischer-Tropsch-Reaktion zu Kraftstoff umgewandelt. Dieser besteht wie bei den verwandten Gas-to-Liquid- und Coal-to-Liquid-Kraftstoffen aus Alkanen und kann als sehr reiner Kraftstoff angesehen werden.

Im deutschsprachigen Raum wurden Produktionsanlagen für BtL im Labor und bzw. Pilotmaßstab an der TU Wien, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), beim Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC) und bei Choren Industries betrieben. Von Choren wurde auch eine Anlage im Industriemaßstab errichtet. Beim Anfahren und Betrieb der Anlage traten jedoch so viele technische Probleme auf, dass die Produktion nicht aufgenommen werden konnte und Choren Insolvenz anmelden musste (taz, 2011, Wikipedia, 2012).

Ein weiterer biogener Kraftstoff ist Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), das die Firma Neste Oil unter dem Namen NExBTL seit 2007 produziert. Dieser Kraftstoff ist ebenso wie die Fischer-Tropsch Kraftstoffe ein sehr reiner Kraftstoff, der aromaten- und schwefelfrei ist und vor allem aus Alkanen besteht (Neste Oil, 2012). Allerdings wird auch er aus Pflanzenölen gewonnen, wodurch er in Rohstoffkonkurrenz zur Biodiesel- und Nahrungsmittelproduktion steht.