

Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik

**Hendrik Stein
Axel Munack
Myriam Dutz**

**Jürgen Krahl
Olaf Schröder**

**Emissionsvergleich von Biodiesel mit schwedischem
Dieselkraftstoff MK 1**

Manuskript, zu finden in www.fal.de

Published in: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 239,
pp. 107-114

**Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2003**

Emissionsvergleich von Biodiesel mit schwedischem Dieselkraftstoff MK 1

Hendrik Stein¹, Jürgen Krahl^{1,2}, Axel Munack¹, Olaf Schröder¹, Myriam Dutz¹

Kurzfassung

Parallel zur zunehmenden Verbreitung von Dieselmotoren entwickelte sich in der jüngeren Vergangenheit ein wachsender Einsatz neuer Kraftstoffe wie zum Beispiel Rapsölmethylester (RME), der unter der Bezeichnung Biodiesel mittlerweile an über 1300 Tankstellen in Deutschland erhältlich ist. Im Jahre 2001 wurden mehr als 500.000 Tonnen dieses Kraftstoffes produziert und für das laufende Jahr 2002 werden sogar mehr als 600.000 Tonnen erwartet. Im Zuge dessen ist es natürlich auch von großer Bedeutung, wie das Emissionsverhalten des alternativen Kraftstoffes im Gegensatz zu am Markt befindlichen Dieselkraftstoffen aussieht.

In der vorliegenden Untersuchung werden, neben Rapsölmethylester, schwedischer Dieselkraftstoff MK 1 und herkömmlicher Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 590 betrachtet. Dabei werden sowohl gesetzlich limitierte und nicht limitierte Abgaskomponenten bestimmt. Zur Durchführung der Experimente stand ein moderner Dieselmotor mit Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem zur Verfügung.

Schlüsselworte: Biodiesel, Dieselkraftstoff, schwedischer Dieselkraftstoff mit geringem Schwefelgehalt (MK 1), Abgasemissionen, Partikelanzahlverteilungen, Benzol, Ozonvorläufer, RME

1 Einleitung

Dieselmotoren werden in Deutschland immer beliebter. 2001 betrug ihr Anteil an den insgesamt neu zugelassenen Pkw in der Bundesrepublik Deutschland bereits 33 %. Ende der achtziger Jahre lag er noch bei 7 % und erreichte Mitte der neunziger einen Wert von 13 % (Statistik Kraftfahrtbundesamt, 2002). Prognosen der Deutschen Shell gehen davon aus, dass sich diese steigende Entwicklung weiter fortsetzt (Shell, 2001). Im Wesentlichen sind für diesen Trend das günstige Verbrauchsverhalten der Aggregate und die stark gestiegenen Kraftstoffpreise an den Tankstellen verantwortlich. Mit der zunehmenden Verbreitung des Dieselmotors geht die zunehmend steigende Produktion des Nischenkraftstoffes Rapsölmethylester (RME) einher, der in Deutschland unter dem Namen Biodiesel angeboten wird. Allein im Jahre 2001 wurden in Deutschland mehr als 500.000 Tonnen RME an über 1.300 Tankstellen verkauft. Für das Jahr 2002 wird sogar von einer Steigerung auf über 600.000 Tonnen ausgegangen (Bockey, 2002).

Neben Untersuchungen zur technischen Eignung von Biodiesel in herkömmlichen Motoren ist es ebenso erforderlich, die dabei anfallenden Abgasemissionen im Vergleich zu konventionellem Kraftstoff zu berücksichtigen. Hierzu zählen sowohl die vom Gesetzgeber limitierten Komponenten Kohlenmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x), Partikelmasse (PM) und die Schwärzungszahl nach Bosch (SZ), als auch nicht limitierte Bestandteile des Abgases, wie Aldehyde und Ketone, Aromaten und Alkane sowie Alkene beziehungsweise Ethin.

Zu Beginn des Jahres 2001 gingen die Ergebnisse einer Studie der Chalmers Universität Göteborg durch die Presse, in der über bis zu zehnfach höhere Emissionen an Benzol und Ozonvorläufersubstanzen für Biodiesel im Vergleich zu schwedischem Dieselkraftstoff (MK 1) berichtet wurde (Pedersen et al., 1999). Die Arbeitsgruppe um Professor Olsson benutzte für ihre Untersuchungen einen selbstkonstruierten Rohrreaktor, der auf 550°C temperiert und mit einem konstanten Luftstrom durchspült wurde. Die aus dem Reaktor entweichenden Abgase wurden einer direkten GC/MS-Messung unterzogen und ausgewertet. Dabei kam es zu den oben geschilderten Ergebnissen. Abschließend wurde das Fazit gezogen, dass die Nach-

¹ Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

² Fachhochschule Coburg, Friedrich-Streib-Str. 2, D-96450 Coburg

teile erneuerbarer Produkte in Forschung und Entwicklung bisher vernachlässigt worden seien und dass deren Vorteile durch die Befürworter stark in den Vordergrund gedrängt würden, um eine schnelle und subventionierte Markteinführung zu erreichen. Daraufhin erhob sich unter zahlreichen Wissenschaftlern in Europa und den USA eine Diskussion, die die Übertragbarkeit der Pyrolyseversuche auf die motorische Verbrennung anzweifelte. Leider gab es zum damaligen Zeitpunkt noch keine motorischen Vergleichsmessungen zwischen Biodiesel und schwedischem Dieseldieselkraftstoff MK 1, die zur datenbasierten Aufklärung hätten beitragen können. Als Folge aus dem Mangel an entsprechenden Abgasuntersuchungen wurde in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V. (AGQM) am Institut für Technologie und Biosystemtechnik eine Versuchsreihe mit schwedischem Dieseldieselkraftstoff, herkömmlichem Dieseldieselkraftstoff gemäß DIN EN 590 und Biodiesel gemäß E DIN 51606 gestartet. Ziel der Versuche war eine möglichst umfangreiche Analyse der limitierten und nicht limitierten Emissionen.

2 Material und Methoden

2.1 Motor und Motortestbedingungen

Die Untersuchungen erfolgten am Emissionsprüfstand des Institutes für Technologie und Biosystemtechnik. Dort steht ein moderner Mercedes Benz Motor OM 904 LA mit Abgasturbolader und Ladeluftkühlung zur Verfügung (Tabelle 1).

Tabelle 1:
Technische Daten des Mercedes Benz OM 904 LA

Zylinderhub	130 mm
Zylinderbohrung	102 mm
Anzahl Zylinder	4
Hubvolumen	4250 cm ³
Nenn Drehzahl	2300 min ⁻¹
Nennleistung	125 kW
Maximales Drehmoment	635 Nm bei 1380 min ⁻¹
Verdichtung	17,4

Der Vierzylindermotor hat 125 kW Nennleistung und arbeitet mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem. In der Praxis wird das Aggregat am häufigsten in der ATEGO-Lkw-Serie von DaimlerChrysler eingebaut. Gekoppelt an eine Wirbelstrombremse können gewünschte Lastpunkte am Motor eingestellt werden. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden aus dem europäischen 13-Stufentest (ECE R49) vier Betriebspunkte dargestellt.

wählt. Diese erlauben zwar keine Extrapolation auf den gesamten Test, aber sie sind geeignet, eine Einschätzung der Ergebnisse der Chalmers Universität vorzunehmen. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau des Emissionsprüfstandes und in Abbildung 2 sind die untersuchten Betriebspunkte dargestellt.

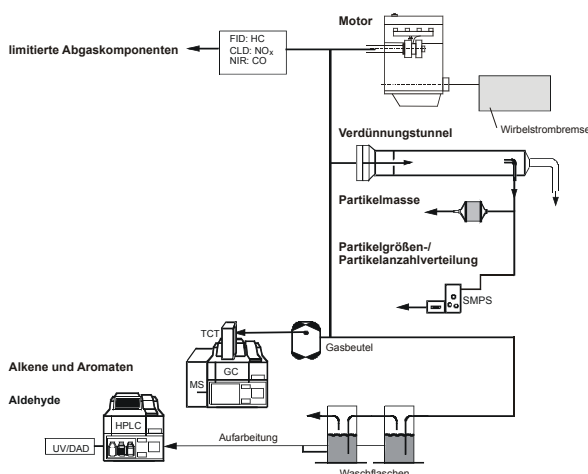


Abbildung 1:
Schematischer Aufbau des Emissionsprüfstandes am Institut für Technologie und Biosystemtechnik

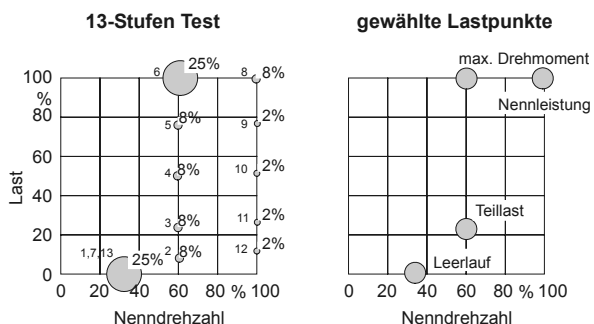


Abbildung 2:
13-Stufentest nach ECE R49 und die daraus ausgewählten Betriebspunkte

2.2 Analysemethoden und Kraftstoffeigenschaften

Die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile CO, HC und NO_x werden durch herkömmliche Gasanalytoren bestimmt. Die Probenahme zur Partikelmassebestimmung erfolgt an einem Abgasteilstromverdünnungstunnel. Partikel werden auf einem zweistufigen Filter gesammelt. Bei den Filtern handelt es sich um PTFE beschichtete Glasfaserfilter (T60A20, Pallflex Products Corp.), deren gravimetrische Analyse per Mikrogrammwaage erfolgt (Sartorius M5P, ± 5µg Genauigkeit). Die Bestimmung der Partikelanzahlverteilung wird an der gleichen Stelle von einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) System der Firma TSI übernommen (Bischof und Horn, 1999).

Bei den nicht limitierten Emissionen werden Alkane, Alkene und Ethin sowie aromatische Kohlenwasserstoffe via GC/MS (Shimadzu Typ GC 17A und QP 5000) mit Thermodesorption und Kryofokussierung (Chrompack CP 2040) bestimmt (Krahl et al., 2001). Zum Nachweis der Aldehyd- und Ketonemissionen wird die 2,4 Dinitrophenylhydrazon (DNPH) Methode verwendet (Krahl et al., 1992).

Tabelle 2 (siehe Anhang) zeigt die Ergebnisse der Kraftstoffanalysen. RME wurde von der Oelmühle Leer Connemann zur Verfügung gestellt. Dieseldieselkraftstoff gemäß DIN EN 590 wurde von der Firma Louis Dreyfus & Cie Mineralöl GmbH, Hannover und MK 1 von Agrol, Stockholm, Schweden bezogen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Limitierte Abgasbestandteile

In den Abbildungen 3 bis 6 sind die Ergebnisse für die Emissionen an Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenwasserstoffen, Stickoxiden und Partikelmassen bei den vier ausgewählten Betriebspunkten dargestellt.

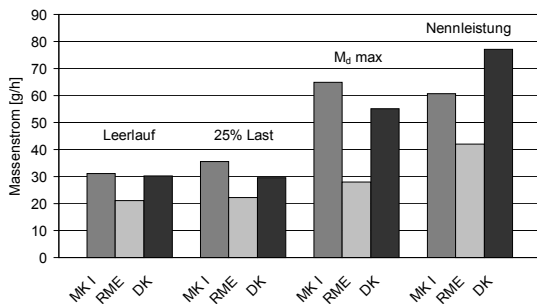


Abbildung 3: CO-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

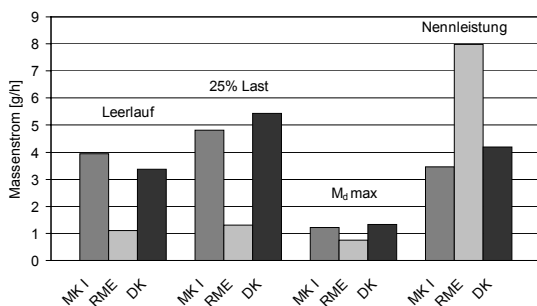


Abbildung 4: HC-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

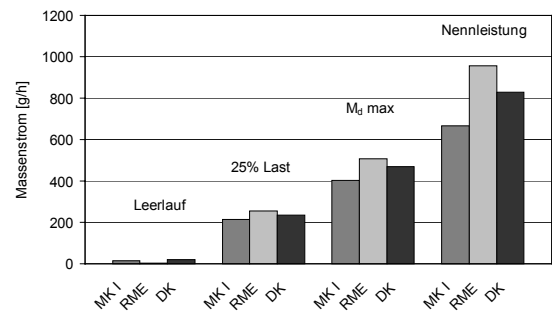


Abbildung 5: NO_x-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

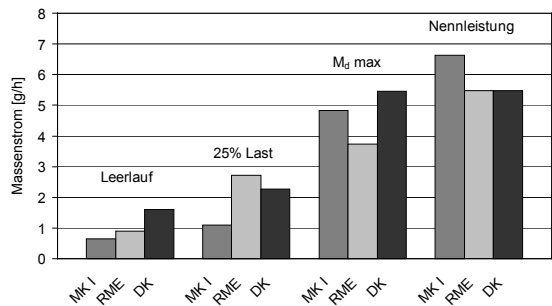


Abbildung 6: PM-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

Obwohl diese Einzelergebnisse keinen Rückschluss auf das Gesamtergebnis des 13-Stufentests erlauben, wird dennoch deutlich, dass sich keine signifikanten Unterschiede zwischen konventionellem Dieseldieselkraftstoff und schwedischem Diesel ergeben. Lediglich bei den Stickoxidemissionen sind leichte Vorteile für MK 1 gegenüber DK und RME erkennbar.

Biodiesel emittiert in allen vier ausgewählten Testpunkten am wenigsten Kohlenmonoxid und zeigt für die Stickoxide - abgesehen vom Leerlauf - ein umgekehrtes Verhalten. Im Hinblick auf den Gesamtkohlenwasserstoffausstoß unterschreitet RME für Leerlauf, 25% Last und maximales Drehmoment (M_d max) jeweils die Emissionen der fossilen Kraftstoffe. Nur bei Nennleistung kommt es zu einer deutlichen Anhebung auf ungefähr den doppelten Wert wie für DK und MK 1. Bei den ermittelten Partikelmassenströmen lassen sich keine einheitlichen Tendenzen herausarbeiten. Die Partikelemissionen bewegen sich hierbei in relativ kleinen Schwankungsbreiten für die drei Kraftstoffe.

3.2 Nicht limitierte Abgasbestandteile

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Partikelanzahlverteilung im Bereich zwischen 10 und 300 nm für die drei Dieselkraftstoffe sind in den Abbildungen 7 bis 10 wiedergegeben.

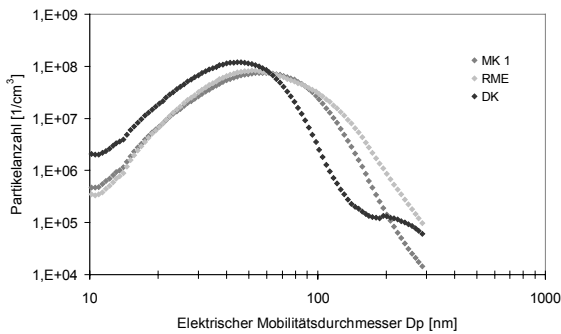


Abbildung 7:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei Leerlauf

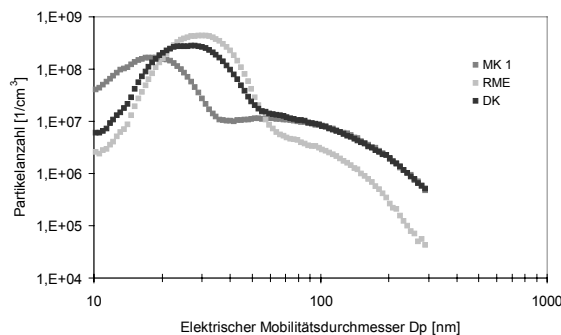


Abbildung 8:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei 25% Last

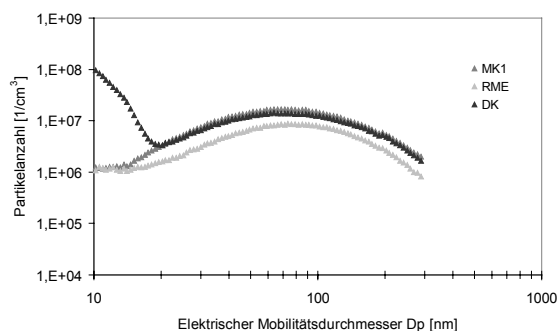


Abbildung 9:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei maximalem Drehmoment

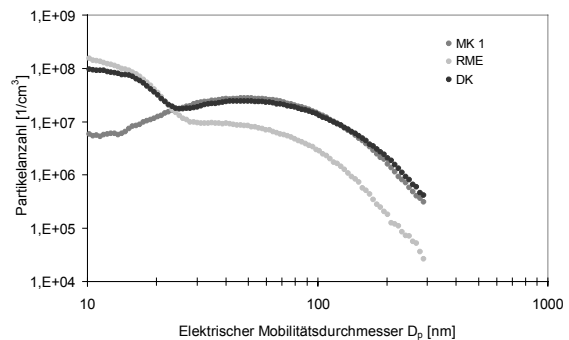


Abbildung 10:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei Nennleistung

Auch für die SMPS-Ergebnisse ergeben sich für MK 1 keine hervorstechenden Partikelanzahlreduktionen gegenüber konventionellem Dieselkraftstoff oder Biodiesel. Im Leerlauf verhalten sich alle drei Kraftstoffe sehr ähnlich zueinander und emittieren die meisten Partikel zwischen 40 und 60 nm elektrischen Mobilitätsdurchmessers. Ab 70 nm unterschreitet DK sogar den Verlauf der Verteilungen für RME und MK 1.

Im Teillastpunkt 25% Last werden viele Kleinstpartikel im Bereich zwischen 10 und 50 nm gezählt. Während RME und DK ein Maximum bei 30 nm Durchmesser erreichen, ist dieser Punkt für MK 1 in Richtung noch kleinerer Partikel verschoben. Hierbei liegt das Maximum bei etwa 20 nm. Ab 50 nm sind die Verläufe der fossilen Kraftstoffe fast deckungsgleich und RME führt zu einer erkennbaren Reduktion der Partikelanzahlen.

Im Betriebspunkt M_d max zeigt sich wiederum ein sehr einheitliches Bild der SMPS-Messungen, wobei Biodiesel die Kurven von MK 1 und DK permanent unterschreitet. Allerdings kommt es für DK zu einem signifikanten Anstieg der Kleinstpartikel zwischen 10 und 20 nm.

Ein ähnlich steiler Anstieg der Partikel zwischen 10 und 20 nm wird für RME und DK bei Nennleistung detektiert. Er verläuft für die beiden Kraftstoffe fast parallel. MK 1 emittiert in diesem Bereich erkennbar weniger ultrafeine Partikel. Ab ca. 25 nm unterschreitet allerdings Biodiesel wieder über den gesamten Messbereich bis 300 nm die Verlaufskurven von MK 1 und DK, die nahezu kongruent sind.

In den Abbildungen 11 bis 13 sind die Ergebnisse für Alkane, Alkene und Ethin, für aromatische Kohlenwasserstoffe und für Aldehyde und Ketone dargestellt.

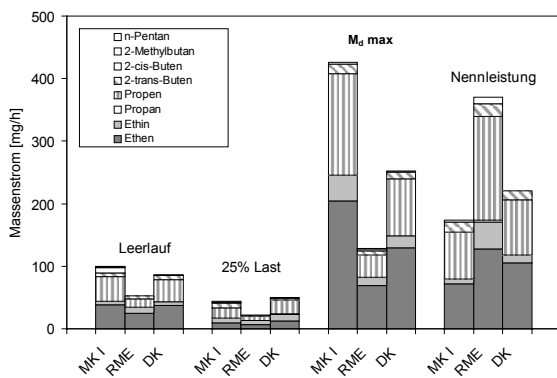


Abbildung 11: Emissionen der Alkane, Alkene und Ethin für MK 1, RME und im Leerlauf beziehungsweise bei Nennleistung nimmt RME eine Mittelposition zwischen MK 1 und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

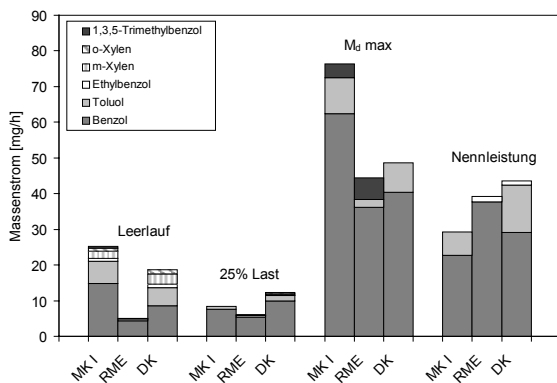


Abbildung 12: Emissionen der aromatischen Kohlenwasserstoffe für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

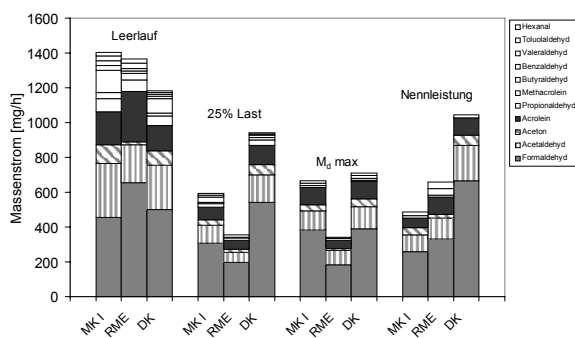


Abbildung 13: Emissionen der Aldehyde und Ketone für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

In den Betriebspunkten Leerlauf, 25% Last und M_d max ist für RME eine Absenkung der untersuchten aliphatischen Kohlenwasserstoffemissionen feststellbar. Im Gegensatz dazu resultiert bei Nennleistung fast eine Verdopplung der Emissionen im Vergleich

zu MK 1 und DK. Bei den aromatischen Kohlenwasserstoffen führt der Einsatz von RME zu einer Absenkung in den drei zuerst abgebildeten Betriebspunkten aber darüber hinaus auch bei Nennleistung im Vergleich zum konventionellen DK. MK 1 zeigt für M_d max in den beiden Darstellungen 11 und 12 eine signifikante Steigerung des jeweiligen Schadstoffausstoßes und wird dabei von DK aber insbesondere von RME weit unterschritten. Generell zeichnen sich für RME leichte Vorteile gegenüber den fossilen Kraftstoffen ab. Das gleiche gilt für die Betrachtung der Aldehyd- und Ketonemissionen. Für Teillast (25%) und maximales Drehmoment ergeben sich klare Emissionsminderungen durch den Einsatz von RME und im Leerlauf beziehungsweise bei Nennleistung nimmt RME eine Mittelposition zwischen MK 1 und DK ein.

Die in den Abbildungen 11 bis 13 aufgeführten Schadstoffe zählen zu den sogenannten Ozonvorläufersubstanzen, die für die Bildung von bodennahem Ozon mitverantwortlich sind, wobei die Aromaten eine eher untergeordnete Rolle spielen. Eine Abschätzung ihres Ozonbildungspotenzials kann auf der Grundlage von Daten von Carter geschehen (Carter, 2000). An dieser Stelle wird aufgrund des unvollständigen 13-Stufentests auf eine Berechnung der Potenziale verzichtet. Dennoch ist auf der Basis der vier ausgewählten Betriebspunkte nicht davon auszugehen, dass Biodiesel zu einer zehnfach höheren Emission von Ozonvorläufersubstanzen führt. Ebenso wenig ist es möglich eine Erhöhung des krebserregenden Potenzials von Biodieselabgas, zum Beispiel anhand der Benzolemissionen, nachzuweisen.

4 Zusammenfassung und Diskussion

In einer Studie der schwedischen Chalmers Universität wurden bei Pyrolyseexperimenten große Nachteile im Abgasverhalten von Biodiesel im Vergleich zu schwedischem MK 1 nachgewiesen. Daraufhin erfolgten am Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Untersuchungen von drei unterschiedlichen Dieseldieselkraftstoffen hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens an einem modernen Dieselmotor. Neben schwedischem Dieseldieselkraftstoff (MK 1) und herkömmlichem Dieseldieselkraftstoff (DK) gemäß DIN EN 590 wurde Rapsölmethylester (RME) gemäß E DIN 51606 verwendet.

Sowohl hinsichtlich der gesetzlich limitierten als auch der nicht limitierten Schadstoffe lassen sich für Biodiesel leichte Vorteile im Emissionsverhalten feststellen. Des Weiteren kann keine Rede von einer Verzehnfachung der Emissionen durch den Einsatz von RME im Gegensatz zu MK 1 sein. Vielmehr wird die

Unzulässigkeit der Übertragung von Pyrolyseergebnissen auf die motorische Verbrennung dokumentiert.

5 Ausblick

Zur Zeit werden die drei Kraftstoffe auch noch in den vom 13-Stufentest fehlenden Betriebspunkten hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V. (AGQM) für die finanzielle Förderung der Untersuchungen.

Literatur

Bischof O, Horn H G (1999) Zwei Online-Messkonzepte zur physikalischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Motorabgas am Beispiel von Dieselemissionen. MTZ Motortechnische Zeitschrift 60(4):226-232

Bockey D (2002) Biodieselproduktion und Vermarktung in Deutschland – Situation und Perspektive. UFOP Biodieselbrochure

Carter W P L (2000) Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment. Final Report to California Air Resources Board Contract No. 92-329, and 95-308

Deutsche Shell (2001) [online] Presseinformation vom 10.09.2001 unter <http://www.shell.de>

Krahl J, Baum K, Hackbarth U, Jeberien H-E, Munack A, Schütt C, Schröder O, Walter N, Bünger J, Müller M M, Weigel A (2001) Gaseous Compounds, Ozone Precursors, Particle Number and Particle Size Distributions, and Mutagenic Effects Due to Biodiesel. Transactions of the ASAE 44(2):179-191

Krahl J, Vellguth G, Bahadir M (1992) Bestimmung der Schadstoffemissionen von landwirtschaftlichen Schleppern beim Betrieb mit Rapsölmethylester im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Landbauforschung Völkenrode 42(4):247-254

Pedersen J R, Ingemarsson A, Olsson J O (1999) Oxidation of Rapeseed Oil, Rapeseed Methyl Ester (RME) and Diesel Fuel Studied with GC/MS. Chemosphere 38 (11):2467-2474

Statistik des Kraftfahrtbundesamtes (2002) [online] unter <http://www.kba.de>

Anhang

Tabelle 2: Kraftstoffeigenschaften

Tabelle 2:
Kraftstoffeigenschaften

Biodiesel nach E DIN 51606	connediesel		Diesel nach DIN EN 590		Diesekraftstoff	Diesel MK 1 nach SS 15 54 35		Statoil® MK 1
Dichte (15°C) [g/mL]	0,875 - 0,900	0,883	Dichte (15°C) [kg/m³]	820 - 845	836,6	Dichte (15°C) [kg/m³]	805 - 820	813,6
kin. Viskosität (40°C) [mm²/s]	3,5 - 5,0	4,5	kin. Viskosität (40°C) [mm²/s]	2,00 – 4,50	2,807	kin. Viskosität (40°C) [mm²/s]	min. 1,7	1,892
Flammpunkt (PM) [°C]	min. 110	> 150	Flammpunkt [°C]	> 55	72,0	Flammpunkt [°C]	min. 60	60
C.F.P.P. [°C]	max. -20	-13	C.F.P.P. [°C]	max. 0	-8	C.F.P.P. [°C]	max. -32	< -35
Schwefel [mg/kg]	max. 100	< 10	Schwefel [Gew.-%]	max. 0,035	0,032	Schwefel [mg/kg]	10	2
Koksrückstand [Gew.-%]	max. 0,05	< 0,05	Koksrückstand [Gew.-%]	max. 0,30	< 0,05			
Cetanzahl	min. 49	> 55	Cetanzahl	min. 51	52,4			
Sulfatasche [Gew.-%]	max. 0,03	< 0,01	Oxidasche [Gew.-%]	max. 0,01	< 0,001			
Wassergehalt [mg/kg]	max. 300	252	Wassergehalt [mg/kg]	max. 200	66			
Gesamtverschmutzung [mg/kg]	max. 20	< 20	Gesamtverschmutzung [mg/kg]	max. 24	< 20			
Kupfer-Korrosion	max. 1	1	Kupfer Korrosion	1	1			
Oxidationsstabilität [h]		8,05	Oxidationsstabilität [mg/100 mL]	max. 2,5	< 2,0			

Neutralisationszahl [mg KOH/g]	max. 0,5	0,089	Neutralisationszahl [mg KOH/g]	max. 0,5	0,05	Aromatengehalt [Vol.-%]	max. 5	4,2
Methanol [Gew.-%]	max. 0,3	< 0,3	Polycyclische aromatische Kohlenwasser- stoffe [Gew.-%]	max. 11	6,2	Polycyclische aromatische Kohlenwasser- stoffe [Vol.-%]	max. 0,02	< 0,02
Monoglyceride [Gew.-%]	max. 0,8	< 0,8	Destillation bei 250°C [Vol.-%]	< 65	38,0	Destillationsbe- ginn [°C]	min. 180	180,6
Diglyceride [Gew.-%]	max. 0,4	< 0,4	Destillation bei 350°C [Vol.-%]	min. 85	93,0	Destillation (10%) [°C]		197,7
Triglyceride [Gew.-%]	max. 0,4	< 0,4	Destillation bei 360°C [Vol.-%]	min. 95	95,0	Destillation (50%) [°C]		229,9
freies Glycerin [Gew.-%]	max. 0,02	< 0,02	Cloudpoint [°C]	max. 5	-6	Destillation (90%) [°C]		272,8
Gesamtglycerin [Gew.-%]	max. 0,25	0,15	Cetanindex	min. 46,0	52,0	Destillation (95%) [°C]	max. 285	283,9
Iodzahl	max. 115	112	Schmierfähig- keit (60°C) [µm]	max. 460	450	Cloudpoint [°C]		< -35
Phosphorgehalt [mg/kg]	max. 10	5	Farbe		L 1,0	Cetanindex	min. 50	51,6
Alkaligehalt [mg/kg]	max. 5	< 5	Geruch		normal			
			äußere Beschaf- fenheit		*			
			pH-Wert		6,8			

* klar, frei von sichtbarem Wasser und festen Fremdstoffen