Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft

Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik

Axel Munack
Jürgen Krahl (Eds.)

Biodiesel - Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen

Beiträge zu der Fachtagung am 16./17. September 2002 in Braunschweig

Manuskript, zu finden in www.fal.de

Published as: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 239

Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2003

Sonderheft 239
Special Issue

FAL
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft

Landbauforschung
Völkenrode
FAL Agricultural Research

Biodiesel
- Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen -

herausgegeben von
Axel Munack und Jürgen Krahl

Beiträge zu der Fachtagung am 16./17. September 2002
in Braunschweig

Organisatoren:
Institut für Technologie und Biosystemtechnik der
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) und
Fachhochschule Coburg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort
A. Munack, J. Krahl *1*

Biodiesel: deutsche und europäische Perspektiven
J. Ohlhoff *3*

Potenziale von Kraftstoffen

Die künftige Verfügbarkeit von Erdöl – Chancen und Risiken
P. Kehrer *9*

Potenziale zukünftiger Kraftstoffe
R. R. Maly, W. Degen *15*

Stand- und Entwicklungspotenzial für die Produktion von Biodiesel –
Eine internationale Bestandsaufnahme
D. Bockey, W. Körbitz *17*

Volkswirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Herstellung von Rapsmethylester (RME) in Deutschland
M. Schöpe *25*

Biodiesel im Praxiseinsatz

The Speed of Sound and Bulk Modulus of Alkyl Esters and Their Blends with Diesel Fuel
M. E. Tat, J. H. Van Gerpen *33*

Einsatz von Biodiesel in Sportbooten auf dem Bodensee
K. Schreiner *39*

Erfahrungen mit Biodiesel aus gebrauchten Speiseölen in Österreich
M. Mittelbach *47*

Erfahrungsbericht aus dem „Demonstrationsvorhaben Biodiesel der Stadtwerke Neuwied GmbH“
R. Neiß *53*

Motorischer Entwicklungsbedarf und motorische Potenziale

Biodiesel im Zielkonflikt mit Anforderungen an den Dieselmotor
R. Dorenkamp, T. Garbe, G. Ohlendorf *57*

Biodiesel in modernen Nutzfahrzeugmotoren
J. Blaßnegger, S. Schlag *63*

Biodiesel und Partikelfilter
H. Tschöke, G. Braungarten *69*

Biodieselsensorik
A. Munack, J. Krahl, H. Speckmann *87*

Flottenversuch Biodiesel – Hintergründe und Konzeption
M. Bayer, J. Ullmann, W. Weippert *93*

Emissionen und Umweltwirkungen

Biodiesel (RME) aus der Sicht des Umweltbundesamtes
A. Ostermeier *97*

Ökobilanz von RME im Vergleich zu Rapsöl
S. O. Gärtner, G. A. Reinhardt *99*

Emissionsvergleich von Biodiesel mit schwedischem Dieselkraftstoff MK 1
H. Stein, J. Krahl, A. Munack, O. Schröder, M. Dutz, ... *107*

Partikelemissionen und Mutagenität von herkömmlichem Dieselkraftstoff, schwedischem Dieselkraftstoff MK 1 und Biodiesel
J. Bünger, J. Krahl, H. Stein, M. Müller *115*

Entwicklungspotenzial und Anforderungen an den Kraftstoff

Qualitätsmanagement Biodiesel - Maßnahmen zur Einhaltung der Kraftstoffgüte
J. Fischer *121*

Einfluss der Struktur von Fettsäurealkylestern auf die Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels
G. Knothe *123*

Stabilität von Biodiesel - biostab
H. Prankl *133*

Anhang

Adressen der Referenten

Vorwort

Im Zuge der internationalen Bestrebungen zu einer nachhaltigen Entwicklung gewinnen alternative Energieträger an Bedeutung. Aber nicht jede Form erneuerbarer oder regenerativer Energie eignet sich gleichermaßen zur weitflächigen Anwendung. Vor einer Empfehlung oder Einführung von Maßnahmen müssen die technische Eignung, die energetische Effizienz und die Umweltwirkungen geprüft und bewertet worden sein.

In der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) werden seit den 70er Jahren alternative Kraftstoffe untersucht. Schon bald zeichnete sich ab, dass Rapsölmethylester (RME oder allgemein Biodiesel) gut und energetisch effizient in herkömmlichen Dieselmotoren einsetzbar ist. Darüber hinaus ergaben Abgas- und Wirkungsanalysen überwiegend Vorteile für diesen alternativen Kraftstoff, der sich zudem auch durch seine CO_2-Bilanz positiv von fossilem Dieselkraftstoff (DK) unterscheidet.

Mit Blick auf die Agenda 21 ist festzustellen, dass in Deutschland bisher nur wenige regenerative Energieträger einen zumindest nennenswerten Anteil am Gesamtenergieaufkommen haben. Dazu zählt heute auf dem Sektor der flüssigen Energieträger lediglich Biodiesel, der allein in Deutschland mittlerweile an etwa 1500 Tankstellen erhältlich ist.

Physikalisch zeigen Biodiesel und DK zunächst Ähnlichkeiten, die die Nutzung von Biodiesel in handelsüblichen Dieselmotoren als DK-Substitut ermöglichen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die vergleichbare Viskosität und der Heizwert. Letzterer liegt bei Biodiesel jedoch immer um etwa 10 % niedriger. Allerdings sind auch Unterschiede bei beiden Kraftstoffen auffällig, wie z.B. die wesentlich heterogenere chemische Zusammensetzung von DK, die daraus resultierenden unterschiedlichen Siedelinien oder die verschiedenen Schwefel- und Phosphorgehalte.

Die gesetzlich beschlossenen und die zukünftig noch zu erwartenden Abgasgrenzwerte stellen weltweit eine große Herausforderung für die Motorenindustrie dar. Die aktuelle Diskussion um Kraftstoffqualitäten zeigt, dass das Ziel niedriger Emissionen nicht ausschließlich mehr nur durch motorische Verbesserungen erreicht werden kann. Vielmehr muss die Kraftstoffqualität den Anforderungen der motorischen Verbrennung und der Abgasnachbehandlung entsprechen. Dabei wird sich der Blick auch auf alternative Kraftstoffe wie Biodiesel fokussieren müssen, da es wissenschaftlich nicht ausreichend und sogar unzulässig ist, aus den überwiegend positiven Erfahrungen der Vergangenheit – die mit Motoren gemäß EU 3-Zertifizierung oder darunter gewonnen wurden – auf die uneingeschränkte Eignung von Biodiesel in aktuellen oder zukünftigen Motorgenerationen zu schließen.

Somit ist es wissenschaftlich offensichtlich, dass bei Biodiesel auch heute noch akuter Forschungsbedarf besteht, wenn seine Verwendung weiterhin geplant ist oder erwogen wird.

Wann immer sich also allgemein die Anforderungen an Motoren und herkömmliche Kraftstoffe ändern, besteht bei Alternativkraftstoffen ebenfalls Forschungsbedarf. Außerdem muss geprüft werden, ob unter geänderten Rahmenbedingungen eine althergebrachte Alternative nicht durch eine bessere zu substituieren ist.

Ziel der 2. Internationalen Tagung „Biodiesel – Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen“ war es, den aktuellen Stand von Forschung und Anwendung bei Biodiesel aufzunehmen und die zukünftige Entwicklung dieses Kraftstoffes und seines Einsatzes zu diskutieren. Politische Rahmenbedingungen, technische Entwicklung und biochemische sowie züchterische Arbeit werden die Weichen dafür stellen, in welchem Maße Biodiesel zukünftig zum Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland beitragen wird.

Im Ergebnis wurde deutlich, dass Biodiesel sicher eine Vorreiterrolle bei den Biokraftstoffen zukommt. Allerdings sind beim Biodiesel bis heute noch nicht alle technischen Probleme ausgeräumt, so dass insbesondere das Zusammenspiel von Motor und Kraftstoff noch einer genaueren Untersuchung bedarf.

Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass synthetische Kraftstoffe auf den Markt drängen werden. Dazu zählen insbesondere die Fischer-Tropsch-Kraftstoffe (FTK), die sowohl aus Erdgas als auch aus Biomasse gewonnen werden können. Ungeachtet einer energetischen Bilanzierung ist offensichtlich, dass diese Designerkraftstoffe erhebliche Potenziale bezüglich der Verfügbarkeit einerseits und der Optimierbarkeit auf die motorische Verbrennung andererseits in sich bergen.

Da insbesondere letzteres für den Biodiesel in geringerem Maße möglich ist als für FTK, besteht für Biodiesel die Gefahr, als Reinkraftstoff den zukünftig gestellten Anforderungen nicht mehr gerecht werden zu können.

Somit ist es also eine Kernaussage der Tagung, dass die Anpassung des Biodiesels an zukünftige Mo-

torgenerationen ein vordringliches Ziel darstellt. Dieses kann eventuell dadurch erreicht werden, dass bei FTK und Biodiesel synergistische Effekte herausgestellt und genutzt werden, die bis heute allerdings noch nicht Gegenstand der systematischen Forschung sind.

Diese Lücke zu schließen ist die zukünftige Herausforderung an die Motorenhersteller, die Mineralölindustrie, die Biodieselhersteller und die begleitende kraftstoffsystemtechnische Forschung. Die Landwirtschaft ist ebenfalls gefordert, ihre Möglichkeiten zur Rohstoffproduktion für zukünftige Kraftstoffe zu definieren und zu formulieren, um auch in der Zukunft ihren Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigen Mobilität zu leisten.

Axel Munack Jürgen Krahl

Biodiesel: deutsche und europäische Perspektiven

Jürgen Ohlhoff[1]

Die zweite internationale Tagung Biodiesel: Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen findet zu einem Zeitpunkt statt, an dem sich Markt und Rahmenbedingungen rasant verändern. Die deutsche Biodiesel-Produktionskapazität steht kurz vor der 1 Mill. t Grenze, Bundestag und Bundesrat haben eine deutliche Ausweitung der Steuerbefreiung für Biokraftstoffe beschlossen und EU-Regelungen zur Steuerermäßigung und Marktdurchdringung von Biokraftstoffen stehen kurz vor der Verabschiedung.

1. Entwicklung von Biodieselerzeugung und -markt

Die individuelle Mobilität ist ein wichtiger Grundpfeiler der modernen Gesellschaft. Gleichzeitig ruft diese Mobilität durch lokal und global wirksame Emissionen aus fossilen Quellen erhebliche Klima- und Umweltbelastungen hervor. Der weltweite Verbrauch an fossilen Kraftstoffen steigt stärker als die Weltbevölkerung, die absehbare beschleunigte Erschöpfung dieser Energiequellen geht mit einer hohen Emission an treibhaus- und ozonschichtwirksamen Abgasen der Verbrennung fossiler, nicht zuletzt flüssiger Energieträger in Verbrennungskraftmaschinen einher.

Gibt es eine Alternative? Ja!

Neben der Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln kann die Landwirtschaft mit der Erzeugung von Rohstoffen und Energie wieder die Funktionen übernehmen, die ihr seit ca. 100 Jahren mit der zunehmenden Nutzung fossiler Rohstoffe vorübergehend entzogen worden sind. Auf diese alten Funktionen kann spätestens dann nicht mehr verzichtet werden, wenn die fossilen Rohstoffquellen versiegen; sie sind jedoch schon heute wegen der Dringlichkeit einer Reduktion klimawirksamer Gasemissionen (CO_2 und ozonschichtrelevanten Emissionen) erforderlich.

Biomasse aus der Land- und Forstwirtschaft kann zukünftig, gemessen am Anteil der regenerativen Energieträger am Primärenergieaufkommen, die größte Bedeutung erlangen. Voraussetzung hierfür ist, dass dieser Energieträger ohne großen Energieaufwand und ohne Umweltbelastungen bei der Erzeugung (Anbau, Ernte) und Weiterverarbeitung (z. B. Verluste bei der thermischen Umwandlung) bereitgestellt werden kann. Weltweit speichert die jährlich heranwachsende Pflanzenmasse zehnmal mehr Sonnenenergie, als die Weltbevölkerung an Energie benötigt. Der Energiewert der Nahrungsmittel beträgt von dieser Gesamtenergiemenge nur ca. 1 %. Somit treten die neuen Funktionen der Landwirtschaft nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung.

Unter einer ganzen Reihe von Biotreibstoffen ist Biodiesel der einzige, der in Deutschland derzeit in nennenswertem Umfang genutzt wird, vor allem weil Biodiesel mit minimalen Anpassungsmaßnahmen in allen Dieselfahrzeugen eingesetzt werden kann.

Gleichwohl verlief die Marktentwicklung lange Jahre eher schleppend.

Erst 1997 überschritt der Absatz die 100.000 t Grenze, immer noch wenig angesichts eines Dieselverbrauchs von rundweg 27 Mio. t. Dafür war die Entwicklung in den vergangenen 3 Jahren stürmisch und für das laufende Jahr prognostiziert die UFOP einen Absatz von 550.000 t. Die Entwicklung der Produktionskapazitäten hält mit dem Absatz mehr als Schritt: Bis zum Jahresende 2002 wird ein Ausbau auf knapp 1 Mill. t erwartet.

Ermöglicht wurde dieser Boom durch mehrere Faktoren:

- Nichterhebung der Mineralölsteuer auf reine Biokraftstoffe
- Anstieg der Mineralölpreise
- Anstieg der Mineralöl- und Ökosteuer.

Als Status quo lässt sich festhalten:

- Nach langsamen Anlaufen hat der Biodieselmarkt in den letzten 3 Jahren deutlich an Dynamik gewonnen.
- Trotz dieser massiven Zuwachsraten entspricht der Biodieselabsatz weniger als 1 % des gesamten Kraftstoff- und gerade mal 2 % des Dieselabsatzes in Deutschland.
- Das weitere Erzeugungspotential für Biodiesel ist begrenzt. Würde der Ölsaatenanbau bis an die Fruchtfolgegrenzen in D ausgedehnt, könnte Biodiesel knapp 6 % des Dieselbedarfs oder etwa 2,5 % des Gesamttreibstoffbedarfs ersetzen.
- Viele Investitionen in Biodieselanlagen sind in erheblichem Umfang mit öffentlichen Mitteln unterstützt worden.
- Die Mehrzahl der Käufer tankt Biodiesel aufgrund des günstigeren Preises.
- Der Biodieselabsatz in der Landwirtschaft, die als Rohstofflieferant und aus Umweltgründen bei den

[1] Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Ref. 535, Postfach 140270, 53107 Bonn

Nutzern erste Wahl wäre, ist aufgrund steuerlicher Regelungen marginal.

2. Ziele der Bundesregierung im Bereich Biokraftstoffe

Eine nachhaltige Energieversorgung muss folgende drei Bereiche, die auch schon vor 10 Jahren in Rio als die drei Säulen einer nachhaltigen Entwicklung identifiziert wurden, ausreichend und ausgewogen berücksichtigen: Ökologie, Ökonomie und Sozialverträglichkeit.

Die aktuelle Situation im Verkehrsbereich entspricht nur bedingt diesen Anforderungen. Gegenwärtig werden in Deutschland jährlich ca. 60 Mill. t Otto- und Dieselkraftstoff verbraucht. Dadurch werden ca. 165 Mill. t/a fossilstämmiges Kohlendioxid freigesetzt. Im Gegensatz zu den Gesamtkohlendioxidemissionen war die Tendenz bei der Kohlendioxidemission im Verkehrsbereich in den letzten Jahren weiter steigend. Kraftstoffe werden nahezu vollständig aus Erdöl hergestellt. Verbunden mit der geringen Reichweite des europäischen Erdöls wird sich die strategische Abhängigkeit der Erdölproduktion von wenigen, politisch instabilen Ländern weiter verstärken. Zur Erhaltung der Mobilität und als Beitrag zum Klimaschutz ist es daher notwendig, die Kraftstoffversorgung generell vom Erdöl zu lösen.

Die Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie (VES), die u.a. mit Beteiligung der meisten deutschen Automobilhersteller und der Bundesregierung durchgeführt wird, hat daher das Ziel, für eine auch zukünftig mobile Gesellschaft nachhaltige Kraftstoffe zu identifizieren. Als Fernziel wird seitens der VES die Nutzung von Wasserstoff als machbar angesehen. Für eine Übergangszeit von einigen Jahrzehnten werden auch andere Lösungen, die wegen der bestehenden Infrastruktur auf flüssige Kraftstoffe abzielen, diskutiert.

Biokraftstoffe sind aus Sicht des BMVEL eine besonders interessante Alternative im Gesamtkontext der regenerativen Kraftstoffe. Folgende Vorteile sind anzuführen:

- Umweltaspekte (nahezu geschlossener CO_2-Kreislauf, Emissionsreduzierung)
- Versorgungssicherheit
- Einkommensperspektiven für Land- und Forstwirtschaft
- Erhaltung der ländlichen Räume (Beschäftigungseffekte)
- Perspektiven für EU-Beitrittskandidaten
- Technologieentwicklung

Biokraftstoffe reduzieren nicht nur die Abhängigkeit von Öleinfuhren. Ihre Verwendung verringert zugleich klimaschädliche Emissionen und erhöht bei umweltverträglichem Anbau der Biomasse die Artenvielfalt. Darüber hinaus können sich neue Ansätze für die Pflege von Natur- und Landschaftsschutzgebieten ergeben. Soweit Biomasse für die Produktion von Biokraftstoffen eingesetzt wird, kann und sollte durch politische Maßnahmen darauf hingewirkt werden, dass der Anbau weitgehend umweltverträglich erfolgt.

Nutzeffekte der Vermeidung von CO_2-Emissionen

Im Grünbuch der Kommission „Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit“ ist das Ziel formuliert, im Straßenverkehrssektor 20 Prozent der herkömmlichen Kraftstoffe durch alternative Kraftstoffe zu ersetzen, um sowohl die Versorgungssicherheit zu verbessern als auch die Treibhausgasemissionen, insbesondere von Kohlendioxid, zu verringern. Die Kohlendioxid-Emissionen von fossilem Dieselkraftstoff betragen etwa 3,2 Tonnen pro 1000 Liter (einschließlich der Emissionen aus Produktion, Transport usw.). Biokraftstoffe verbrennen dagegen grundsätzlich Kohlendioxid-neutral, da nur der Kohlenstoffanteil freigesetzt wird, der zuvor im Wachstumsprozess der für die Herstellung des Biokraftstoffs verwendeten Pflanzen chemisch aus der Umwelt entnommen und eingebaut wurde. Allerdings entstehen während des Anbaus der Pflanzen und der Umwandlung der Ausgangsstoffe in Biokraftstoffe weitere Kohlendioxid-Emissionen. Die Vermeidung dieser Emissionen hängt davon ab, welche Pflanzen verwendet werden, welches technische Verfahren zur Erzeugung von Biokraftstoffen eingesetzt wird, und welche Anbaumethoden verwendet werden.

Kraftfahrzeugemissionen

Biokraftstoffe erzeugen in der Regel weniger „herkömmliche“ Kraftfahrzeugemissionen (z. B. CO, SO_2, flüchtige organische Verbindungen, Partikel) als konventionelle Kraftstoffe. Sie sind praktisch schwefelfrei. Verbesserungen der Motorentechnik werden diese Vorteile allerdings zunächst schrumpfen lassen. Einige Biokraftstoffe lassen sich besser als Kraftstoffe fossiler Herkunft in optimierten Motoren nutzen bzw. sind besser für die Verwendung in Brennstoffzellensystemen geeignet. Biokraftstoffe könnten eine gute Möglichkeit bieten, Brennstoffzellen mit ihren weitreichenden Vorteilen (auch bei Emissionen) in absehbarer Zeit in den Mobilitätsmarkt einzuführen.

Die Nutzeffekte der Erdölsubstitution für die Versorgungssicherheit

Eine Substitution von Erdöl ist von erheblicher wirtschaftlicher und strategischer Bedeutung. Die Erdölförderung außerhalb der OPEC geht weltweit zurück. Damit steigt die politische Abhängigkeit von der OPEC in den nächsten Jahren deutlich an. Biokraftstoffe können die Abhängigkeit von weltweiten Preissteigerungen und politisch motivierten Versorgungseinschränkungen verringern. Biokraftstoffe lassen sich perspektivisch im großen Stil im europäischen Markt produzieren und können damit die Versorgungssicherheit für Kraftstoffe erhöhen.

Beschäftigung

Eine verstärkte Produktion von Ausgangsstoffen für Biokraftstoffe wird einen Beitrag zur Multifunktionalität der Landwirtschaft leisten und der ländlichen Wirtschaft durch die Erschließung neuer Einkommensquellen und durch die Schaffung von Arbeitsplätzen neue Impulse verleihen. Verschiedene Studien prognostizieren einen Arbeitsplatzeffekt von 16 bis 26 Beschäftigten pro 1.000 Tonnen Rohöleinheiten pro Jahr. Rechnet man diese Ergebnisse hoch, so würde ein Biokraftstoffanteil von etwa einem Prozent des Gesamtverbrauchs an fossilen Kraftstoffen in der EU 45.000 bis 75.000 neue Stellen schaffen, der Großteil davon in ländlichen Gebieten. Der Beschäftigungseffekt liegt z.B. bei der Erzeugung von Biodiesel beim 50-fachen der Produktion der gleichen Menge herkömmlichen Dieselkraftstoffs in einer Raffinerie.

Naturschutzerwägungen

Um die Artenvielfalt in Natur- und Landschaftspflegegebieten zu erhalten, muss die überschüssige Biomasse abgeschöpft werden. Durch die Verwertung dieser Biomasse für die Biokraftstoffherstellung wird eine ökonomische Grundlage zur Verwertung geschaffen. Dadurch entstehen Arbeitsplätze in naturbelassenen Gebieten und eine haushaltsunabhängige Finanzierung von Landschaftspflegemaßnahmen.

Perspektiven für die Beitrittsländer

Die Nachfrage nach Biokraftstoffen wird zur Entstehung eines Marktes für innovative landwirtschaftliche Produkte beitragen. Dieser neue Markt wird den EU-Beitrittsländern mit ihrem z.T. starken landwirtschaftlichen Sektor neue Chancen bieten. Dies kann auch dazu beitragen, Teile des erheblichen Produktionspotentials von der Nahrungsmittelerzeugung auf andere Nutzungen umzulenken und den erwarteten Konkurrenzdruck auf die deutschen Bauern durch die Bauern der Beitrittsländer zu verringern.

Technologieentwicklung

Ökonomisch wird die Begrenztheit der Ölressourcen und die weltweit steigende Mobilität mittel- bis langfristig zu höheren Ölpreisen führen. Wer bei alternativen Kraftstoffen technologischer Marktführer sein wird, findet sehr große Märkte vor. Die Unterstützung der technologischen Entwicklung der Biokraftstoffe schafft die Basis für eine führende Rolle Deutschlands auf einem Zukunftstechnologiemarkt. Deutschland hat im Bereich der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen einen Marktvorsprung erreicht, der im Inland zu nicht unbeträchtlichen Arbeitsplatz- und Wertschöpfungseffekten geführt hat. Zu ähnlichen Entwicklungen kann es bei der Entwicklung von Biokraftstoffen kommen.

Biodiesel erfüllt nur einen Teil der vorgenannten Ziele. Das Erzeugungspotential ist begrenzt; zudem besteht bei Rapsöl als Hauptrohstoff in Anbau und Nutzung die Konkurrenz zum Lebensmittelbereich und zu anderen chemisch-technischen Anwendungen. Andere Biokraftstoffe bieten die Chance auf höhere Energiepotenziale pro Hektar Anbaufläche, besonders wenn die Ganzpflanzennutzung zugrunde liegt. Synthetische Biokraftstoffe sind eine Zukunftsoption neben bereits etablierten Biokraftstoffen. Für synthetische Biokraftstoffe sprechen aus Sicht des BMVEL folgende Vorteile:

- Hohes Substitutionspotential, da eine vielfältige Rohstoffbasis möglich ist.
- Reduzierung nutzungsbedingter Emissionen.
- Weiternutzung der bisherigen Infra- und Nutzungsstruktur.

Aus Sicht des BMVEL wird ein wesentlicher Beitrag der Biokraftstoffe zur deutschen Treibstoffversorgung nur geleistet werden können, wenn verschiedenen Optionen parallel genutzt werden. Biodiesel wird dabei auch in Zukunft eine bedeutende Rolle spielen.

3. Förderaktivitäten des BMVEL im Bereich Biokraftstoffe

Mit der Produktion nachwachsender Rohstoffe erbringt die Land- die Forstwirtschaft eine Dienstleistung für die gesamte Gesellschaft.

Da Industrie und Chemie genau auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Rohstoffe benötigen, ist jedoch nicht nur die Landwirtschaft gefordert. Es bedarf intelligenter Forschung, um der Industrie optimal zuar-

beiten zu können. So ist es mittels Pflanzenzüchtung, Biotechnologie und Gentechnik möglich, die gewünschten Rohstoffqualitäten zu erzielen und die Erträge zu optimieren. Auf diese Weise kann die Landwirtschaft heute hochwertige Ausgangsstoffe zur Verfügung stellen, die der Industrie aufwändige Umwandlungsschritte, wie bei fossilen Rohstoffen nötig, ersparen. Pflanzen bieten Inhaltsstoffe, deren Wert lange Zeit nicht erkannt wurde.

An die jahrzehntelang praktizierte Verarbeitung fossiler Rohstoffe gewöhnt, musste sich die Industrie den Nutzen nachwachsender Rohstoffe erst wieder erschließen. Herkömmliche Verarbeitungsmethoden müssen umgestellt, neue entwickelt werden. Eine lohnende Aufgabe in Anbetracht der ökologischen Vorteile, aber auch der interessanten Märkte für Produkte auf der Basis nachwachsender Rohstoffe.

Ein weites Feld, in dem noch viel Forschung und Entwicklung nötig ist. Sie zu fördern ist seit 1993 das Ziel der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Seit 1993 ist die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMVEL für die Förderung von Biomassevorhaben zuständig. Die Grundlagen ihrer Tätigkeit legt das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe fest. Rund 26 Mio. € stehen aus dem Bundeshaushalt jährlich für Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben zur Verfügung. Sowohl Vorhaben zur stofflichen als auch zur energetischen Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe können unterstützt werden. Fördermittel sind vor allem den Projekten vorbehalten, die kurz- oder mittelfristig die Entwicklung neuer Produkte oder Technologien erwarten lassen.

Das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe

Etwa 20 Prozent der Mittel werden für Forschungsprojekte der Produktlinie Bioenergie ausgegeben. Von 35 Mio. €, die seit dem 01.01.1993 in Bioenergieprojekte flossen, entfielen etwa 4 Mio. € auf Vorhaben zur Nutzung und Produktion flüssiger Energieträger, insbesondere RME (Biodiesel).

Ein besonderer Schwerpunkt der vom BMVEL über die FNR geförderten Projekte ist die Umwelt- und Technikrelevanz der Nutzung von RME. Beispiele sind Vorhaben zu den Themen

- Kraftstoffqualität
- Emissionen
- Energiebilanz
- Demonstration von Verfahren

Die Förderaktivitäten des BMVEL beschränken sich aber nicht auf Biodiesel. Wichtig sind auch die Herstellung, Normung und energetische Nutzung des unveresterten Rapsöls. Das BMVEL hat im Rahmen des Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ ein Demonstrationsvorhaben zum Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff in Traktoren bewilligt – das sog. „100-Traktoren-Programm“.

Um den Nachweis für die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Rapsölnutzung im mobilen Bereich der Landwirtschaft zu erbringen, werden einhundert Traktoren über drei Jahre hinweg mit Rapsöl betrieben. In 800 Betriebsstunden jährlich sollen die Schlepper zeigen, ob reines Rapsöl herkömmlichen Diesel sowohl unter technischen und ökologischen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten ersetzen kann. Dabei dürfen die Teilnehmer nur Rapsöl tanken, das den "Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK)" erfüllt.

Die Ergebnisse des Modellversuches dienen als Entscheidungsgrundlage für den breiteren Einsatz von Pflanzenöltreibstoffen in landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Eine wichtige Voraussetzung der direkten Nutzung von Rapsöl als Kraftstoff ist die Qualität des Produktes, insbesondere der Rapsölproduktion in kleineren dezentralen Ölmühlen. Im Jahr 2002 hat das BMVEL ein Vorhaben der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik bewilligt, in dem die „Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich“ im Vordergrund steht. Dieses Vorhaben wird auch für die Biodieselproduzenten nützlich sein, da die Einhaltung der für jedes Anwendungsgebiet erforderlichen Produktqualität Einfluss auf die gesamte folgende Nutzungskette nimmt. In diesem Projekt sollen Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Auswahl der Systemkomponenten, des zu verarbeitenden Ausgangsproduktes Rapsöl sowie bei der Prozessführung abgeleitet werden.

4. Mineralölsteuerbefreiung in Deutschland und die Konsequenzen insbesondere für Biodiesel

Biokraftstoffe haben bislang keinen relevanten Marktanteil erreicht. Aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes, aber auch aus Gründen der langfristigen Versorgungssicherheit ist es erforderlich, die Markteinführung der Biokraftstoffe zu beschleunigen. Die Befreiung der Biokraftstoffe von der Mineralölsteuer ist hierfür ein wichtiges Instrument.

Deutschland hatte innerhalb der EU in der Frage der Besteuerung von Biokraftstoffen bis zu diesem Jahr einen Sonderweg gewählt. Auf reine Biokraftstoffe wurde weder Mineralöl- noch Ökosteuer erhoben. In der Praxis hat dies dazu geführt, dass nur Biodiesel und natives Pflanzenöl in den Genuss dieser Regelung kamen. Bioethanol oder ETBE, die in praxisüblichen Motoren nicht als Reinkraftstoff genutzt werden können, profitierten davon nicht.

Um weiteren Biotreibstoffen Marktchancen zu eröffnen, haben Bundestag und Bundesrat am 07. bzw. 21.06.2002 die Steuerbegünstigung für Biokraftstoffe auf eine neue Basis gestellt. Für Kraftstoffe, nicht für Heizstoffe, wird eine flexible Regelung getroffen, die es ermöglicht, jede Mischung von Biokraftstoff mit fossilem Kraftstoff zu vermarkten und die Mineralölsteuerbelastung des Gemisches um den sich aus dem Biokraftstoffanteil ergebenden Steueranteil zu ermäßigen. Damit werden nunmehr auch Kraftstoffe aus Biomasse von der Mineralölsteuer befreit, die aus Kohlenwasserstoffen bestehen bzw. mit solchen fossilen Ursprungs vermischt sind oder im Rahmen eines chemischen Prozesses Bestandteil eines Kraftstoffes nicht rein biogenen Ursprungs werden. Zu ihnen zählen die biologisch hergestellten Kraftstoffe Biogas und Bioethanol. Dazu gehören aber neben anderen auch Methanol, Benzin, Diesel, Kerosin und andere Kraftstoffe, soweit sie synthetisch aus Biomasse hergestellt werden.

Zur Bestimmung des Begriffs Biomasse wird grundsätzlich auf die Biomasseverordnung verwiesen. Für Energieerzeugnisse, die anteilig aus Biomasse hergestellt wurden, wie insbesondere Methyltertiär-Butyl-Ether und Ethyltertiär-Butyl-Ether sowie entsprechende Kraftstoffe, wird eine Sonderregelung getroffen, die gewährleistet, dass die zur Herstellung eingesetzten biogenen Bestandteile begünstigt werden können. Bei Pflanzenölmethylestern („Biodiesel“) und Pflanzenölen, die als Reinkraftstoff verwendet werden, soll der Status Quo durch dieses Gesetz nicht verändert werden. Pflanzenölmethylester, die regelmäßig einen geringen Anteil an fossilen Bestandteilen enthalten, sind in vollem Umfang als Biokraftstoffe anzusehen. Wenn sie fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, unterliegen sie aufgrund dieses Gesetzes ebenfalls nicht der Mineralölsteuer. Die Höhe der Steuerbegünstigung für Biokraftstoffe sollte an die Entwicklungen auf dem Rohölmarkt und die Preise für Biomasse und Kraftstoffe angepasst werden. Dazu werden dem Bundestag aufgrund eines regelmäßig zu erstellenden Berichts Vorschläge unterbreitet. Zunächst sind die Steuersätze bis zum 31.12.2008 ermäßigt.

In Zukunft ist mit Kostensenkungen bei den Biokraftstoffen zu rechnen. Zugleich ist langfristig von höheren Rohölpreisen auszugehen. Für eine Nachfolgeregelung wird somit überwiegend eine Steuerermäßigung genügen, die die Wettbewerbsfähigkeit der Biokraftstoffe gewährleistet.

Zur praktischen Umsetzung, insbesondere zum Nachweis des Biokraftstoffanteils, muss das Bundesministerium der Finanzen (BMF) ermächtigt werden, noch die notwendigen Durchführungsbestimmungen im Rahmen der Mineralölsteuerdurchführungsverordnung zu erlassen.

Die Befreiungsvorschrift steht unter dem Vorbehalt der beihilferechtlichen Genehmigung durch die Europäische Kommission sowie einer Ermächtigung durch den Ministerrat nach der Mineralölsteuer-Strukturrichtlinie. Ein Inkrafttreten ist frühestens zum 1. Januar 2003 vorgesehen.

In der Steuerbefreiung für Kraftstoffe aus Biomasse liegt eine große Chance für die Schaffung neuer Arbeitsplätze in der Landwirtschaft und im Anlagenbau. Diese Chance gilt es nutzen. Dabei ist wichtig, dass EU- und WTO-rechtlich eine Begrenzung der Steuerbefreiung auf deutsche Rohstoffe und in Deutschland hergestellte Kraftstoffe nicht möglich ist.

5. EU-Richtlinien Biokraftstoffe

Gleichzeitig mit den deutschen Aktivitäten zur Erweiterung der Steuerbefreiung von Biotreibstoffen hat sich auch die Europäische Union in diesem Bereich stark engagiert. Die Motivation ist ähnlich wie bei den deutschen Aktivitäten: Auch aus europäischer Sicht sind Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Senkung der Importabhängigkeit wichtige Argumente für einen Ausbau der Biokraftstoffe. Allerdings ist die Ausgangslage für die Europäische Union wesentlich komplexer, da die einzelnen Mitgliedstaaten sehr unterschiedliche Haltungen und Maßnahmen zur Förderung von Biotreibstoffen haben, die Entwicklung des Verkehrsbereichs starke Unterschiede aufweist und zusätzlich noch die EU-Osterweiterung ansteht. Im November 2001 hat die Europäische Kommission Vorschläge zur Steuerbegünstigung von Biotreibstoffen sowie zu Mindestanteilen von Biotreibstoffen am Kraftstoffverbrauch vorgelegt. Inzwischen ist hierzu eine politische Einigung erfolgt. Bis zum Jahr 2005 sollen 2 % des Kraftstoffverbrauchs durch Biotreibstoffe gedeckt werden, bis zum Jahr 2010 sogar 5,75 %. Sah der ursprüngliche Kommissionsvorschlag verbindliche Mengenvorgaben für die Mitgliedstaaten vor, haben die Zielwerte im Zuge der Kompromissfindung jetzt nur noch indikativen Wert.

Auch in der Frage der Steuerbegünstigung haben die Mitgliedstaaten jetzt die Freiheit, selbst über Art und Umfang der Maßnahmen zu entscheiden. Für Deutschland ist vor allem die Möglichkeit wichtig, günstigere bestehende oder bis zum 01.01.2003 eingeführte nationale Regelungen fortsetzen zu können.

6. Perspektiven

Die Suche nach Alternativen zu Benzin und Diesel ist im vollen Gange. Bislang vorgestellte neue Lösungen wie batteriegetriebene Fahrzeuge oder gasförmige Kraftstoffe (Wasserstoff, Erdgas) konnten technisch, besonders im Bereich der Verteilung und Verkehrssicherheit, nicht vollständig überzeugen. So ist Wasserstoff als zukünftiger Kraftstoff auch in der Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie (VES) der Bundesregierung umstritten, da die flächendeckende Einführung von Wasserstoff hohe Infrastrukturkosten verursacht, ohne dass Wasserstoff die Vorteile der bisherigen flüssigen Kraftstoffe erreicht. Zudem wird bei diesen Lösungen auch weiter zusätzliches CO_2 freigesetzt, da Grundlage dieser Kraftstoffe derzeit überwiegend fossile Rohstoffe sind.

Das BMVEL beurteilt daher die Herstellung und Verwendung von Biokraftstoffen grundsätzlich positiv. Kurz- und mittelfristig wird Biodiesel eine zentrale Stellung behalten. Hinzu treten könnte in 2 bis 3 Jahren die Erzeugung von Ethanol. Langfristig können auch synthetische Biokraftstoffe zu einer interessanten Option werden, die es lohnt, intensiv geprüft zu werden.

Die künftige Verfügbarkeit von Erdöl – Chancen und Risiken

Peter Kehrer[1]

Zusammenfassung

Die langfristige Verfügbarkeit von Erdöl steht im Mittelpunkt aktueller Diskussionen zur künftigen globalen Energieversorgung. Dieser fossile Energieträger, der eigentlich gespeicherte Sonnenenergie darstellt, trägt mit ca. 40% nach wie vor die Hauptlast des Primärenergieverbrauchs der Welt und ist damit der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft Eine physische Verknappung von Erdöl hat es in der Vergangenheit nicht und wird es auch in unmittelbarer Zukunft nicht geben - sog. "Energiekrisen" waren politisch verursacht und kein Problem der globalen Verfügbarkeit, jüngste "künstliche Verknappungen" der OPEC zielten auf höhere Marktpreise. Im Gegenteil herrschte Jahrzehnte ein Überangebot mit der Folge entsprechend niedriger Preise. Die stets neu hinzugefundenen Reserven hielten mit der steigenden Förderung Schritt, glichen die durch Produktion entnommenen Mengen zumindest aus oder übertrafen diese, so dass die nachgewiesenen Erdölreserven über lange Zeit zunahmen und sich die "statische Reichweite" erhöhte.

Doch wie geht es weiter? Wird dieser Überfluss längerfristig in einen Mangel umschlagen, ist unsere Energieversorgung und unser Wohlstand gefährdet? Die Diskussion um die künftige Verfügbarkeit von Erdöl ist momentan kein sehr populäres Thema, wird auch von Politik und Wirtschaft nur ungern geführt, weil es den politischen und wirtschaftlichen Frieden stört. Die gegenwärtige Debatte um künftige Energiestrategien, besonders auch in Deutschland, zielt schwerpunktmäßig auf Umwelt- und Klimafragen sowie das Gefahrenpotential der Atomenergie und beinhaltet nicht eine mögliche Ressourcenproblematik fossiler Energie-Rohstoffe.

Die intensive aktuelle Diskussion in Politik, Medien und Fachkreisen zur Zukunft des Erdöls ist hinsichtlich ihrer Aussagen verwirrend, weil Fakten unzulässig vermischt, ungleiche Dinge verglichen werden, unterschiedliche Interessenlagen in Politik und Wirtschaft die Beurteilung tendenziös beeinflussen und verschiedenen Fachdisziplinen die Dinge naturgemäß aus ihrer Sicht unterschiedlich bewerten.

Dieser Vortrag versucht, diese Thematik aus der Sicht einer neutralen Fachbehörde, basierend auf geowissenschaftlichen und lagerstättenkundlichen Kenntnissen und Erfahrungen, darzustellen. Die häufig zitierten "Reichweiten" und "Lebensdauern" von Rohstoffen, bei denen Relationen zwischen Reserven und Produktion miteinander in Beziehung gesetzt werden, sind eine statische Momentaufnahme in einem dynamischen System, in dem sich die Faktoren wie Reserven, Förderung, Verbrauch, Kosten, Preise und Technologien laufend verändern. Die Nichtbeachtung dieser Zusammenhänge führt zu falschen Schlussfolgerungen.

Erfahrungen und Kenntnisse aus Exploration und Produktion von Erdöl der Vergangenheit, die sich in sog. "Lernkurven" darstellen lassen, können Hinweise auf künftige Entwicklungen geben. Die daraus abgeleiteten Verfügbarkeitsprognosen haben als grobe Tendenz gemeinsam, dass in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts die maximale Produktion, möglicherweise im Zeitraum 2020-2030, an konventionellem Erdöl erreicht wird. Die Welt hat in den kommenden Jahrzehnten mit großer Wahrscheinlichkeit keinen Überfluss an Erdöl, das seinen Höhepunkt als Energieträger wohl in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts überschreiten wird und seine Führungsposition im Energiemarkt an andere Energieträger abgeben wird. Ein die weitere Entwicklung der Weltwirtschaft hemmender Mangel ist gleichwohl nicht zu befürchten, da bedingt durch einen allmählichen längerfristigen Förderabfall sowie ausreichend vorhandener anderer fossiler Energieträger und regenerativer Energien ein gradueller Übergang zu einem anderen Energiemix möglich ist. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen substituierbar.

Die Lichter werden, auch bei deutlichem Bevölkerungswachstum und steigendem Wohlstand in Entwicklungsländern, nicht ausgehen, sondern Intelligenz und Kreativität des Menschen, verbunden mit neuen Technologien, werden wie in der Vergangenheit auch in der Zukunft ein ausreichendes Angebot an Primärenergie bereitstellen. Allerdings wird die künftige Energieversorgung verstärkt von den Faktoren Akzeptanz, Umwelt, Klima, Kosten, Wirtschaftlichkeit, Substitution, Nachhaltigkeit und intelligenteren Lösungen durch neue Technologien bestimmt.

[1] Bundesanstalt für Geowissenschaften, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Einführung

Erdöl und Erdgas sind gegenwärtig die wichtigsten Energieträger. Zusammen decken sie über 60% des Welt-Primärenergiebedarfes, in einzelnen Ländern und Regionen noch wesentlich mehr (Abbildung 1). Mit ca. 40% ist das Erdöl der global führende Energie-Rohstoff, aber mit prozentual leicht abnehmender Tendenz, das Erdgas hat einen Anteil von ca. 20% mit einer sehr dynamischen Entwicklung und zunehmendem Anteil am Verbrauch. Seit mehr als 100 Jahren wird Erdöl industriell gewonnen. Die Nutzung von Erdgas in größerem Umfang setzte später ein, da die entsprechenden Märkte, bedingt durch eine aufwendige Infrastruktur mit hohen Vorlauf-Investitionen, sich erst allmählich entwickelten. Erdöl ist von größter Bedeutung für Transportwesen, Wärmemarkt sowie als Rohstoff für die Chemie, Erdgas wird schwerpunktmäßig für Wärme- uns Stromerzeugung sowie ebenfalls als Grundstoff für die Chemie eingesetzt.

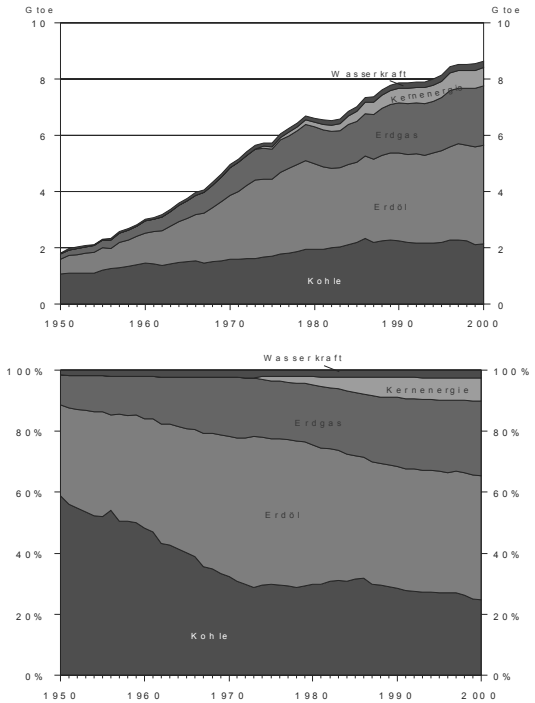


Abbildung 1:
Entwicklung des Primärenergie-Verbrauchs weitweit absolut und anteilsmäßig nach Energieträgern (ohne Biomasse)

Erdöl und Erdgas sind endliche, nicht-erneuerbare Rohstoffe und gespeicherte Sonnenenergie, da ihre Entstehung organischen Ursprungs ist, das Leben aber auf Sonneneinstrahlung basiert. Der Verbrauch hat heute solche gewaltigen Dimensionen erreicht, dass die jährlich konsumierten Mengen an Erdöl und Erdgas einem Bildungszeitraum von einigen Millionen Jahren entsprechen.

Es werden konventionelle und nicht-konventionelle Erdöle und Erdgase unterschieden. Die heute geförderten Lagerstätten sind im wesentlichen konventionelle Kohlenwasserstoffe, an nicht-konventionelle Lagerstätten sind aber noch sehr große Vorräte gebunden. Deren künftige Verfügbarkeit und Nutzung hängt wesentlich vom Energiepreisniveau, Technologien, Akzeptanz und Klimadiskussionen ab. Konventionelles Erdöl und Erdgas sind vom Umfang der ursprünglichen Reserven und Ressourcen etwa gleich, die günstigere Situation bei Erdgas bei den heutigen Reserven und Ressourcen liegt in der schon wesentlich längeren Nutzung des Erdöls, während sich die Erdgasmärkte erst später entwickelten. In diesem Vortrag wird schwerpunktmäßig das Erdöl behandelt.

Wie bereits vorher erwähnt wird zwischen konventionellem und nicht-konventionellem Erdöl unterschieden. Zum konventionellem Erdöl gehören Erdöl im klassischen Sinne (freifließend, mit Abstand der größte Anteil der heute geförderten Mengen) und Kondensat (NGL, Natural Gas Liquids; gasförmig in der Lagerstätte, flüssig an der Erdoberfläche). Zum nicht-konventionellen Erdöl werden Schweröl, Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer und Synthetisches Erdöl (aus Kohle oder Erdgas) gezählt.

Reserven und Ressourcen

Reserven sind zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen an Erdöl einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte. Sie werden noch nach dem Grad der Nachweissicherheit in sichere, wahrscheinliche und mögliche Reserven unterteilt. Bei sich ändernden Rahmenbedingungen wie Erdölpreisen oder neuen Fördertechnologien ändert sich die Höhe der Reserven aus den schon bekannten Vorkommen. Gewinnbare Erdölreserven entsprechen etwa 30% bis 50% des gesamten Lagerstätteninhaltes an Erdöl (oil in place), je nach Fließfähigkeit und Lagerstättenparameter wie Porosität und Porosität.

Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare, sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Mengen an Erdöl ("yet to find"). Diese geologischen Möglichkeiten zur Entdeckung noch nicht nachgewiesener Mengen ergeben sich aus der Tatsache, dass die Erdölbildung an ein bestimmtes Temperaturfenster in der Erdkruste ("oil window") und an organische Ablagerungen in sog. Sedimentbecken gebunden ist. Damit kann das noch zu findende Potential "geologisch eingegrenzt"

werden. Von sehr gut erkundeten Sedimentbecken wird analog auf das Potential weniger explorierter Sedimentbecken geschlossen.

Das System Reserven und Ressourcen ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Durch mögliche steigende Gewinnungskosten bei höherem Energiepreisniveau werden nachgewiesene Ressourcen und mit steigendem geologischem Kenntnisstand durch Exploration werden noch nicht nachgewiesene Ressourcen in Reserven überführt.

Abbildung 2:
Klassifikationsschema Reserven/Ressourcen

Nach Einschätzung der BGR lagen Ende 2000 das insgesamt zu fördernde Potential an konventionellem Erdöl bei ca 360 Gt (Milliarden Tonnen), von denen 125 Gt bereits gefördert wurden, 148 Gt als Reserven vorliegen und ca. 87 Gt Ressourcen, die noch in Reserven überführt werden können (Abbildung. 3).

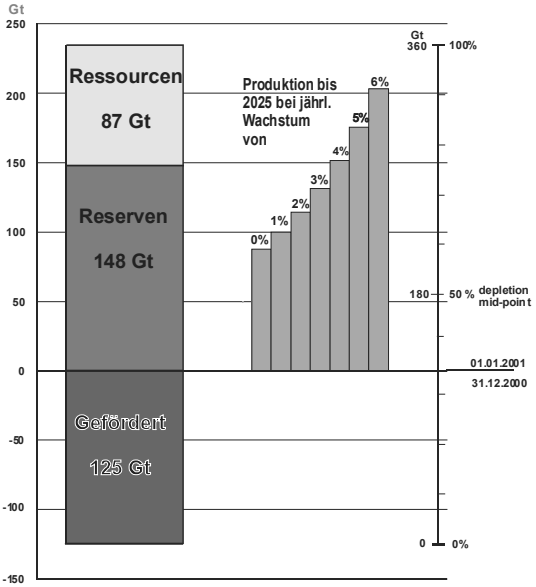


Abbildung 3:
Gesamtpotential und Verfügbarkeit von konventionellem Erdöl (weltweit)

Das insgesamt gewinnbare Potential, international auch unter dem Begriff EUR (Estimated Ultimate Recovery) bekannt, ist wie in Abbildung 4 dargestellt in den letzten beiden Jahrzehnten kaum noch gewachsen, obwohl die nachgewiesenen Reserven sich noch deutlich erhöht haben. Die einzelnen Punkte in dieser Abbildung beziehen sich auf Schätzungen unterschiedlicher Autoren, die von uns hindurchgelegte mittlere Kurve bewegt sich asymptotisch in die Horizontale. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass mit steigendem Kenntnisstand und Erforschung der Erdkruste eine Begrenzung des Gesamtpotentials (EUR) deutlich wird und auch mit neuen Technologien und ggf. steigenden Energiepreisen dieses Niveau bei konventionellem Erdöl wegen der Endlichkeit der Ressourcen nicht mehr gesteigert werden kann.

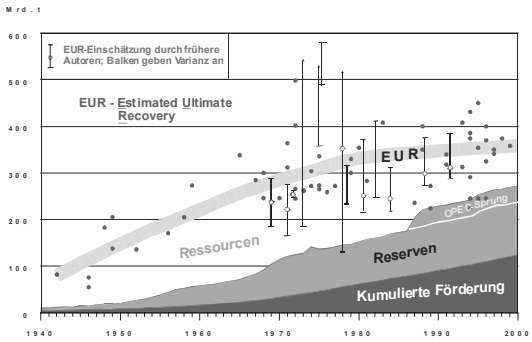


Abbildung 4:
Konventionelles Erdöl 1940 - 2000 – Entwicklung von EUR, Reserven und Förderung

Bezogen auf die Reserven von 148 Gt und die jährliche Förderung von ca. 3,5 Gt ergibt sich eine "statische Reichweite" von etwas über vierzig Jahren, unter Hinzurechnung der noch zu findenden Ressourcen von über sechzig Jahren. Der hierfür häufig gebrauchte Begriff "Lebensdauer" ist insofern irreführend, weil es sich nur um eine statische Momentaufnahme in einem dynamischen System handelt, bei dem sich Faktoren wie Reserven, Förderung, Preise, Kosten und Technologien laufend ändern. Eine Lagerstätte bzw. eine Lagerstättenprovinz, ein Land oder die gesamte Welt kann aus lagerstättendynamischen Gründen auch nicht auf gleichem Förderniveau bis zur totalen Erschöpfung produzieren, sondern ist durch einen lang anhaltenden asymptotischen Abfall gekennzeichnet.

Aus Erfahrung einzelner Erdölfelder oder ganzer Erdölprovinzen ist bekannt, dass nach Förderung der Hälfte der gewinnbaren Menge, dem sog. "depletion mid point", zwangsläufig ein Förderabfall einsetzt. In Abbildung 3 ist eine jährliche Fördersteigerung von 0% bis 6% über eine Dauer von 25 Jahren berechnet. Die höheren Produktionssteigerungen dürf-

ten dabei unrealistisch sein, da sie neben den Reserven schon einen wesentlichen Teil der Ressourcen in Anspruch nehmen würden. Auch bei gleichbleibendem Förderniveau wäre der bei 180 Gt liegende "depletion mid point" schon in der Hälfte dieses 25-Jahreszeitraumes erreicht.

Sensationelle große neue Erdölfelder sind nicht mehr zu erwarten, da die Sedimentbecken und die Bildungsbedingungen weitgehend bekannt sind. Eine wesentliche Steigerung des Gesamtpotentials (EUR) wäre möglich, wenn der Entölungsgrad bekannter Lagerstätten über höhere Energiepreise, die höhere Produktionskosten erlauben, und die damit verbundenen verbesserten Fördertechnologien gesteigert werden könnte.

In Abbildung 5 ist der Anteil von Erdöl an den Reserven und Ressourcen nicht erneuerbarer Energie-Rohstoffe dargestellt. Während das konventionelle Erdöl bei den Reserven noch einen Anteil von 18,0% hat, sinkt dieser Wert bei den Ressourcen wegen der starken Stellung von Kohle und nichtkonventionellem Erdgas (überwiegend Gashydrate) auf nur noch 1,2%.

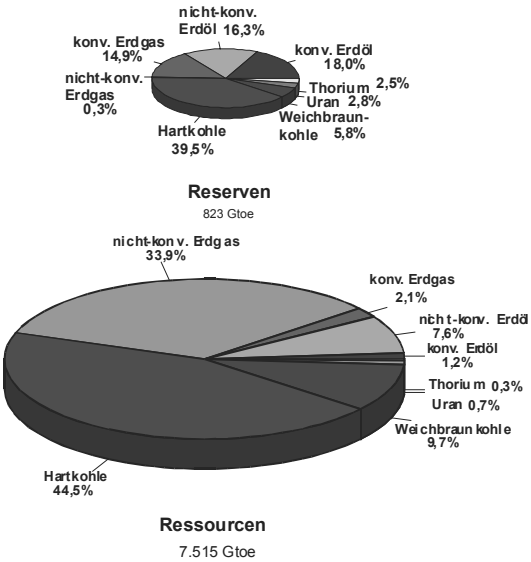


Abbildung 5:
Reserven und Ressourcen von Energie-Rohstoffen

Die Verteilung der Erdölreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen ist in Abbildung 6 dargestellt, die starke Stellung der OPEC mit fast 65% kommt deutlich zum Ausdruck. Länder mit Erdölreserven von über 1 Gt zeigt Abbildung 7, ca. 70% der Welterdölreserven liegen innerhalb einer "strategischen Ellipse".

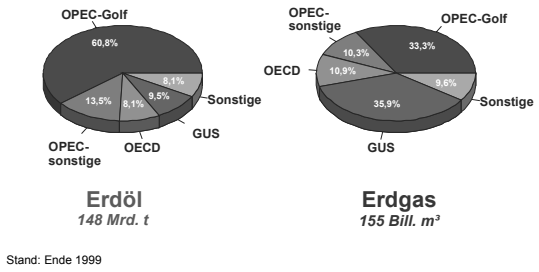


Abbildung 6:
Verteilung von Erdöl- und Erdgasreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen

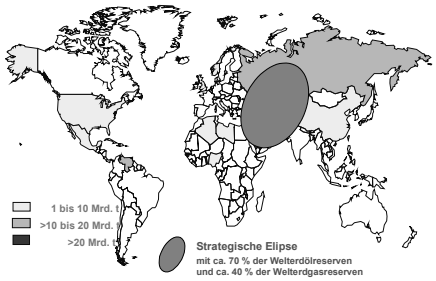


Abbildung 7:
Länder mit Erdölreserven > 1 Mrd t

In Abbildung 8 ist die weltweite Entdeckung von Erdöl im 5-Jahresmittel dargestellt. Dabei wir deutlich, dass die größten Felder in den 40-, 50- und 60-iger Jahren gefunden wurden. Der Zuwachs der Reserven der letzten beiden Jahrzehnte ist zu ca 75% auf Höherbewertung vorhandener Lagerstätten zurückzuführen.

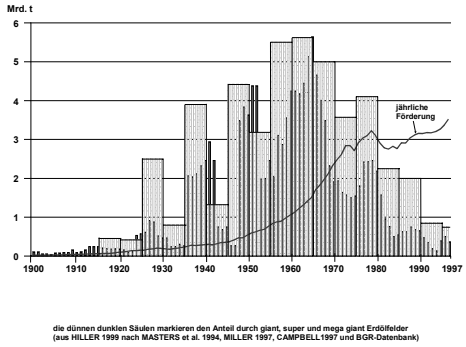


Abbildung 8:
Weltweite Entdeckung von Erdöl (im 5-Jahresmittel) und Erdölförderung seit 1900

Lernkurven

Aufgrund der Erfahrung von Exploration (Aufsuchung, Erschließung) und Förderung (Gewinnung) von Erdöl ergeben sich charakteristische

"Lernkurven" oder "Erfahrungskurven", die Hinweise auf das insgesamt zu findende bzw. zu fördernde Erdöl ergeben. Bei der Exploration werden Aufwand gegen Erfolg geplottet, wobei der Aufwand durch die Zahl der Explorationsbohrungen (bzw. Kosten) und der Erfolg durch die kumulierten gefundenen Reserven dargestellt wird. In Abbildung 9 sind drei Beispiele unterschiedlicher Größenordnungen dargestellt, und zwar bezogen auf ein Sedimentbecken, eine Lagerstättenprovinz und eine ganze Region. Die Kurven steigen zunächst steil an, da zuerst die größeren Felder gefunden werden und flacht dann ab, weil die Größe der zugefundenen Felder und damit der Reservenzuwachs abnimmt. Wenn alle wirtschaftliche Felder gefunden sind, nimmt die Kurve einen asymptotischen Verlauf und die Exploration endet wegen mangelnder weiterer Erfolge. Diese Kurve, international auch "creaming curve" genannt, bildet das insgesamt gewinnbare Reservenpotential einer Lagerstätte, Lagerstättenprovinz, Sedimentbeckens, Region oder der Welt ab.

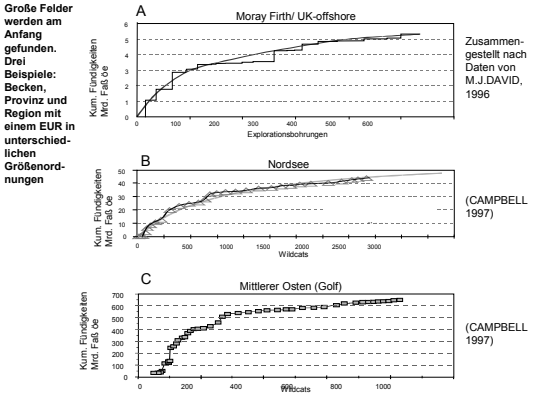
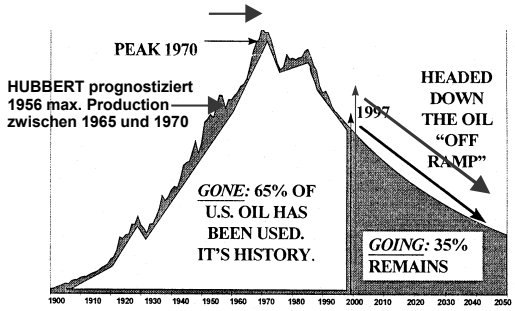


Abbildung 9:
Lernkurven in der Erdölexploration (Aufwand gegen Erfolg, sog. „creaming curves“)

Die Jahresproduktion eines Feldes über der Zeit ergibt typischerweise eine Art Glockenkurve, normalerweise mit einem steileren Anstieg und einem längeren asymptotischen Abfall. In Abbildung 10 ist die Förderung der USA von 1900 bis heute und projiziert bis 2050 dargestellt. Der amerikanische Geologe Hubbert prognostizierte 1956, dass die USA ihren Förderhöhepunkt etwa 1965 bis 1970 erreichen würde und wurde damals dafür, auch in Fachkreisen, belächelt. Tatsächlich wurde das Fördermaximum 1970 erreicht, weil der "depletion mid point" überschritten wurde und die Produktion zwangsläufig lagerstättenbedingt zurückgehen musste. Auch die modernste den USA zur Verfügung stehende Fördertechnologie und mehrere Energiepreiserhöhungen konnten diesen Abfall nicht verhindern. Damit ist die These von Wirtschaftsforschern widerlegt, die künftige Verfügbarkeit von Erdöl hänge nur von Technologie und Kapital ab. Es gibt zahlreiche weitere Beispiele für einzelne Felder, Lagerstättenprovinzen oder Regionen in einem reiferen Förderstadium, die einen ähnlichen Förderverlauf zeigen.

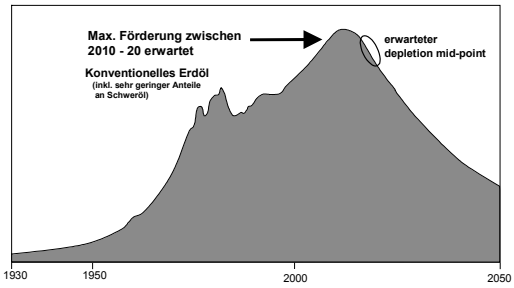


(UDALL and ANDREWS, 1999)

Abbildung 10:
US – Erdölproduktion 1900 bis 2050

Ausblick

Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen und den Vorstellungen über das gesamte Potential an förderbarem Erdöl ist in Abbildung 11 ein mögliches Förderszenario bis 2050 dargestellt. Die Welt-Produktion würde demnach ihren Höhepunkt im Zeitraum 2010 bis 2020 mit 4,5 bis 5,0 Gt erreichen. Eine Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion bis 2150, z.T. auch unter Einbeziehung nicht-konventioneller Erdöle, ist in Abbildung 12 dargestellt. In der Mehrzahl der Fälle wird ein Maximum der Produktion in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts erreicht. In der Abbildung 13 wird ein von der BGR entwickeltes Szenario, ebenfalls bis 2150, dargestellt. Auch die Einbeziehung eines bedeutenden Anteiles an Erdöl aus Schweröl, Schwerstöl und Ölsanden kann den längerfristigen Förderabfall nicht verhindern, sondern nur verlängern.



(nach UDALL and ANDREWS, 1999 und HILLER, 1999)

Abbildung 11:
Weltweite Erdölproduktion 1930 – 2050

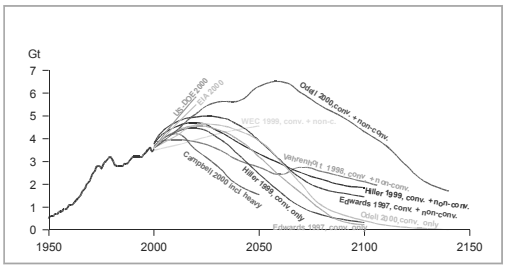


Abbildung 12:
Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion

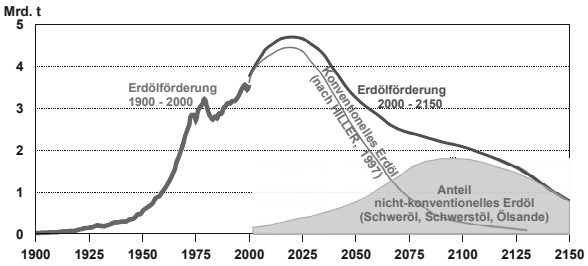


Abbildung 13:
Weltweite Erdölproduktion 1900 – 2150, Rückblende und Versuch eines Ausblicks

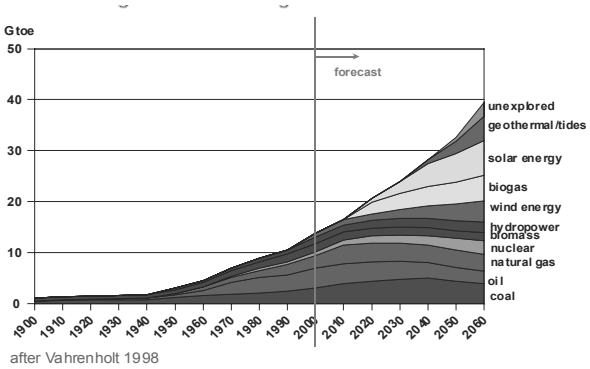


Abbildung 14:
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit

Ein von Shell vorgelegtes Szenario (Vahrenholt 1998) der Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs zeigt in 2060 einen Anteil von regenerativen Energien von über 50%. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen wie Transport, Wärme oder Rohstoff für die Petrochemie ersetzbar. Ein möglicher Lastwechsel der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas ist in Beziehung zur Entwicklung der Weltbevölkerung ist in Abbildung 15 dargestellt. Erdgas wird zunächst einen Teil der von Erdöl gestellten Energie übernehmen, dann aber in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts auch das Fördermaximum überschreiten. Wegen der günstigen Situation der Kohle hinsichtlich Reserven und Ressourcen sind in dem dargestellten Zeitraum noch keinerlei Grenzen zu erkennen.

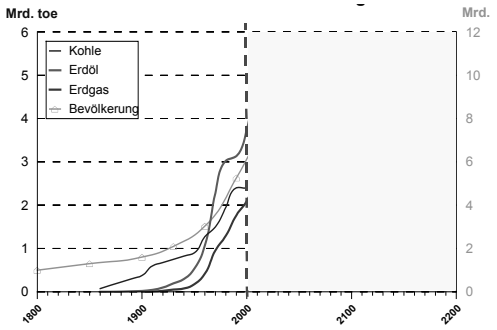


Abbildung 15:
Entwicklung des Energieverbrauchs und der Weltbevölkerung

Das sog. Erdöl-Zeitalter wird keineswegs dadurch enden, dass alles im Untergrund förderbare Erdöl gewonnen wurde. Vielmehr werden Fragen wie Umwelt, Klima, Akzeptanz, Einsparungen und steigende Förderkosten, die intelligentere Lösungen mit anderen Energieträgern möglich machen, diese kurze Episode in der Geschichte der Menschheit beenden. Erdöl als Rohstoff in kleineren Mengen wird noch in Jahrhunderten gefördert werden. Kreativität des Menschen wird zu einem neuen Energiemix jenseits der Kohlenwasserstoffe Erdöl und Erdgas führen. Energie ist ausreichend vorhanden und der Welt werden nicht die Lichter ausgehen, auch angesichts steigender Weltbevölkerung und Wohlstandes.

Literatur

BGR (1998) Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. - Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, XXIV, 398 S., Schweizerbart, Stuttgart

Hiller,K. Kehrer P. (2000) Erfahrungskurven bei der Suche nach und Förderung von Erdöl.. Erdöl, Erdgas, Kohle, 116, 9, 427 – 430

Potenziale zukünftiger Kraftstoffe

Rudolf R. Maly, Winfried Degen[1]

In den Industrieländern sind persönliche Mobilität und effektiver Warentransport zu Selbstverständlichkeiten geworden. Motorisierungsgrade von 50% und mehr sind keine Seltenheit. Die erforderlichen Kosten sind vergleichsweise gering: so mußte 1999 ein Deutscher für Fahrzeug, Steuern, Versicherung und Kraftstoff lediglich 12,1%, ein Amerikaner sogar nur 5,8% seines verfügbaren Einkommens aufwenden. Ermöglicht wird dies durch die heutigen ausgereiften und effizienten Antriebs-, Fahrzeug- und Produktionstechniken. Damit können große Stückzahlen von preiswerten Fahrzeugen hergestellt werden. Der benötigte Kraftstoff ist kaufkraftbezogen in den vergangenen 50 Jahren ebenfalls eher billiger als teurer geworden.

Seit der 1. Energiekrise vor 30 Jahren werden aber zunehmend 3 Aspekte der Straßenverkehrs kritisch untersucht:

- Verbesserung der lokalen Luftqualität durch emissionsarme / -freie Fahrzeuge
- Langfristige Sicherstellung der Energieversorgung durch Übergang von fossilen zu erneuerbaren Ressourcen
- Verringerung der Treibhausgas-Emissionen durch Übergang zu kohlenstoffneutralen / -freien Kraftstoffen.

Bei den konventionelle Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sind erhebliche Fortschritte bei der Reduktion der Emissionen erzielt worden. Im Auto Oil II - Programm der Europäischen Union wurde die zu erwartende Luftbelastung nach Umsetzung der Grenzwerte für Euro 3 (2000) und Euro 4 (2005) hochgerechnet. Danach werden die Emissionen von CO, NOx, SO_2 und Partikel bis 2015 auf ca. 20% des Bezugsjahres 1990 zurückgehen. Eine weitergehende Senkung dieser Fahrzeugemissionen würde die Luftqualität dann nur noch unmerklich verbessern, da andere Emittenten weitaus dominieren. Die dafür erforderlichen Kosten stünden dann auch annäherungsweise in keinem sinnvollen Verhältnis zu den erzielbaren weiteren Reduzierungen. Als emissionsfreie Fahrzeuge für Ballungsräume kommen Elektrofahrzeuge und mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge in Betracht. Nach den Erfahrungen in Kalifornien scheiden Elektrofahrzeuge aber aufgrund noch unzureichender Batterie- und Fahrzeugleistungen sowie fehlender Kundenakzeptanz mindestens mittelfristig aus. Gute Chancen haben daher Brennstoffzellenfahrzeuge, für die jedoch die erforderliche Speichertechnologie im Fahrzeug und die Herstellungs- und Versorgungsinfrastruktur für regenerativen Wasserstoff noch fehlen.

Bei der Versorgungssicherheit mit Öl und Gas besteht heute weitgehend Konsens, daß eine kurzfristige Verknappung der fossilen Energieträger nicht zu befürchten ist. Die jüngste Bestandsaufnahme der konventionellen Öl- und Gas-Ressourcen hat nochmals eine deutliche Steigerung (38 %) der Vorräte ergeben. Weitaus größer als die konventionellen Öl- und Gasreserven sind aber die Ressourcen an Ölsänden und Ölschiefer sowie an Erdgashydraten, die noch völlig unangetastet sind. Berücksichtigt man weiterhin, daß man mit bekannten Verfahren auch aus Erdgas und Kohle (Reichweite noch mindestens 200 Jahre) flüssige Kraftstoffe herstellen kann, so könnte der Straßenverkehr noch mehrere hundert Jahre mit flüssigen Kraftstoffen auf fossiler Basis versorgt werden.

Daher ist die Reduzierung der CO_2-Emissionen in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Neben CO_2 spielen jedoch auch die Treibhausgase Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) eine nicht unwesentliche Rolle, die sich bei einem künftig verstärktem Einsatz biogener Energien noch verstärken dürfte, da ein Großteil der neueren Emissionen aus der Landwirtschaft stammt. Zu beachten ist, daß Methan und Lachgas deutlich höhere Treibhauspotentiale (GWP) als Kohlendioxid aufweisen.

Nach dem Kyoto-Protokoll soll die EU bis 2012 ihre Treibhausgas-Emissionen um 8% unter das Niveau von 1990 reduzieren. Deutschland hat sich sogar dazu verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis 2012 um 21% zu reduzieren. Um diese Reduktionsziele erreichen zu können, müssen alle Sektoren: Industrie, Handel und Gewerbe, Landwirtschaft, Haushalte und Verkehr Beiträge erbringen. Die in den verschiedenen Sektoren verfügbaren Technologien, GHG-Reduktionspotentiale und dafür anfallende Kosten sind sehr aber unterschiedlich. Aus ökonomischer Sicht ist daher das Maßnahmenbündel am sinnvollsten, das bei geringsten Kosten eine größtmögliche Reduktion der GHG-Emissionen bewirkt.

In diesem Beitrag werden die im System Kraftstoff-Antrieb möglichen künftigen CO_2-Reduktions-

[1] DaimlerChrysler AG, Forschung und Technologie, Mercedesstraße 137, 70546 Stuttgart

potentiale diskutiert und die dafür erforderlichen Kosten abgeschätzt. Da der Vergleich der CO_2-Reduktionskosten im Straßenverkehr durch die unterschiedliche Besteuerung bzw. Subventionierung der Kraftstoffe erschwert ist, werden sowohl die unversteuerten als auch die versteuerten Kosten betrachtet. Steuervorteile können zur Einführung neuer Technologien und neuer Kraftstoffe sinnvoll sein. Belastet man aber alle Kraftstoffe mit der gleichen, energiebezogenen Kraftstoffsteuer (entsprechend der Mineralölsteuer auf Benzin), so gleichen sich die abgeschätzten Preise der fossilen Kraftstoffe mit ca. 1,05 €/L weitgehend an. Die geschätzten Preise der regenerativen Kraftstoffe liegen mit ca. 1,50 €/L für Biodiesel deutlich und mit 2,65 €/L für regenerativen Wasserstoff sogar wesentlich darüber.

Mit regenerativem Wasserstoff betriebene BZ-Fahrzeuge können bis zu 96% der CO_2-Emissionen vergleichbarer konventioneller Fahrzeuge einsparen. Die abgeschätzten Reduktionskosten von 186 €/t CO_2 verteilen sich im steuerbefreiten Fall zu etwa gleichen Teilen auf die Mehrkosten des Fahrzeugs und auf die Mehrkosten des Kraftstoffs. Im besteuerten Fall entstehen jedoch die mit großem Abstand höchsten Mehrkosten aller Optionen überhaupt. Es muß dabei aber beachtet werden, daß diesen Werten noch unsichere Annahmen zugrunde liegen.

Bei BZ-Fahrzeugen mit aus Erdgas gewonnenem Wasserstoff ist die CO_2-Minderung deutlich geringer und liegt unter der von Erdgas und Biodieselmischkraftstoff betriebenen Fahrzeugen. Da die Mehrkosten des BZ-Fahrzeugs gleich bleiben, steigen die abgeschätzten Reduktionskosten auf sehr hohe 526 €/t CO_2.

Wesentlich günstiger liegen mit Erdgas betriebene konventionelle Fahrzeuge. Sie weisen sehr hohe CO_2 Reduktionen von 28% auf verbunden mit relativ niedrigen CO_2-Vermeidungsosten (281 €/t CO_2).

Beimischungen von flüssigen Biokraftstoffen können ohne Änderung der Infrastruktur eingesetzt werden und bieten sich daher als schneller und kostengünstiger Weg an um die CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs auch in der <u>bestehenden</u>, zahlenmäßig dominierenden Fahrzeugflotte zu senken. Das Potential der Biokraftstoffe ist zwar begrenzt aber aussichtsreich.

Mit 440 - 480 €/t CO_2 ist schließlich die Weiterentwicklung der konventionellen Antriebe am teuersten. Dennoch unternehmen die Autohersteller alles, um weitere Fortschritte zu erreichen. Die europäische Automobilindustrie hat sich verpflichtet die durchschnittliche CO_2-Emission ihrer Neufahrzeuge um 25% von 185 g CO_2/km bis auf 140 g CO_2/km in 2008 zu senken. Mit einem Flottendurchschnitt von 169 g CO_2/km im Jahre 2001 ist sie dabei auf gutem Wege.

Da Energieverbrauch und CO_2-Emissionen globale Fragestellungen sind, ist es sinnvoll, die CO_2-Reduktionskosten im Straßenverkehr mit entsprechenden Kosten in anderen Sektoren zu vergleichen. Man erkennt dabei, dass die obigen Kostenabschätzungen durchaus im Einklang mit detaillierteren Analysen stehen. Man erkennt aber auch, daß die Kosten im Verkehrssektor immer die Kosten in allen andern Sektoren um ein Vielfaches übertreffen. Berücksichtigt man weiterhin, daß die Sektoren Industrie und Strom/Wärme mit zusammen 44 % in Europa die größten CO_2-Emittenten sind, aber die niedrigsten CO_2-Minderungskosten aufweisen, dann liegt es nahe, begrenzte Mittel vornehmlich hier einzusetzen. Eine solche Strategie empfiehlt beispielsweise das European Climate Change Programm (EPPC). Das Programm konnte kosteneffektive Maßnahmen mit < 20 €/t CO_2eq im Umfang von 664–765 Mio. t CO_2eq aufzeigen. Dies entspricht in etwa der gesamten CO_2-Emission des Verkehrssektors in 1990 mit 753 Mio. t CO_2eq. Allein im Sektor Strom/Wärme könnten mit Kosten von < 100 €/t CO_2eq ca. 800 Mio. t CO_2eq eingespart werden. Daher macht es nach dem EPPC wenig Sinn, alle Sektoren mit den gleichen Reduktionszielen zu belegen. Mit einem kosten-effektiven Ansatz könnten danach die Kyoto-Ziele in Europa mit einem Aufwand von 3,7 Mrd. € pro Jahr erreicht werden. Dagegen würde eine undifferenzierte Reduktion über alle Sektoren Kosten von 20,5 Mrd. € pro Jahr verursachen.

Trotz der hohen Kosten für die CO_2-Reduktion im Verkehrssektor bieten sowohl motortechnische Maßnahmen als auch verbesserte konventionelle wie auch alternative / erneuerbare Kraftstoffe aussichtsreiche Perspektiven zur weiteren Absenkung der CO_2-Emissionen. Bis zur Klärung kostengünstiger und marktgerechter gesamtheitlicher Systemlösungen werden alle Optionen im Detail untersucht, wobei besseren Kraftstoffen eine immer wichtigere Rolle zukommt.

Stand- und Entwicklungspotenzial für die Produktion von Biodiesel – Eine internationale Bestandsaufnahme

Dieter Bockey[1], Werner Körbitz[2]

Zusammenfassung

Die Biodieselproduktion hat in den vergangenen Jahren einen erheblichen Aufschwung insbesondere in der Europäischen Union genommen. Von 1996 bis 2002 wurde die Biodieselproduktionskapazität mit insgesamt 2 Mio. Tonnen vervierfacht. Ein weiterer stetiger Ausbau der Produktionskapazität ist auf Grund der Initiative der EU-Kommmission zur Förderung von Biokraftstoffen und der hiermit einhergehenden nationalen Änderungen im Mineralölsteuerrecht zu erwarten. Ebenfalls sind die EU-Beitrittskandidaten gefordert, die entsprechende EU-Regelung in nationales Recht umzusetzen. Handlungsdruck entsteht durch die im Aktionsplan der EU-Kommission festgelegten Mindestmengenziele, die ab dem Jahr 2005 von 2% schrittweise bis zum Jahr 2010 auf 5,75 % Marktanteil für Biokraftstoffe gesteigert werden sollen. Für die Landwirtschaft als Rohstoffproduzent ergeben sich hieraus neue Produktions- und Absatzalternativen, die insbesondere für die Beitrittsländer von großer Bedeutung sein werden.

Bezüglich der Vermarktung ist zu unterscheiden zwischen Mitgliedstaaten, die Biodiesel als Beimischung zu herkömmlichem Dieselkraftstoff und Mitgliedstaaten (Deutschland und Österreich), die Biodiesel pur vermarkten. Biodiesel ist in den zuletzt genannten Ländern bei den Verbrauchern ein allgemein bekanntes Gattungsprodukt.

Die Rohstoffversorgung ist der begrenzende Faktor für die Weiterentwicklung der Biodieselwirtschaft. Auf Grund der gegebenen Produktionsmöglichkeiten ist nicht zu erwarten, dass mehr als 10 % des Dieselkraftstoffverbrauches durch Biodiesel ersetzt werden können.

1 Einleitung

Vor etwa 10 Jahren begann die kommerzielle Vermarktung von Rapsölmethylester als Kraftstoff für die Verwendung in Dieselfahrzeugen. Die Anfänge waren in Bezug auf die Produktionsmenge und Absatz zunächst bekanntlich sehr bescheiden. Insbesondere in Ländern, die von Anfang an die Vermarktung von reinem Biodiesel anstrebten, wurde diese Entwicklung zunächst von wenigen Idealisten getragen, die sich auch durch Rückschläge nicht entmutigen ließen. Der Vermarktungseinstieg war auf Grund fehlender Freigaben und einem im Vergleich zum Dieselkraftstoff relativ hohen Preis äußerst schwierig.

Zwei Faktoren haben die weitere Markterschließung wesentlich bestimmt:

Mit Einführung der Agrarreform im Jahr 1992 und der hiermit verbundenen Stilllegungsverpflichtung stand ein enormes Flächenpotenzial für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen und energetischen Verwertung zur Verfügung.

Mit Schaffung der Vornorm für Biodiesel V DIN 51606 wurden verbindliche Qualitätsparameter für die Produktion von Biodiesel vorgegeben und auf Basis dieser Vornorm erste Freigaben erteilt.

Im Gegensatz zu Frankreich und Italien hatte Deutschland nicht die Möglichkeit gemäß der Mineralölsteuerstrukturrichtlinie (92/81/EWG) [1] ausgeschöpft, im Rahmen von Pilotvorhaben eine mineralölsteuerrechtliche Präferenz für Biodiesel zu schaffen, sondern die Auffassung vertreten, dass der Rat und die EU-Kommission übereingekommen sind, bis zur Verabschiedung des Vorschlags der EU-Kommission über einheitliche Verbrauchssteuersätze auf Kraftstoffe aus landwirtschaftlichen Rohstoffen (KOM (92) 36 endg., Abl. EG Nr. C 73, 24.03.92), den Mitgliedsstaaten zu erlauben, die vor dem Inkrafttreten der Mineralölsteuerstrukturrichtlinie (1. Januar 1993) geltenden günstigeren Steuerregelungen beizubehalten. Von Anfang an hat deshalb die UFOP im Rahmen ihrer Möglichkeiten die Markteinführung von Biodiesel pur im Rahmen ihrer Öffentlichkeitsarbeit unterstützt und die Kooperation mit der Biodieselwirtschaft und der Fahrzeugindustrie gesucht.

Grundsätzlich wurde und wird angesichts der Preisentwicklung bei Ölsaaten das Ziel verfolgt, die

[1] Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V, Reinhardtstraße 18, 10117 Berlin
[2] Österreichisches Biotreibstoff Institut, Graben 14/2, A-1014 Wien

Landwirtschaft über die pure Vermarktung von Biodiesel an der Wertschöpfung zu beteiligen. Inzwischen sind eine Vielzahl von Erzeugergemeinschaften entstanden, die sich auf die Produktion von Raps zur Herstellung von Food und Non Food Produkten spezialisiert haben, zum Teil selbst Ölmühlen für die Belieferung von Biodieselproduktionsanlagen betreiben oder/und sich an Biodieselproduktionsanlagen beteiligen.

2 Situation

2.1 Biodieselproduktion

Gemessen am Stand von 1998 hat sich die Biodieselwirtschaft insbesondere in Deutschland insgesamt erheblich weiterentwickelt. Mit einer zu erwartenden Biodieselproduktionskapazität von etwa 1,1 Mio. Tonnen wird sich die Gesamtkapazität in dem genannten Zeitraum mehr als verzehnfacht haben (Abbildung 1). Die Umesterungskapazität schwankt zwischen den einzelnen Anlagen bedingt durch die gegebenen Investitionsmöglichkeiten erheblich (Tabelle 1). Unberücksichtigt sind praktisch bestehende Umesterungskapazitäten der oleochemischen Industrie, die in der Vergangenheit ebenfalls für den Kraftstoffmarkt Biodiesel hergestellt hatte, wie z. B. die SISAS AG (jetzt BASF), 60.000 Tonnen, Veluy, Belgien. Unabhängig von der Anlagengröße sind die Qualitätsanforderungen für Biodiesel gemäß der Kraftstoffnorm E DIN 51606 bzw. der zukünftigen europäischen DIN EN 14214 zu erfüllen. Im internationalen Vergleich hat Deutschland die Führungsposition bei der Kapazitätsentwicklung übernommen (Tabelle 2). Der „Produktionsabstand“ zu Frankreich und Italien hat steuerrechtliche Gründe. Die Produktionsmenge ist in den genannten Ländern an Mengenkontingenten gebunden, die von den jeweiligen Parlamenten jährlich festgelegt werden. In Deutschland gilt nach wie vor keine Obergrenze für die Biokraftstoffproduktion.

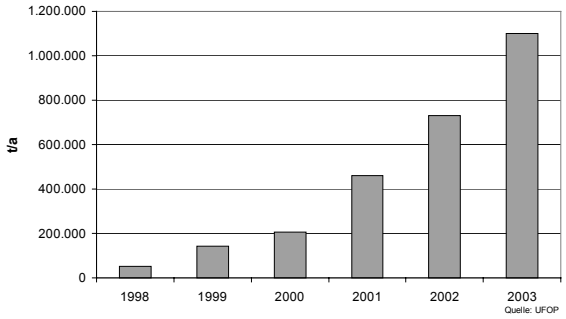


Abbildung 1:
Biodiesel-Produktionskapazität in Deutschland 1998 - 2003

Tabelle 1:
Biodieselanlagen in Deutschland 2003 (in Betrieb/im Bau)

In Produktion: **Betreiber**	**Ort / Bundesland**	**Kapazität (t/a)**	**Produktions-beginn**
Oelmühle Hamburg AG	Hamburg	120.000	09/2001
Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co. KG	Leer / Niedersachsen	100.000	09/1996
Mitteldeutsche Umesterungswerke Bitterfeld	Bitterfeld / Sachsen-Anhalt	100.000	09/2001
Natur Energie West	Marl / Nordrhein-Westfahlen	100.000	04/2002
NEVEST AG	Schwarzheide / Brandenburg	100.000	10/2002
Rheinische Bioester GmbH	Neuss / Nordrhein-Westfalen	100.000	12/2002
Campa Biodiesel GmbH	Ochsenfurt / Bayern	75.000	01/2000
Biodiesel Wittenberge GmbH	Wittenberge / Brandenburg	60.000	08/1999
Bio-Ölwerke Magdeburg	Magdeburg / Sachsen-Anhalt	50.000	03/2003
Thüringer-Methylesterwerke GmbH & Co. KG	Harth-Pöllnitz / Thüringen	45.000	01/2002
Petrotec GmbH	Südlohn / NRW	35.000	05/2002
SARIA Bio-Industries GmbH & Co. Verw. KG	Malchin / Mecklenburg Vorpommern	12.000	10/2001
Biodiese Bokel GmbH	Bokel / Niedersachsen	10.000	09/2002
Hallertauer Hopfen-Verwertungsgesellschaft	Mainburg / Bayern	8.000	04/1995
Landwirtschaftliche Produkt- Verarbeitungs GmbH	Henningsleben / Thüringen	5.000	04/1998
PPM Umwelttechnik GmbH & Co.KG	Oranienburg / Brandenburg	5.000	11/2001
BioWerk Sohland GmbH	Sohland / Sachsen	5.000	07/ 2002
BKK Biodiesel GmbH	Rudolstadt / Thüringen	4.000	12/2001
Verwertungsgenossenschaft Biokraftstoffe	Großfriesen / Sachsen	2.000	04/1996

Summe		**936.000**	
Anlagen im Bau:			
Betreiber	**Ort/Bundesland**		
Marina Biodiesel GmbH & Co. KG	Brunsbüttel / Schleswig-Holstein	100.000	
EOP Elbe Oel AG	Falkenhagen / Brandenburg	30.000	
Biodiesel Kyritz GmbH	Kyritz / Brandenburg	28.000	
Kartoffelverwertungsgesellschaft Cordes & Stoltenburg GmbH & Co.	Schleswig / Schleswig-Holstein	10.000	
BioWerk Kleisthöhe GmbH	Uckerland / Brandenburg	5.000	
Summe		**173.000**	

Tabelle 2:
Biodieselkapazitäten in den einzelnen Ländern Europas

Land	Kapazität in t/a
Deutschland	1.109.000
Frankreich	440.000
Italien	350.000
Tschechien	60.000
Dänemark	60.000
Österreich	45.000
Schweden	30.000
Großbritannien	30.000
Summe	*2.124.000*

Quelle: Eigene Recherche

2.2 Aktionsplan der Europäischen Union

Die Vorschläge der EU-Kommission zur Förderung von Biokraftstoffen werden der Biokraftstoffproduktion in der sich erweiternden Europäischen Union einen nachhaltigen Impuls geben. Grundsätzlich haben sich EU-Kommission, die zuständigen EU-Räte sowie das Europäische Parlament auf die Änderung der Mineralölsteuerstrukturrichtlinie sowie den Aktionsplan [2] der EU-Kommission zur Einführung von Mindestanteilen von Biokraftstoffen am Verbrauch herkömmlicher Kraftstoffe verständigt (Tabellen 3 und 4).

Tabelle 3:
Kraftstoffverbrauch (in tausend t RÖE) in der Europäischen Union im Verkehrssektor 1998

Land	**Benzinverbrauch**	**Dieselverbrauch**	**Gesamt**
Österreich	2.130	3.224	5.354
Belgien	2.514	4.852	7.366
Dänemark	2.016	1.711	3.727
Finnland	1.846	1.776	3.622
Frankreich	14.554	26.603	41.157
Deutschland	30.080	24.834	54.914
Griechenland	3.106	2.245	5.351
Irland	1.307	1.429	2.736
Italien	17.880	16.138	34.018
Luxemburg	541	685	1.226
Niederlande	4.112	5.067	9.179
Portugal	2.030	2.863	4.893
Spanien	9.018	16.215	25.233
Schweden	4.021	2.374	6.395
Großbritannien	2.1882	16.597	38.479
Gesamt	117.037	12.6613	24.3650

Quelle: EU-Kommission (KOM (2001) 547 endg.

Tabelle 4:
Biokraftstoffproduktion in der Europäischen Union

Jahr/Mindestanteil (Basis 1998)	Benzinverbrauch	Dieselverbrauch	Gesamt
2005/2,00%	2.341	2.532	4.873
2006/2,75%	3.219	3.482	6.701
2007/3,50%	4.096	4.431	8.527
2008/4,25%	4.974	5.381	10.355
2009/5,00%	5.852	6.331	12.183
2010/5,75%	6.730	7.280	14.010

Quelle: D. Bockey, UFOP nach Angaben der EU-Kommission (KOM (2001) 547 endg.

Im Rahmen seiner ersten Lesung hatte das Europäische Parlament den Richtlinienvorschlag der Kommission mit 58 Änderungsvorschlägen gebilligt. Die wichtigsten Änderungen sind:

- Beibehaltung der vorgegebenen Mengenanteile als verbindliche Mengenanteile von Biokraftstoffen an der Gesamtmenge verkaufter Kraftstoffe.
- Ablehnung der Zwangsbeimischung von Biokraftstoffen
- Mitgliedstaaten, die besondere Schwierigkeiten mit der Einhaltung der vorgegebenen Mengenziele haben, können auf Antrag auf zwei Jahre befristet befreit werden.
- Biodiesel muss als Treibstoff die Norm DIN EN 14214 für Fettsäuremethylester erfüllen.
- Biokraftstoffe, die in Reinform oder in Beimischungen von über 5 % vertrieben werden, müssen als solche gekennzeichnet werden.
- Der Nutzung von Biokraftstoffen in öffentlichen Verkehrsmitteln und Taxis wird besonderer Vorrang gegeben.
- Die Mitgliedstaaten melden der Kommission jährlich – erstmals zum 1. Juli 2004 – die Maßnahmen, die sie zur Erreichung der Mengenvorgaben in Anhang B vorgenommen haben.
- Die Kommission erstellt bis spätestens 31.12.2006 und danach alle zwei Jahre einen Bewertungsbericht über die Fortschritte bei der Verwendung von Biokraftstoffen.

Erfreulicherweise macht auch die dänische Ratspräsidentschaft Druck, dass noch im laufenden Jahr der Richtlinienvorschlag verabschiedet wird und folglich in den Mitgliedsländern umgesetzt werden muss.

Durch die Änderung des Mineralölsteuergesetztes vor der parlamentarischen Sommerpause hat die Bundesregierung die mineralölsteuerrechtlichen Voraussetzungen geschaffen, bis zum Jahr 2008 Biokraftstoffe von der Mineralölsteuer zu befreien. Auf Antrag bei der EU-Kommission kann diese Frist verlängert werden.

2.3 Absatzentwicklung

Über die Vermarktung Biodiesel pur oder als Zumischungskomponente zum Dieselkraftstoff wurde inzwischen vielfach diskutiert. Unbestritten sind allerdings die inzwischen erzielten Erfolge bei der Vermarktung von purem Biodiesel in Deutschland und Österreich. In den genannten Ländern ist Biodiesel kein „No-Name-Produkt“ mehr, der Alternativkraftstoff ist heute allgemein bekannt.

Die pure Vermarktung eröffnet zwangsläufig eine Reihe von Positivargumenten zur Verbesserung der Akzeptanz dieses Kraftstoffes beim Verbraucher, aber auch in der Politik wie z.B.: Biologische Abbaubarkeit, Verringerung der Abgasemissionen, Biodiesel ist kein Gefahrgut usw..

Biodiesel wird heute in Deutschland an über 1.500 und in Österreich an über 100 öffentlichen Tankstellen angeboten (Abbildung 2). Die Vermarktung von Biodiesel über das öffentliche Tankstellennetz wird auch in Zukunft weiter ausgebaut werden. Für sog. „Freie Tankstellen“ ist Biodiesel inzwischen ein wichtiges Ergänzungsprodukt um im ruinösen Wettbewerb des Tankstellengewerbes bestehen zu können. 2003 werden mehr als 1700 Tankstellen und damit jede 10. öffentliche Tankstelle in Deutschland Biodiesel anbieten.

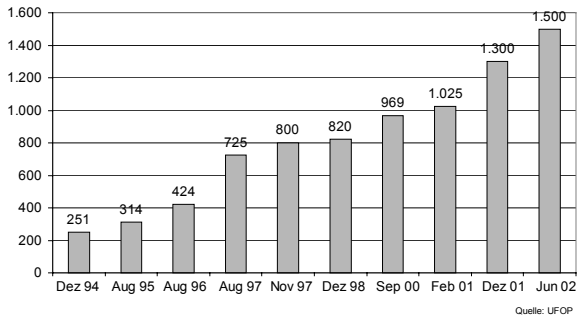


Abbildung 2:
Entwicklung des Biodiesel-Tankstellennetzes in Deutschland 1994 - 2002

Nach einer Erhebung der Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V. werden etwa 30 % des Biodiesels über öffentliche Tankstellen abgesetzt, 70 % über Großkunden, also Flottenbetreiber des Transportgewerbes, Taxiunternehmen usw.

Insgesamt wurden 2001 ca. 450.000 Tonnen Biodiesel abgesetzt, für das laufende Jahr wird nochmals ein Anstieg um 100.000 Tonnen erwartet. Die dargestellte Absatzentwicklung (Abbildung 3) zeigt jedoch ebenso auf, dass die Nachfrageentwicklung mit dem Kapazitätszuwachs nicht Schritt hält. Trotz der Zunahme der Marktakteure bei der Vermarktung von Biodiesel, insbesondere auf der Großhandelsstufe, führt der Angebotsüberhang zu einem Wettbewerb, der sich in einen Preisvorteil zugunsten der Fahrzeughalter im Vergleich zum Dieselkraftstoff niederschlägt.

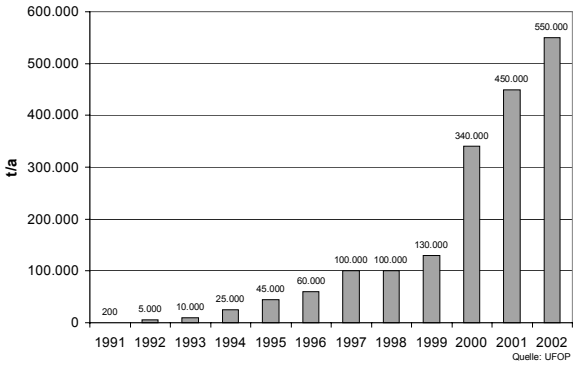


Abbildung 3:
Biodiesel – Absatz in Deutschland

Aufgrund der dargestellten Kapazitätsentwicklung ist vorläufig nicht zu erwarten, dass eine Entspannung eintritt. Diesen Preisvorteil können jedoch nur diejenigen Fahrzeughalter „mitnehmen“, die über ein entsprechend für den Biodiesel freigegebenes Fahrzeug oder einer entsprechenden Fahrzeugflotte verfügen. Die dargestellte Absatz- bzw. Gesamtentwicklung wäre ohne die Freigabenerteilungen von Seiten der führenden deutschen Fahrzeughersteller nicht möglich gewesen. Schätzungsweise 2,5 – 3 Mill. für Biodiesel freigegebene Fahrzeuge bilden das „Kundenpotenzial“ für die Biodieselwirtschaft. Die Biodieselwirtschaft ist daher auch in Zukunft sehr daran interessiert, dass die Freigabenerteilungen fortgeführt und soweit möglich in Zusammenarbeit die technischen Voraussetzungen hierfür geschaffen werden.

Ebenso ist nicht auszuschließen, dass deutsche Biodieselhersteller bzw. Unternehmen der Großhandelsstufe als Biodieselexporteure auftreten. Schließlich gelten in der EU die Binnenmarktregeln für ungehinderten Warenverkehr. Nationale Kontingentsregelungen widersprechen diesen Regeln.

2.4 Entwicklungen außerhalb Europas

Insbesondere in den USA wird ebenfalls die Produktion und Vermarktung von Biodiesel vorangetrieben. Der Biodieselabsatz für das Jahr 2001 wird nach Angaben der American Soybean Association (ASA) auf etwa 54.000 Tonnen geschätzt. In den USA wird Biodiesel in Mischungen zur Verbesserung der Schmierfähigkeit oder auch als so genannter B-20-Biodiesel angeboten. Der Mischungsanteil Biodiesel beträgt 20 %. Die Abstimmung über eine Kraftstoffspezifikation (D 6751) für Biodiesel pur (B 100) [3] wurde abgeschlossen. Biodiesel gemäß diesem Standard kann Dieselkraftstoff bis zu 20 % (B 20) zugemischt werden.

Biodiesel erfährt inzwischen in den USA eine erhebliche politische Unterstützung von Seiten des Kongresses und des Senates für die Schaffung und Verbesserung der steuerrechtlichen und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen. Das Energieministerium hat Biodiesel als Alternativkraftstoff für Fahrzeugflotten gemäß dem „Energy Policy Act“ anerkannt. Hiermit verbunden sind Vorteile beim Bezug von Fahrzeugen, wenn diese mit Biodiesel betrieben werden.

Biodiesel ist zudem die einzige Kraftstoffalternative, die vom amerikanischen Bundesumweltamt (Environment Protection Agency) anerkannt, bezüglich der im Vergleich zu Dieselkraftstoff günstiger zu bewertenden Wirkungen der Abgasemissionen auf die menschliche Gesundheit. Die Vermarktung von Biodiesel in den USA konzentriert sich deshalb vor allem auf umweltsensible Bereiche, wie zum Beispiel den Einsatz in Ballungsgebieten oder auch von Biodiesel pur in der Schifffahrt.

Darüber hinaus hat inzwischen der Staat Minnesota das Mandat erteilt, Dieselkraftstoff 2 % Biodiesel zuzumischen.

2.5 Rohstoffversorgung

Der Weltverbrauch an Ölen und Fetten stieg von 1991/92 von 81,8 Mio. t auf 120,6 Mio. t im Jahr 2001/2002. Der Zahlenvergleich zeigt, dass zum einen die Nachfrage nach Ölen und Fetten gestiegen ist, aber auch andererseits, dass die Produktion der gestiegenen Nachfrage ohne weiteres folgen konnte (Abbildungen 4 und 5). Nicht zuletzt aufgrund der Überschusssituation am Weltmarkt für Getreide, bestehen noch erhebliche Flächenreserven für die Produktion von Ölsaaten. Die Weltölsaatenproduktion betrug 2001/2002 ca. 320 Mio. t. Weltweit ist Soja gefolgt von Raps die wichtigste Ölsaat (Abbildung 6). Auf mehr als 200 Mio. ha werden weltweit Ölsaaten angebaut, wobei die Produktivität seit Anfang der

90er Jahre stärker zugenommen hat als die Anbaufläche (Abbildung 7). Die Produktivitätsentwicklung ist bei Getreide noch deutlicher. Der durchschnittliche Ertragszuwachs bei Getreide beträgt etwa 1,3 % jährlich. Gemessen an der Getreideproduktion in Deutschland in Höhe von ca. 44 Mio. t entspricht ein Getreideertragszuwachs in Höhe von 1 % einem Flächenäquivalent von ca. 70.000 ha. Die im Aktionsplan ausgewiesenen Mengenziele sind aufgrund des gegebenen Produktionspotenzials problemlos erfüllbar (Tabelle 5). Bei einer Flächenstilllegungsrate von zurzeit 10 % sind in Deutschland mehr als 1 Mio. ha stillgelegt, EU-weit ca. 7 Mio. ha. Das Flächenpotenzial für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen wird bedingt durch den technischen Fortschritt (Produktivitätssteigerung) und durch die bevorstehende Erweiterung der Europäischen Union das Flächenpotenzial erheblich zunehmen (Tabelle 6). Verständlicherweise sind deshalb die Beitrittskandidaten sehr daran interessiert, neue Absatzwege für diese frei werdenden Flächen zu erschließen. Gleichzeitig geht hiermit der Vorteil einher, dass diese im Fruchtwechsel genutzten Flächen, jederzeit in Abhängigkeit von der Versorgungs- bzw. Marktlage für die Nahrungsmittelproduktion herangezogen werden könnten. Unabhängig von der Flächenstilllegungsrate ist gemessen am Produktions-potenzial aufgrund der Gesamtackerfläche mit strukturellen Überschüssen, insbesondere im Getreidebereich zu rechnen, der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für die Produktion von Biodiesel oder auch Bioethanol entlastet damit die Überschussmärkte und trägt damit zusätzlich zur Einkommensstabilisierung in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum insgesamt bei.

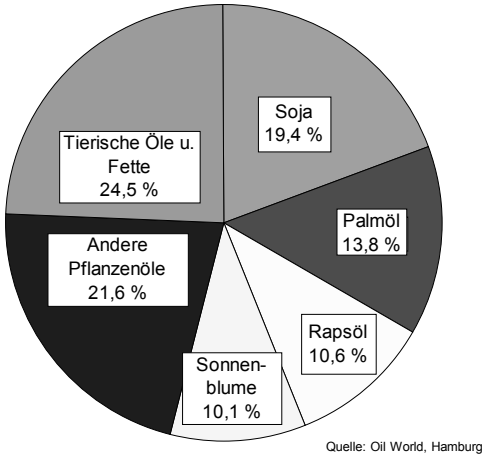


Abbildung 4:
Weltverbrauch Öle/Fette 1991/1992 (81,8 Mio t)

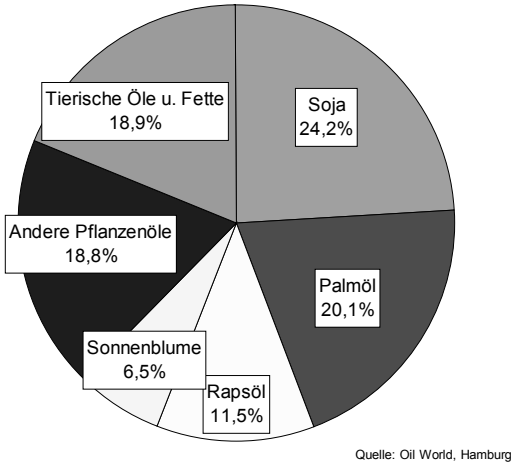


Abbildung 5:
Weltverbrauch Öle/Fette 2001/2002 (120,6 Mio t)

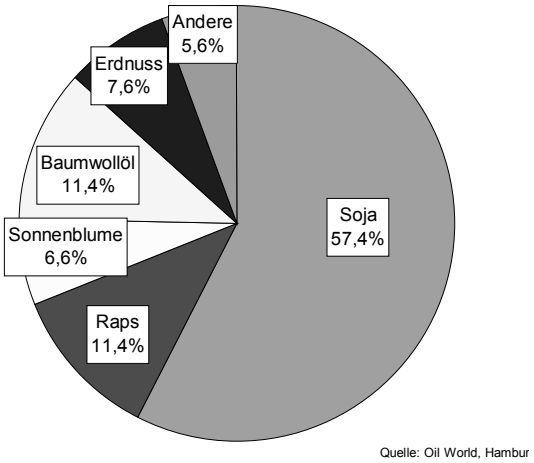


Abbildung 6:
Weltproduktion von Ölsaaten 2001/2002 (320,72 Mio t)

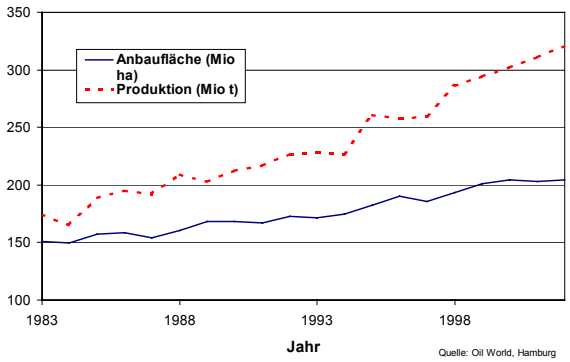


Abbildung 7:
Ölsaatenanbau weltweit: Flächen- und Produktionsentwicklung
- - - - - Produktion (Mio t) _____ Anbaufläche (Mio ha)

3 Schlussfolgerungen

Die Produktion von Biodiesel hat in den vergangenen Jahren einen auch von Experten nicht erwarteten Aufschwung genommen. Mit der zu erwartenden Verabschiedung der Richtlinie zur Förderung von Biokraftstoffen werden erstmals EU-weit einheitliche Rahmenbedingungen geschaffen. Diejenigen Mitgliedstaaten, die bisher noch keine Initiativen in diesem Bereich entwickelt haben, werden ebenfalls entsprechende Initiativen entwickeln und in die Produktion einsteigen. Ein besonders ausgeprägtes Interesse ist in den osteuropäischen EU-Beitrittsländern festzustellen, z. B. Polen, Estland, sofern nicht schon Kapazitäten bestehen. In Australien wird derzeit an der Erstellung einer Biodiesel-Norm nach europäischem Muster gearbeitet; mit Ende 2003 werden ca. 40.000 Tonnen Biodiesel produziert werden können.

Im Rahmen der Recherche zu diesem Beitrag musste jedoch auch festgestellt werden, dass die Zusammenarbeit auf internationaler Ebene auf der Biodieselherstellerseite angesichts der dargestellten Entwicklung erheblich verbessert werden muss. Hierzu gehört ebenfalls die Schaffung der entsprechenden Datengrundlage über Anbau und Verwertung, Vermarktungsstrategien, Kapazitätsentwicklung sowie die Abstimmung des und Durchführung der erforderlichen (vorausschauenden) Begleitforschung. Notwendig ist ebenfalls die Verbesserung des know-how-Transfers. Angesichts der zunehmenden motortechnischen Anforderungen besteht insbesondere hier Handlungsbedarf zur Verbesserung der Abstimmung der erforderlichen Forschungsaktivitäten von Seiten der Biodieselhersteller als Voraussetzung für den weiteren Marktverbleib und –zugang. Hierzu gehört ebenfalls, den Know-how-Transfer insgesamt zu verbessern. Es ist deshalb sehr zu begrüßen, dass die Internationale Energieagentur (IEA) eine Studie vergeben hat, weltweit durch eine unmittelbare Befragung der Biodieselhersteller den aktuellen Entwicklungsstand zu erfassen.

Das Rohstoffpotenzial ist weltweit gegeben, um Biodiesel nicht nur in Europa, sondern auch in Nord- und Südamerika sowie Asien zu einer beachtenswerten Kraftstoffalternative zu entwickeln. Damit dient Biodiesel auch der Ressourcenschonung und der Verringerung der Treibhausgase – die EU-Kommission hat in ihrer Begründung zu ihren Vorschlägen insbesondere auf diese Aspekte hingewiesen.

Literatur

[1] Richtlinie 92/81 EWG des Rates vom 19. Oktober 1992 zur Harmonisierung der Struktur der Verbrauchsteuern auf Mineralöle, Abl. L 316 vom 31.10.1992

[2] Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr und dein Bündel von Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen
Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Förderung von Biokraftstoffen
Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Änderung der Richtlinie 92/81/EWG bezüglich der Möglichkeit, auf bestimmte Biokraftstoffe enthaltende Mineralöle einen ermäßigten Verbrauchsteuersatz anzuwenden, KOM (2001) 547 endg., 2001

[3] NEWS National Biodiesel Board, ASTM Issues Biodiesel Fuel Standard [online], USA, zu finden in <http://www.biodiesel.org/pdf_files/ASTM_Spec_02.pdf> [zitiert am 22.07.2002]

[4] Mark Snyder Electric, Biodiesel: Fuel Fact Sheet. The clean, domestically produced, alternative to petroleum [online], USA zu finden in <http://www.marksnyderelectric.com/biodiesel.htm> [zitiert am 22.07.2002]

Tabelle 5:
Aktionsplan Biokraftstoffe der EU-Kommission
2005 – 2010 Entwicklung der Biokraftstoffproduktion in Deutschland

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Mengenziele	2%	2,75%	3,5%	4,25%	5%	5,75%
Ottokraftstoffe	26,9	26,3	25,7	25,1	24,5	23,9
Ethanol/ETBE	0,538	0,723	0,899	1,066	1,225	1,37
Hektaräquival.	0,269	0,362	0,45	0,533	0,613	0,685
Dieselkraftstoff	31,3	31,3	31,3	31,2	31,2	31,2
Biodiesel/Rapsöl	0,63	0,861	1,01	1,32	1,55	1,79
Hektaräquival.	0,45	0,615	0,721	0,943	1,11	1,30
Summe:						
Biokraftstoff- Produktion	1,168	1,584	1,909	2,386	2,775	3,168
Hektaräquival.	0,719	0,977	1,171	1,426	1,723	1,985

Durchschnittlicher Rapsölertrag: 1,4 t/ha; Bioethanolertrag bei Weizen: 2 t/ha; alle Angaben in Mio. t bzw. ha.
Quelle: D. Bockey, UFOP; nach Angaben der EU-Kommission, MWV, eigene Schätzung

Tabelle 6:
Nachwachsende Rohstoffe als Option zur Realisierung der Flächenstilllegung

Flächenstilllegung bei 10 % der Ackerfläche

Kenndaten zum Verhältnis Agrarflächen/Bevölkerung

In Deutschland: ca. 1.200.000 ha; in der EU (15): ca. 7.000.000 ha; in der EU (27): ca. 12.000.000 ha

	Ackerfläche in 1.000 ha	Ackerfläche/ Kopf in m²	Landw. Nutzfläche in 1.000 ha	Landw. Nutzfläche/ Kopf in m²	Landfläche in 1.000 ha	Bevölkerung in Mio. Einwohner
D	11.084	1.437	17.067	2.077	34.099	82,2
EU (15)	76.087	2.024	136.249	3.624	313.169	376,0
EU (27)	118.707	2.464	196.644	4.082	419.350	481,7
Welt	1.376.437	2.294	4.926.805	8.211	13.048.407	6000,0

Quelle: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten

Volkswirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Herstellung von Rapsmethylester (RME) in Deutschland

Manfred Schöpe[1]

Kurzfassung

Mit Hilfe der Input-Output-Analyse wird die Produktionskette Raps – Biodiesel hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen Effekte bewertet. Gedankliche Referenzsituation ist die deutsche Wirtschaft ohne die Existenz einer Biodieselerzeugung. Leistungen und Kosten von unmittelbar verdrängten Produktionsverfahren, z.B. des Anbaus von Getreide, sind als entgangene Leistungen oder eingesparte Kosten mit zu berücksichtigen. Die volkswirtschaftlichen Leistungen resultieren im wesentlichen aus dem Ersatz von Rohöl- resp. Dieselimporten durch inländisch erzeugten Biodiesel sowie den Ersatz importierten Sojaschrots durch Rapsschrot, aus dem Anfall des hochwertigen Glycerins und der Einsparung von Interventionskosten bei Getreide. Die erwirtschafteten Einkommen aus nichtselbständiger Tätigkeit und aus Unternehmertätigkeit bewirken einen Anstieg der Konsumnachfrage. Die für die Herstellung und den Absatz von Biodiesel durchgeführten Investitionen haben sich unmittelbar auf die Investitionsgüternachfrage ausgewirkt. Die gestiegene Nachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern wiederum löst eine weitere Kette von Wirtschaftsaktivitäten aus, die mit Hilfe der Input-Output-Analyse quantifiziert werden können. Dank der Freistellung von der Verbrauchsteuer hatte sich der Wirtschaftszweig der Biodieselerzeugung in Deutschland während der vergangenen zehn Jahre gut entwickeln können. Damit entgehen dem Staat jedoch Einnahmen, die sich bei einer Biodieselproduktion von 955 500 t, wie im Modell für 2003 unterstellt, auf ca. 0,5 Mrd. € belaufen würden. Zusätzliche Steuereinnahmen und Sozialversicherungsbeiträge, die der Produktionskette Raps – Biodiesel zuzurechnen sind, kompensieren diese Einnahmeausfälle jedoch zu einem erheblichen Anteil. Dieser kann sich, je nach unterstelltem Preisszenario, auf 73 bzw. 83 % belaufen.

Zehn Jahre Biodieselerzeugung für den deutschen Markt

Seit 1993 wird in Deutschland Biodiesel für die Vermarktung hergestellt. Aus den ersten Anfängen hat sich, nicht zuletzt dank staatlicher Förderung, ein beachtlicher Wirtschaftszweig entwickelt, der zur Wertschöpfung unseres Landes einen Beitrag liefert. So konnten mit der inländischen Biodieselerzeugung des Jahres 2001 etwa 450 bis 500 Mill. Liter fossilen Diesels ersetzt werden, der anderweitig hätte importiert oder aus importiertem Rohöl in Deutschland hergestellt werden müssen. Gleichzeitig fiel als Kuppelprodukt Glycerin an, das zum überwiegenden Teil als destilliertes Glycerin, d.h. in Pharmaqualität, vermarktet wird. Die für die Biodieselherstellung zusätzlich erzeugten Rapssaaten haben nicht nur das Auftragsvolumen der Ölmühlen vergrößert, sondern über den Anfall von Rapsschrot, einem hochwertigen Eiweißfuttermittel, gut 450 000 Tonnen einzuführenden Sojaschrotes verdrängt. Die Produktionskette Raps – Biodiesel schafft Einkommen und trägt damit zu einer Expansion der Konsumnachfrage bei. Die notwendigen Investitionen in Verarbeitungskapazitäten und Logistik ihrerseits haben eine Nachfrage nach Investitionsgütern induziert. Die volkswirtschaftliche Leistung dieser Produktionskette Raps – Biodiesel schafft damit direkt wie auch indirekt zusätzliche öffentliche Einnahmen. Diese sind den bisher entstehenden Steuermindereinnahmen infolge der in Deutschland praktizierten Nichtbesteuerung gegenüberzustellen und bei einer gesamtwirtschaftlichen Bewertung der Aktivität Biodiesel mit zu berücksichtigen.

Die europäische Politik gibt Biokraftstoffen einen hohen Stellenwert

Wir befinden uns gegenwärtig in einer Zeit, in der sich nicht nur die deutsche sondern insgesamt die europäische Politik dem Einsatz von Biokraftstoffen verstärkt zuwendet. Angesichts der starken Abhängigkeit der europäischen Energiewirtschaft vom Rohöl als dem vorrangigen Energieträger und der im Kyoto-Protokoll vereinbarten Ziele zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen hat die EU-Kommission Pläne zur Förderung alternativer Energien entwickelt. Nachdem für die Herstellung und den Einsatz

[1] ifo Institut für Wirtschaftsforschung, Poschingerstr. 5, 81679 München

von Biokraftstoffen bereits ausgereifte und praxiserprobte Technologien zur Verfügung stehen, setzt die Kommission für die Erreichung ihrer Ziele kurz- bis mittelfristig vorrangig auf Maßnahmen zur Förderung von Biokraftstoffen. Mit mittel- bis längerfristiger Perspektive sollen im Verkehrssektor zusätzlich alternative Antriebstechniken mit Erdgas und Wasserstoff (in Brennstoffzellen) zum Einsatz kommen.

In einem Aktionsplan stellt die Kommission dazu eine Strategie vor, mit der bis zum Jahr 2020 eine 20%ige Substitution herkömmlicher Kraftstoffe erreicht werden soll. Als ersten Schritt sieht ein entsprechender Richtlinienvorschlag die Festlegung eines Mindestanteils von Biokraftstoffen an allen verkauften Kraftstoffen vor, der ab 2005 2% betragen und bis zum Jahr 2010 auf 5,75% steigen soll. Ein weiterer Richtlinienentwurf zielt darauf ab, den Mitgliedstaaten die Einführung eines ermäßigten Verbrauchsteuersatzes auf reine oder zugesetzte Biokraft- und -heizstoffe zu ermöglichen, der bis auf 50% des Steuersatzes auf mineralische Kraftstoffe abgesenkt werden kann. Für reine Biokraftstoffe, die im öffentlichen Nahverkehr (einschließlich Taxis) eingesetzt werden, können die Mitgliedstaaten entsprechend dem Vorschlag einen darüber hinausgehend ermäßigten Steuersatz bis hin zur Steuerbefreiung anwenden.

Für Länder wie Deutschland, die Biokraftstoffe bisher von einer Besteuerung ausgenommen hatten, soll ein Übergangszeitraum bis Ende 2003 gelten, in dem sich die Wirtschaft auf die neuen Gegebenheiten einer mindestens 50-prozentigen Besteuerung einstellen kann. Es besteht allerdings die Möglichkeit, dass betreffende Staaten Besitzstand geltend machen und nach einem Verfahren, das in der Mineralölsteuerrichtlinie vorgesehen ist, beim Rat der EU eine längerfristige/dauerhafte Fortführung der Verbrauchsteuerbefreiung beantragen können.

Der Vorschlag einer verminderten Besteuerung von Biokraftstoffen hat in der deutschen Fachöffentlichkeit für nicht geringe Unruhe gesorgt, zumal Befürchtungen auf der Hand lagen, dass der deutsche Finanzminister die Gunst der Stunde nutzen könnte und unter Berufung auf die EU-weite Regelung eine Besteuerung für Biokraftstoffe einführen würde. Mittlerweile (Stand Juni 2002) scheint klar, dass die Bundesregierung die steuerliche Freistellung von Biodiesel beibehalten will und auch andere Biokraftstoffe von der Verbrauchsteuer ausnehmen will. Damit sind Befürchtungen vom Tisch, dass der Absatz von reinem Biodiesel bei einer 50-prozentigen Besteuerung wegen der dann notwendigen Preiskorrekturen nach unten gegenüber fossilem Diesel nicht mehr konkurrenzfähig sein könnte. Allerdings muss die Bundesregierung einen entsprechenden Antrag auf Genehmigung durch den Rat nach der Mineralölsteuerstrukturrichtlinie stellen, bevor die Regelung zum Beginn des kommenden Jahres in Kraft treten kann.

Die Methode der Input-Output-Analyse

Die Input-Output-Analyse ist ein geeignetes und bewährtes Instrument, um die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen aller Aktivitäten, die in mittelbarem sowie unmittelbarem Zusammenhang mit der Produktionskette Raps – Biodiesel stehen, zu bewerten. Zu diesen Aktivitäten gehören

- Rapsanbau auf Stilllegungsflächen (Nonfood-Flächen) sowie
- Rapsanbau auf herkömmlichen Produktionsflächen (Food-Flächen),
- Ölgewinnung und Umesterung zu Biodiesel,
- Alle anfallenden Transport- und Handelsdienstleistungen.

Ebenfalls zu berücksichtigen sind alle mit dem Rapsanbau einhergehenden zusätzlichen Leistungen sowie die anfallenden Kuppelprodukte der Ölgewinnung und der Umesterung. Auftretende Verdrängungseffekte, sei es bei der Nutzung landwirtschaftlicher Flächen, sei es auf den Produktmärkten für das Hauptprodukt Biodiesel oder die verschiedenen Kuppelprodukte, sind ebenfalls entsprechend zu bewerten.

Unter gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen sind insbesondere die Veränderungen von Größen wie Sozialprodukt, Beschäftigung, Einkommen aus abhängiger Beschäftigung sowie aus Unternehmertätigkeit und Vermögen, privater Verbrauch, Kapitalverbrauch (Abschreibungen), das Steueraufkommen u.v.m. zu verstehen. Die Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes bilden den Ausgangspunkt für die Berechungen der angeführten volkswirtschaftlichen Effekte. Diese bilden die güter- und produktionsmäßigen Verflechtungen innerhalb der gesamten Volkswirtschaft sowie zum Rest der Welt ab. Die vorliegenden amtlichen Tabellen für das Jahr 1995 werden hinsichtlich der Produktivitäts- und Preisentwicklungen auf das Jahr 2000 aktualisiert. Zur modellmäßigen Erfassung der Produktionskette Raps – Biodiesel werden eigene Sektoren formuliert und mit ihren jeweiligen mengen- und wertmäßigen Verflechtungen in das Gesamtsystem der Input-Output-Rechnung integriert.

Die Input-Output-Analyse bietet den Vorteil, dass neben den direkten Wirkungen einer wirtschaftlichen Aktivität, also z.B. der Einführung der Produktionskette Raps – Biodiesel, auch alle indirekten Effekte der Vorleistungsverflechtung und die über die erzielten Einkommen zusätzlich angestoßene Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen und den daraus wiederum resultierenden Effekten erfasst werden können. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung

wurde ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, wie sich in der Gesamtfolge die Staatseinnahmen durch das Biodieselengagement der deutschen Wirtschaft verändern unter der Annahme, das Biodiesel weiterhin steuerbefreit bleibt.

Einschränkend ist jedoch festzustellen, dass es sich um einen quantitativ-statischen Modellansatz handelt. Die tatsächlichen dynamischen Reaktionen und Prozesse auf den Märkten sind im Einzelnen nicht vorhersehbar. Es können nur konditionierte Aussagen getroffen werden, die im Lichte der eingeflossenen Annahmen bewertet werden müssen. Damit erhalten diese einen ganz entscheidenden Stellenwert. Als Referenzsituation wird die deutsche Wirtschaft ohne die Aktivität bzw. Produktionskette Raps – Biodiesel herangezogen. Unterstellt ist dabei eine hypothetische Situation für das Jahr 2003, für die die im Folgenden beschriebenen Annahmen gelten.

Annahmengerüst zur landwirtschaftlichen Produktionsebene

Zu den die landwirtschaftliche Produktionsebene betreffenden Annahmen für 2003 gehört die Fortführung der Flächenstillegung, wobei der Anbau von Ölsaaten entsprechend dem Blair-House-Abkommen auf den sog. Nonfood-Flächen EU-weit nach wie vor begrenzt ist (Aufkommen von max. 1 Mill. Tonnen Sojaschrotäquivalent). Aus diesem Grunde wird für Deutschland ein Anbau von Raps auf Nonfood-Flächen lediglich im Umfang von 350 000 ha veranschlagt. Als Folge eines wachsenden Biodieselmarktes wird angenommen, dass weitere 350 000 ha Raps auf herkömmlichen Food-Flächen zur Verwertung für Biodiesel angebaut werden. Angesichts hoher Ölsaateneinfuhren in den vergangenen Jahren wird für das Modell unterstellt, dass es infolge des Rapsanbaus zur Verwendung für Biodiesel zu keiner Einschränkung des Food-Rapsanbaus kommt, so dass von einer Ausweitung des Rapsanbaus auf nicht stillgelegten Flächen um 350 000 ha ausgegangen wird.

Die wichtigste betriebswirtschaftliche Alternative zur "Nutzung" stillgelegter Flächen in Deutschland ist die "aktive Begrünung". Die wirtschaftlichen Ansprüche und Erträge dieses "Produktionszweiges" sind daher quantitativ im Ansatz zu berücksichtigen.

Beim Anbau von Raps auf Food-Flächen wird davon ausgegangen, dass diese Aktivität insgesamt gesehen zu Lasten der Getreideerzeugung geht, auch wenn einzelbetriebliche Fruchtfolgeüberlegungen zu anderen Entscheidungen führen können. Daraus folgt, dass auch die wirtschaftlichen Ansprüche und Erträge der "entgangenen" Getreideerzeugung im Ansatz zu berücksichtigen sind. Dies schlägt sich nicht nur auf der Ebene der landwirtschaftlichen Erzeugung (z.B. bei den Vorleistungen), sondern auch auf der Ebene der Vermarktung nieder. Auf überschüssigen Märkten bedeutet eine verminderte Getreideproduktion Kostenersparnis bei der Intervention oder der Exporterstattung.

Flächenbeihilfen und Stilllegungsprämien sind nicht zu berücksichtigen, da die beiden jeweils konkurrierenden Produktionsverfahren auf Food- wie auch auf Nonfood-Flächen unter den Bedingungen des Jahres 2003 auch mit den jeweils gleichen Prämiensätzen bzw. Beihilfen bedacht werden. Damit ergibt sich weder für die empfangenden Landwirte noch für den Staat ein Unterschied.

In welchem Umfang tatsächlich Raps zur Biodieselproduktion auf Food-Flächen angebaut wird und in welchen Regionen dies geschieht, hängt ganz entscheidend von den zu erwartenden Raps- und Getreidepreisen ab und damit von der – regional unterschiedlich zu bewertenden – relativen Vorzüglichkeit der Rapserzeugung gegenüber der von Getreide. Rapsanbau auf – verkürzt ausgedrückt – Getreideflächen wird erst dann in nennenswertem Umfang erfolgen, wenn der Deckungsbeitrag von Raps, erhöht um dessen Vorfruchtwert, dem Deckungsbeitrag von Getreide entspricht. Die sich einstellende regionale Verteilung kann mit einem Input-Output-Modell nicht ermittelt werden. Anhaltspunkte sind u.a. Untersuchungen der Universität Kiel (Langbehn und Pleßmann 1998) zu entnehmen, die die relative Vorzüglichkeit von Raps auf verschiedenen Standorten und bei verschiedenen Preiskonstellationen ermitteln.

Für die volkswirtschaftlichen Effekte, die von der landwirtschaftlichen Produktionsebene ausgehen, sind die zu unterstellenden Preise für Raps und die Alternativfrucht Weizen von maßgeblicher Bedeutung. Lässt man die unterstellte Vorleistungsstruktur und die Annahmen über die Vorleistungskosten konstant und variiert die genannten Erzeugerpreise, so schlagen diese direkt auf die Deckungsbeiträge durch.

Wie bereits erwähnt, stellt der Vorfruchtwert von Raps aus einzelbetrieblicher Sicht ein nicht zu vernachlässigendes Kriterium für die Beurteilung der relativen Vorzüglichkeit von Raps in der landwirtschaftlichen Erzeugung dar. Er resultiert aus naturalen Mehrerträgen der Folgekultur, i.d.R. Getreide, sowie aus Kosteneinsparungen bei deren Anbau. Da sich diese "Nebenleistung" der Rapsproduktion monetär auswirkt, ist sie auch in die volkswirtschaftliche Bewertung einzubeziehen. In den hier vorgestellten Kalkulationen wurde der Vorfruchtwert von Raps mit etwa 153 €/ha veranschlagt.

Ein häufig übersehener Zusammenhang ist, dass infolge der Verdrängung von Getreide durch Raps der Umfang der mit Blütenpflanzen bestellten Ackerflächen entsprechend zunimmt. Um eine gute Rapsernte

zu erzielen, ist die Präsenz Blüten besuchender Insekten nützlich, was weitgehend durch gezielte Aktivitäten der Imkereiwirtschaft (Aufbau zusätzlicher Völker, Transport der Völker zu den Rapsstandorten) sichergestellt wird. Unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist daher auch die zurechenbare Honigproduktion als eine durch Erweiterung des Rapsanbaus induzierte Wertschöpfung zu betrachten und in das Gesamtmodell zu integrieren. Allerdings sollte man angesichts der dünnen Datenlage zur Imkereiwirtschaft nur mit vorsichtigen Ansätzen operieren. Für den Rapsanbau auf Stilllegungsflächen wurde kein zusätzlicher Honigertrag in Ansatz gebracht, weil auch bei den verschiedenen Verfahren der Begrünung Blütenpflanzen eine nicht geringe Rolle spielen.

Annahmengerüst zu den technischen Ebenen der RME-Herstellung sowie den Transport- und Handelsdienstleistungen

Transporte zwischen landwirtschaftlicher Erzeugungsebene und den Abnehmern Ölmühle bzw. Ausfuhrlager (bei der Alternative Getreide) sowie die zugehörigen Handelsdienstleistungen sind prinzipiell im Modell mit zu berücksichtigen. Da eine differenzierte Erfassung dieser Leistungen extrem aufwendig ist, wird bei Ölsaaten in einem vereinfachten Ansatz die Differenz zwischen dem Einstandspreis Ölmühle und Abgabepreis Landwirtschaft genommen und mit 20,45 € pro Tonne veranschlagt. Für die Transporte von Getreide zum Ausfuhrlager und zugehörige Handelsdienstleistungen, die denen von Rapssaat gegen zu rechnen sind, wird ein Satz zugrunde gelegt, der sich an den von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) verwendeten Transportpauschalen orientiert. Dieser liegt ebenfalls bei 20,45 € pro Tonne. Die weitere Aufteilung der Kosten für Transporte und Handelsdienstleistungen erfolgt in Anlehnung an andere (größere) Sektoren des Input-Output-Modells. Unter Transportgesichtspunkten ist die Rapsernte der gesamten Fläche von 700 000 ha der verdrängten Getreideproduktion von 350 000 ha gegenüberzustellen. Bei der unterstellten Ertragsrelation sind die zu transportierenden Mengen Raps und die nicht mehr für den Transport anstehenden Mengen Getreide gleich hoch, so dass sich die jeweiligen Effekte aufheben.

Das Größenspektrum bei den Ölmühlen reicht von kleinen Unternehmen mit nur örtlichem Rohwarenbezug bis hin zu Großanlagen der Food-Industrie. Ebenso ist es auch bei den Umesterungsanlagen, von denen die kleinsten eine Verarbeitungskapazität von 2000 Tonnen und die größten von 120 000 Tonnen aufweisen. Eine große fachliche Herausforderung war es, angesichts der unterschiedlichen Größenstrukturen die Kosten- und Vorleistungsstruktur so zu definieren, dass sie dem "Durchschnitt" in der deutschen Biodieselwirtschaft entsprechen. Dies gilt für Ölmühlen und Umesterungsanlagen gleichermaßen. Hinzu kommt, dass ein Teil der Anlagen im sog. Annexverfahren arbeitet, d.h. Ölerzeugung und Umesterung finden in unmittelbarer räumlicher Nähe zueinander und in einem Unternehmensverbund statt. Damit sind Transport- und Handlesdienstleistungen zwischen diesen beiden Ebenen nur für sog. Einzelanlagen zu berücksichtigen.. Bezüglich der Aufteilung wird angenommen, dass 400 000 Tonnen Rapsöl in Annex-Anlagen umgeestert werden und der Rest in Einzel-Anlagen Als Verarbeitungskosten wurden 102,25 € pro Tonne in Einzelanlagen veranschlagt, für Annex-Anlagen liegen die Kosten um ein Drittel niedriger.

Die Absatzkosten für das Endprodukt Biodiesel sowie für die Nebenprodukte Rapsschrot, Glycerin und Kalidünger bleiben unberücksichtigt, weil keine ausreichend detaillierten Informationen zu den Absatzwegen und –kosten dieser Produkte vorliegen. Außerdem müssten die "eingesparten" Transport- und Distributionskosten für die teilweise verdrängten Erzeugnisse (fossiler) Diesel und Sojaschrot gegengerechnet werden, so dass auch bei größter Akribi keine im volkswirtschaftlichen Maßstab nennenswerten Dimensionen herauskommen könnten.

Preisszenarien müssen vorgegeben werden

Da, wie bereits erwähnt, bei der Input-Output-Rechnung die sich einstellenden Preise nicht endogen ermittelt werden können, sondern exogen vorgegeben werden müssen, ist darauf zu achten, dass einerseits die Anzahl der Preisvarianten begrenzt bleibt, andererseits aber die an den Märkten stark variierenden Preise durch alternative und realistische Niveaus abgebildet werden. Für die wichtigsten im Modellansatz verwendeten Preiskomponenten wurden jeweils drei unterschiedlich hohe Niveaus formuliert. Dabei entspricht der mittlere Preis in der Regel einem Level, das rückblickend für die vergangenen Jahre als Mittel angesehen werden kann. Für die Modellkalkulation wird zunächst von diesem mittleren Preisniveau auf allen Ebenen ausgegangen. Diese Basisvariante wird im Folgenden mit "**m**" bezeichnet. Eine Hochpreisvariante, gekennzeichnet mit "**h**", liefert Ergebnisse, die, orientiert an der Vergangenheit, durchaus realistisch sind. Die Niedrigpreisvariante ist vor allem für die Landwirtschaft so wenig attraktiv, dass bei Fortbestehen eines solchen Preisniveaus mit Einbrüchen in der Erzeugung zu rechnen ist. Für die Quantifizierung volkwirtschaftlicher Effekte eines in der Zukunft liegenden Jahres hat sie daher wenig Relevanz.

Vorleistungsgefüge und Produktionskosten wurden auf allen Ebenen der Produktionskette Raps – Biodiesel als nicht zu variieren festgelegt. Auch die auf der Ebene der landwirtschaftlichen Erzeugung relevanten Alternativverfahren "aktive Begrünung" und "Getreideerzeugung" sowie die Honigerzeugung werden bezüglich ihrer Leistungen konstant gehalten.

Die für Rapssaat angesetzten Preise belaufen sich auf 204,50 € für die Variante **m** bzw. 255,65 € pro Tonne für die Variante **h** frei Ölmühle. Geht man im Landesdurchschnitt von 20,45 € pro Tonne für Transporte und Handelsdienstleistungen (ab Hof – frei Ölmühle) aus und veranschlagt wegen des erhöhten Verwaltungsaufwands für Nawaro-Raps einen Preisabstand gegenüber "normalem" Raps von 5,11 € pro Tonne, ergeben sich damit für die Landwirtschaft folgende Preiskonstellationen:

Tabelle 1:
Landwirtschaft – Unterstellte Erzeugerpreise und Vorfruchtwerte

	Variante **m**	Variante **h**
Erzeugerpreis Raps		
auf Food-Flächen	186,62 €/t	237,75 €/t
auf Nonfood-Flächen	181,15 €/t	232,64 €/t
Erzeugerpreis Weizen	102,26 €/t	
Vorfruchtwert		
Raps	153,39 €/ha	
aktive Begrünung	76,69 €/ha	

Diesen Mittel- und Hochpreisszenarien wurden korrespondierende Öl- und Schrotpreise zugeordnet, wie sie sich unter Berücksichtigung der technischen und ökonomischen Relationen ergeben und auch in vergleichbarer Lage auf den Märkten zu beobachten waren. In diesem Kontext ist auch die unterschiedliche Wertigkeit von Raps- und Sojaschrot zu berücksichtigen. Orientiert am Gehalt verdaulichen Eiweißes, wurde für Rapsschrot eine Wertigkeit von 75 % unterstellt.

Tabelle 2:
Ölmühle – Unterstellte Abgabepreise und Kosten

	Variante **m**	Variante **h**
Abgabepreise		
Öl	511,29 €/t	613,55 €/t
Schrot	104,81 €/t	123,99 €/t
Verarbeitungskosten pro t Rapssaat	35,53 €/t	
Transport- u. Handelsdienstleistungen pro t Öl	12,78 €/t	

Es gehört zu den technischen Vorteilen von Biodiesel, dass dieser Biokraftstoff in Serienmotoren eingesetzt werden kann und eine beliebige Mischung mit herkömmlichem Diesel möglich ist. Für die Preisbildung bedeutet das, dass Biodiesel austauschbar ist und PKW-Fahrer sowie Flottenbetreiber mit einem oder mehreren für Biodiesel freigegebenen Fahrzeugen in der Regel preisorientiert einkaufen. Deshalb sind die auf dem Markt für Biodiesel erzielbaren Preise von den zum jeweiligen Zeitpunkt maßgeblichen Dieselpreisen bzw. den Rohölpreisen auf dem Weltmarkt sowie dem Dollarkurs abhängig. Auch für 2003 wird gegenüber Dieselkraftstoff ein Preisabschlag von 9,2 Cent / Liter frei Tankstelle unterstellt, wie er sich bisher auf dem Markt weitgehend herausgebildet hat. Ab Umesterungsanlage wird mit einem mittleren Preisniveau von 0,51 € pro Liter gerechnet, das Hochpreisniveau ist mit 0,64 € pro Liter angesetzt.

Tabelle 3:
Umesterung – Unterstellte Abgabepreise und Kosten

	Variante **m**	Variante **h**
Abgabepreise		
RME	511,29 €/t	613,55 €/t
Glycerin	920,33 €/t	920,33 €/t
Kaliumsulfat	102,26 €/t	
Verarbeitungskosten		
in Annexanlagen	102,26 €/t	
in Einzelanlagen	68,00 €/t	

Im Modellansatz wird aus Vereinfachungsgründen davon ausgegangen, dass durch die inländische Biodieselproduktion Einfuhren von fossilem Diesel verdrängt werden (entspr. ca. 15 bis 16% der Dieseleinfuhren der vergangenen Jahre). Damit kommt es im Modell nicht zu einer Verminderung der bisherigen Verarbeitung von Rohöl in Deutschland.

Bei der Festlegung der Glycerinpreise wird unterstellt, dass im Jahre 2003 das gesamte anfallende Rohglycerin destilliert und als Pharmaqualität abgesetzt wird. Beim Absatz von Glycerin und Kaliumsulfat ist grundsätzlich von offenen Märkten mit regen weltweiten Austauschbeziehungen auszugehen, so dass es durch eine zusätzliche Herstellung dieser beiden Produkte auf dem deutschen Markt selbst zu keinen direkten Verdrängungsprozessen kommen wird. Angesichts des weiter steigenden Angebots von Glycerin wird jedoch kein gesondertes Hochpreisniveau angesetzt.

Erzeugung von Raps für Biodiesel vermindert Interventionsbedarf bei Getreide

Die Kosten der Intervention sind alle anfallenden Kosten, die mit dem Aufkauf, der Lagerung und dem Verkauf von Getreide durch Interventionsstellen in Zusammenhang stehen. Sie können nur, gestützt durch Erfahrungswerte der vergangenen Jahre, plausibel gesetzt werden. In der Vergangenheit beliefen sich die Kosten der Intervention auf ca. 51,13 € je Tonne. Niedriger lagen im Allgemeinen die Erstattungen beim Export. Da ab 2001 ein vergleichsweise niedriger Interventionspreis von 101,31 € pro Tonne gilt, ist auch für das Jahr 2003 mit niedrigeren Erzeugerpreisen als bisher und damit auch mit einem geringeren Erstattungsbedarf bei Exporten zu rechnen. Je nach Marktlage auf dem Weltmarkt konnten in der Vergangenheit Erstattungsbeträge von bis zu 40,90 € je Tonne Getreide fällig werden. Für die Zukunft ist vielleicht mit einem durchschnittlichen Satz von 20,45 € pro Tonne zu rechnen.

Eingesparte Interventionskosten nehmen keinen Einfluss auf die modellinternen Rechengänge. Sie sind gesondert zu kalkulieren und können als Einsparung an Staatsausgaben ähnlich wie zusätzliche Steuereinnahmen bzw. Steuerrückflüsse gewertet werden.

Zusätzliche Einnahmen kompensieren entgangene Mineralölsteuer weitgehend

Bei einem Mineralölsteuersatz von 0,47 € je Liter Dieselkraftstoff für 2003 entgehen dem Staat bei einem Biodieselverkauf in Höhe der hier unterstellten Erzeugung von 955 500 Tonnen Biodiesel Steuereinnahmen von 497,5 Mill. €. Zusammen mit weiteren Mindereinnahmen, die aus entfallenden Importabgaben resultieren, belaufen sich die zu veranschlagenden Einnahmeausfälle auf insgesamt 501 Mill. €.

Auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, dass die Produktionskette Raps – Biodiesel zur Entstehung von Arbeitnehmereinkommen und Einkommen aus Unternehmertätigkeit und Vermögen beiträgt. Diese belaufen sich bei der Preisvariante **m** originär auf 524,6 Mill. €, bei der Preisvariante **h** auf 690,8 Mill. €. Durch den Keynesschen Multiplikator und den Akzeleratoreffekt erhöhen sich diese auf 807,8 Mill. € bzw. 1,03 Mrd. €. Während der Keynessche Multiplikator dazu dient, die durch zusätzliche Einkommen induzierte Konsumnachfrage zu quantifizieren, bezieht sich der Akzelerator auf den Kapitalverbrauch (Abschreibungen) und die dadurch induzierten Reinvestitionen. Der durch Biodiesel hervorgerufene volkswirtschaftliche Einkommenszuwachs entspricht einer zusätzlichen Beschäftigung von 18 230 Personen bei der Preisvariante **m**, die sich aus Selbständigen, abhängig Beschäftigten und mithelfenden Familienangehörigen zusammensetzen, und bei der Preisvariante **h** sind es 19 720. Dabei sind etwa 40 % der zusätzlichen Beschäftigung allein den beiden genannten Multiplikatoreffekten zu verdanken.

Angesichts des raschen Strukturwandels auf der landwirtschaftlichen Produktionsebene ist es jedoch problematisch, von einem Zuwachs an Arbeitsplätzen zu sprechen. Es handelt sich jedoch um zusätzliche Arbeitsvolumina, die entlohnt werden, und für die in typischen landwirtschaftlichen Einzelbetrieben zum Beispiel entsprechend mehr der verfügbaren Familienarbeitskraft eingesetzt wird. In landwirtschaftlichen Betrieben mit Fremdarbeitskräften, wie sie in Ostdeutschland weitgehend das Bild prägen, kann es sich dagegen durchaus um "echte" Arbeitsplatzeffekte handeln.

Die Steuerrückflüsse belaufen sich bei Variante **m** auf 154,7 Mill. €, bei Variante **h** auf 194 Mill. €. Zusammen mit den eingesparten Interventionskosten für Getreide, die mit 50,1 Mill. € angesetzt wurden, entspricht das 41 bzw. 49% des staatlichen Einnahmeausfalls. Rechnet man die Steuerrückflüsse aus der Imkerei in Höhe von 14 Mill. € dazu, erhöhen sich die Koeffizienten auf rund 44 bzw. 51 %. Neben der Finanzverwaltung profitiert auch das System der Sozialversicherung durch zusätzliche Einnahmen, die sich insgesamt (einschließlich Imkerei) auf 145,8 Mill. € (**m**) bzw. 158,8 Mill. € (**h**) belaufen. Diese "Rückflüsse" sind zwar nicht unmittelbar mit Steuerrückflüssen zu vergleichen, da ihnen zukünftige Leistungsansprüche gegenüberstehen. Ihnen kommt deshalb ein eigener argumentativer Stellenwert zu, der angesichts der Lage der Sozialversicherungskassen ebenfalls von Gewicht ist. Fasst man jedoch Steuerrückflüsse und zusätzliche Sozialversicherungseinnahmen zusammen, so belaufen sich die zusätzlichen kompensierenden Leistungen der Produktionskette Raps – Biodiesel auf 73 bzw. 83% der staatlichen Mindereinnahmen.

Tabelle 4:
Zusammengefasste Ergebnisse in Mill. €

	Variante m	Variante h
Einkommen aus nichtselbständiger Arbeit	462,16	499,69
Einkommen aus Unternehmertätigkeit und Vermögen	345,48	530,62
Abschreibungen	341,54	355,96
zusätzliche Einnahmen des Staates (**Steuer**)	154,67	193,98
Einsparung **Interventionskosten**	50,11	50,11
kalkulierte **Mindereinnahmen** des Staates	501,22	501,22
Rückflüsse/Einsparungen in Prozent der Mindereinnahmen des Staates	41 %	49 %
zusätzliche Einnahmen der **Sozialversicherung**	134,37	147,35
Rückflüsse/Einsparungen in Prozent der Mindereinnahmen des Staates	68 %	78 %
Steuerrückflüsse und Sozialversicherungseinnahmen aus **Imkerei**	25,41	25,41
Rückflüsse/Einsparungen in Prozent der Mindereinnahmen des Staates	73 %	83 %

Die genannten Werte dürften in Wirklichkeit sogar noch etwas höher liegen, weil aus Mangel an verlässlichen Daten nicht alle Ebenen induzierter Wirtschaftstätigkeit im Modell hatten berücksichtigt werden können. Dazu gehören

- besondere Transport- und Handelsdienstleistungen, die im Vertrieb von Biodiesel anfallen,
- die Investitionen in die Infrastruktur von Tankstellen und Handelslagern sowie
- die Investitionen und Arbeiten bei den Motoren- und Fahrzeugherstellern, die im Kontext mit der Herstellung der Biodieseltauglichkeit von Motoren, den jeweiligen Prüfvorgängen und den Freigaben stehen.

Fazit

Angesichts der ermittelten volkswirtschaftlichen Effekte der Produktionskette Raps – Biodiesel, insbesondere der weitgehenden Kompensation der Steuerausfälle bei einem Verzicht auf eine Einführung der Kraftstoffsteuer für Biodiesel, lässt sich die Ansicht vertreten, dass es gesellschaftlich zu rechtfertigen ist, die verbleibenden Mindereinnahmen den positiven Effekten des Einsatzes von Biodiesel anzurechnen. Diese bestehen in einem geringeren Ausstoß an Schadstoffen, was sich in Innenstadtbereichen günstig auswirkt, und vor allem in der leichten biologischen Abbaubarkeit, die insbesondere in umweltsensiblen Bereichen von großer Bedeutung ist. Der vorbeugende Boden-, Gewässer- und Trinkwasserschutz legt es geradezu nahe, auf den Einsatz von fossilen Treibstoffen überall dort zu verzichten, wo eine potentielle Gefährdung von Böden und Grundwasser resp. Trinkwasserreserven gegeben ist, zumal in der Form von Biokraftstoffen umweltverträgliche und unmittelbar einsetzbare Alternativen gegeben sind. Die Möglichkeiten, die die EU-Vorschläge in dieser Hinsicht einräumen, sollten von Seiten der nationalen Politik auf jeden Fall ausgeschöpft werden.

Literatur

Langbehn C, Pleßmann F (1998) Rapsanbau nach der Agenda 2000. Studie des Instituts für Agrarökonomie, Kiel.

Quellenhinweis

Die verwendeten Daten wurden zum Teil in Expertenrunden der betroffenen Wirtschaftskreise erarbeitet, zum Teil entstammen sie nicht veröffentlichten Unterlagen anerkannter Organisationen im Agrarbereich

The Speed of Sound and Bulk Modulus of Alkyl Esters and Their Blends with Diesel Fuel

Mustafa E. Tat, Jon H. Van Gerpen[1]

Abstract

Biodiesel is an oxygenated, sulfur-free, biodegradable, non-toxic, and environmentally friendly alternative diesel fuel. One of the attractive characteristics of biodiesel is that its use does not require any significant modifications to the diesel engine, so the engine does not have to be dedicated for biodiesel. However, due to changes in the physical and chemical properties of the fuel, a biodiesel-fueled engine may have different performance and emissions characteristics than the same engine fueled with petroleum-based diesel fuel. Biodiesel can be blended in any proportion with petroleum-based diesel fuel and the impact of the changes is usually proportional to the fraction of biodiesel being used. One of the most disturbing changes is the increase in NOx emissions from biodiesel-fueled engines. The objective of this study was to measure the density, speed of sound, and isentropic bulk modulus of biodiesel and the pure esters that are the constituents of biodiesel at temperatures from 20 °C to 100 °C and at pressures from atmospheric to 32.46 MPa. A secondary objective was the investigation of the effect of biodiesel blend level on these properties. These physical parameters are believed to be at least partially responsible for biodiesel's higher NOx.

Introduction

Although widely used in Europe, biodiesel is only recently achieving commercial status in the United States. Low prices for petroleum-based diesel fuel have made it very difficult for biodiesel to compete. However, current legislation in the state of Minnesota requires that 2% biodiesel be mixed with diesel fuel sold within the state by 2005. Proposed changes to federal tax policy may also provide enough financial incentives for the widespread use of biodiesel.

Federal legislation in the United States mandates that the Environmental Protection Agency (EPA) ensure that fuels and fuel additives do not pose a health risk. To enforce this requirement, the EPA has developed a registration program that requires the producer of fuels and fuel additives to submit the results of comprehensive testing of the potential health risk presented by the exhaust of engines fueled with these products. These data have been submitted to the EPA for biodiesel and show that the health risk posed by biodiesel is substantially less than that of petroleum-based diesel fuel (Sharp et al., 2000a, 2000b).

An important part of the fuel and fuel additives registration program was the complete characterization of the regulated emissions in the exhaust of 3 separate engines. The results of this testing is shown in Table 1.

While biodiesel reduces unburned hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and particulate matter (PM), it consistently increases oxides of nitrogen (NOx). This increase has been observed by many other researchers (Graboski, 1998) and is the source of some resistance to biodiesel use in urban areas.

The increase in NOx with biodiesel is an unexpected result. Biodiesel has a lower heat of combustion than diesel fuel and for the same volume of fuel injected into an engine, will give a lower flame temperature [Monyem et al., 2001a]. Since most engine-generated NOx is thermally based, biodiesel should have lower NOx emissions.

There have been suggestions that the 10-11% oxygen content of biodiesel may increase the local availability of oxygen for the nitric oxide (NO) formation reactions. This is unlikely since the oxygen from the fuel is a small fraction of the oxygen from

[1] Iowa State University, Mechanical Engineering Department, Ames, IA 50011, E-Mail: jvg@iastate.edu

the air. Since NO tends to form in the stoichiometric or fuel-lean portions of the post-flame gases, it is unlikely the small amount of oxygen contributed by the biodiesel could have a noticeable impact on NO. What is more likely is that the different physical characteristics of biodiesel are causing changes in the way the engine uses the fuel and these changes result in more NOx emissions.

Table 1:
Changes in Regulated Emissions with Biodiesel [derived from Sharp et al., 2000a, 2000b]

Engine	HC	CO	PM	NOx
Cummins N-14	-95.6	-45.3	-28.3	+13.1
DDC S-50	-83.3	-38.3	-49.0	+11.3
Cummins B5.9	-74.2	-38.0	-36.7	+4.3

The most significant change in the engine's operation may be injection timing changes caused by increases in fuel injection quantity in an attempt to keep the engine torque equal to diesel-only operation. Monyem et al. (2001a) and Monyem and Van Gerpen (2001b) showed that for fixed injection pump timing, the injection pressure pulse for the biodiesel was 1.5° – 2.0° advanced from the diesel fuel baseline. Changes in the injection pump static timing associated with the injection of the greater fuel volume needed to compensate for biodiesel's lower energy content were partially responsible for this timing change. Figure 1 shows a typical injection rate diagram for a rotary-style fuel injection pump. This type of pump has a fixed end of injection so when more fuel is needed, the timing for the start of injection is advanced. If a larger volume of fuel is injected to compensate for biodiesel's lower energy content, the resulting timing advance can cause an increase in NOx emissions (Tat and Van Gerpen, 1999; Tat and Van Gerpen, 2000a; and Tat et al., 2000b). Other types of fuel injection systems may have different relationships between fuel quantity and injection timing but all have the potential for timing changes.

This relation between injected fuel quantity and timing will also be affected by the type of emission test cycle used. A cycle which mandates a certain vehicle speed profile will require a greater volume of biodiesel to follow the specified speed-time curve than diesel fuel. Engine dynamometer testing has similar problems if the initial engine torque testing (mapping) is based on one fuel while later emissions testing is conducted on another.

There are other factors that can also affect NOx. One is that the cetane number and volatility of biodiesel are different. This can affect the amount of fuel that is burned in the premixed mode which, in turn, can affect NOx. Another factor, the primary subject of this paper, is that changes in the speed of sound and isentropic bulk modulus of the fuel can affect the rate of pressure rise in the fuel injection pump and the time required for the pressure pulse to propagate to the fuel injector. Previous work (Tat et al., 2000b) showed that changes in this property could explain up to 1° of timing advance in a pump-line-nozzle type fuel injection system.

The objective of the current project was to measure the isentropic bulk modulus and speed of sound of biodiesel at temperatures from 20 °C to 100 °C and at pressures from atmospheric to 32.46 MPa. These ranges should cover most of the commonly encountered start of injection conditions since many engines have nozzle opening pressures below 32.46 MPa. In addition to measuring the properties of biodiesel made from soybean oil, the

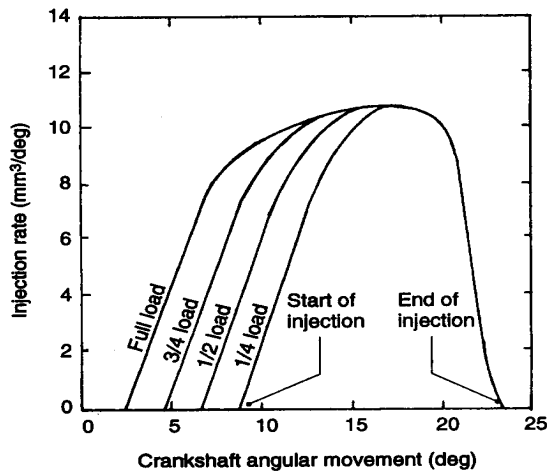


Figure 1:
Injection Rate for Different Injection Quantities for Rotary Style Injection Pump (Heisler, 1995)

properties of the pure ester constituents of biodiesel were also determined. The secondary objective of this study was the investigation of the effect of blending biodiesel with No. 1 and No. 2 diesel fuel on the density, speed of sound, and isentropic bulk modulus at higher pressures, and at 20 °C and 40 °C. Regression equations for the effect of temperature, pressure, blend level were also obtained.

Equipment and Experimental Procedures

Density and speed of sound were measured for 100% biodiesel (soy methyl ester) made by Iowa State University and commercial grade No. 1 and No. 2 diesel fuels. Also, blends of 20, 50, and 75% biodiesel with No. 1 and No. 2 diesel fuels were prepared and measured from atmospheric pressure to

32.46 MPa and at temperatures of 20 and 40 °C. The isentropic bulk modulus, which is the inverse of compressibility, was calculated at each pressure and temperature level using Equation 1 (Boelhouweer, 1967; Rolling and Vogt, 1960).

$$\beta = c^2 \times \rho \qquad (1)$$

where β is the isentropic bulk modulus in Pascal, c is the speed of sound in the sample in m/s, and ρ is the density in kg/m^3.

The ultrasonic pulse echo technique was used to measure the speed of sound in the fuel samples (McClements and Povey, 1992; Kuo, 1971; and McClements and Povey, 1988). A Panametrics Model 5072 PR general purpose ultrasonic pulser/receiver and a Panametrics 10 MHz videoscan immersion transducer (Waltham, MA) were used. A pressure vessel with a piston and cylinder assembly for raising the pressure was fabricated and the ultrasonic transducer was located at the bottom of the vessel. A cross sectional view of this pressure vessel is shown in figure 2. Signals were captured with a Hewlett Packard Model 54601A 100 MHz, 4 channel digital oscilloscope (Colorado Springs, CO). System pressure was measured using a Sensotec Model 2 Z/1108-04Z9 pressure transducer (Columbus, OH). To obtain elevated temperatures the entire pressure vessel was submerged in a temperature controlled bath. Detailed information about the pressure vessel and equipment was given in Tat et al. (2000b) and Tat and Van Gerpen (2002).

The density was initially measured at atmospheric pressure and temperatures of 20 °C and 40 °C using a modified specific gravity balance (Troemner Company, Philadelphia, PA). A copper graduated cylinder and a small constant temperature bath were adapted to the balance. The temperature change in the graduated cylinder was monitored with a thermocouple. A detailed explanation of this measurement was given in Tat and Van Gerpen, (2000a). Four measurements were taken at each temperature level and repeated two times. Therefore, at atmospheric pressure, 8 measurements were obtained. The balance was calibrated with distilled water to 1.0000 at 15.5 °C before the measurements. At higher pressures, the density was calculated using the volume change of the pressure vessel at each pressure level for two fillings and with 2 measurements at each temperature level.

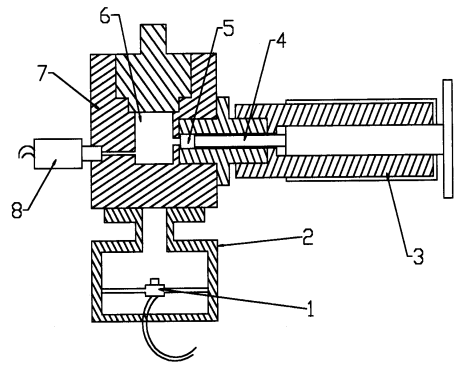


Figure 2:
Cross Section of the Pressure Vessel. [1 = 5MHz ultrasonic transducer, 2 = cooled chamber for transducer, 3 = pressure screw, 4 = plunger, 5 = piston, 6 = sample chamber, 7 = pressure vessel, 8 = pressure transducer.] (Tat et al., 2000b)

Results

Figures 3 and 4 show the effect of temperature at atmospheric pressure on the speed of sound and isentropic bulk modulus for fuels with different levels of saturation; methyl stearate, methyl oleate, methyl linoleate, and methyl linolenate. The isentropic bulk modulus tends to increase as the degree of unsaturation increases. The methyl linolenate appears to violate a trend of even increases in speed of sound and bulk modulus as unsaturation increases. This is because the purity of this sample was low. It was derived from linseed oil and contained substantial amounts of methyl palmitate, methyl oleate, and methyl linoleate. All of the compounds appear to have approximately the same property variation with temperature as indicated by similar slopes of the lines on these figures.

The property data for methyl butyrate, methyl laurate, methyl palmitate, and methyl stearate are provided in figures 5 and 6 to show the effect of

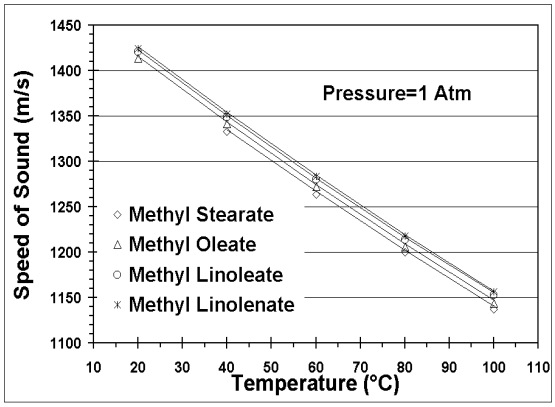


Figure 3:
Temperature dependent saturation effect on speed of sound at atmospheric pressure

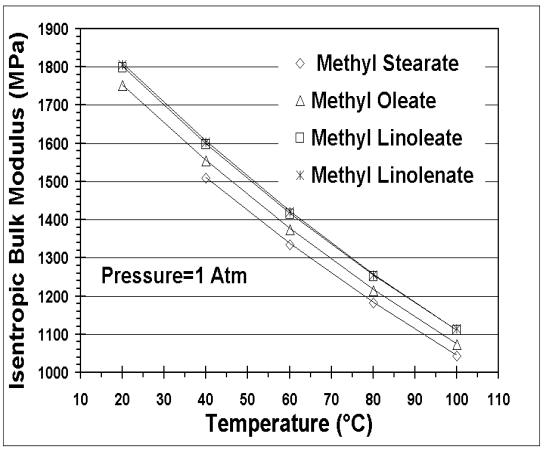


Figure 4:
Temperature dependent saturation effect on isentropic bulk modulus at atmospheric pressure

fatty acid chain length. These data demonstrate that the speed of sound and isentropic bulk modulus increase as the chain length increases which supports the observation made for hydrocarbons in Rolling and Vogt (1960).

The density, speed of sound, and the isentropic bulk modulus of the blends of biodiesel and No. 1 and No. 2 diesel fuel showed approximately linear relationships with pressure at the two temperature levels, 20 and 40 °C. A polynomial that was linear in temperature, pressure, and blend percentage was used to fit the density and isentropic bulk modulus data. This equation is shown in Equation 2. A more complex three variable polynomial was used to fit the speed of sound data for the blends with both No. 1 and No. 2 diesel fuel. The general form of this equation is shown in Equation 3.

$$y = C_1T + C_2P + C_3\% + C_4 \quad (2)$$

$$y = C_1T + C_2P + C_3\% + C_4TP + C_5P\% + C_6P^2 + C_7\%^2 + C_8 \quad (3)$$

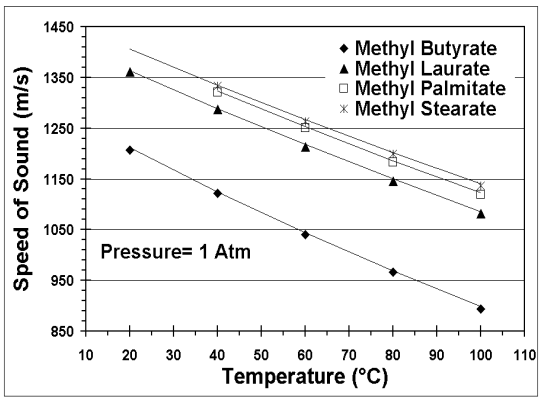


Figure 5:
Temperature dependent chain length effect on speed of sound at atmospheric pressure

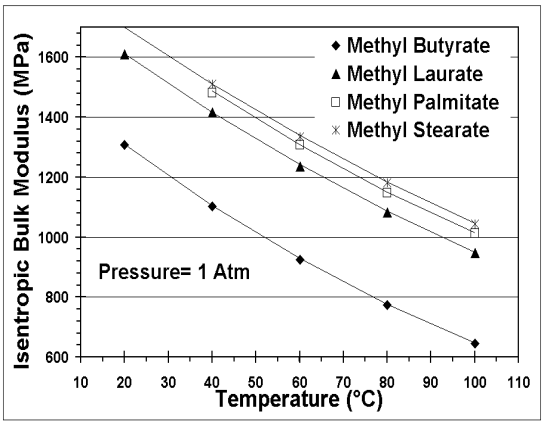


Figure 6:
Temperature dependent chain length effect on isentropic bulk modulus at atmospheric pressure

where y is the density, speed of sound, or the isentropic bulk modulus of the blends of No.1 and No. 2 diesel fuel with biodiesel fuel, T is the temperature in °C, P is the pressure in MPa, $\%$ is the biodiesel percentage in the blend, and C_i $i=1,8$ are the regression constants given in Tables 2-4. The R^2 values and the standard errors for y calculated by an Excel spread sheet are also shown in the Tables.

The density, speed of sound, and the isentropic bulk modulus of the No. 2 diesel fuel blends are presented in figures 7, 8, and 9, respectively at 20 °C. In figures 7 and 8, the points are the averaged measured values at each pressure level and the lines are the regression results calculated using Equations 2 and 3. Error bars represent the 90% confidence intervals. As can be observed from the figures, the density and the isentropic bulk modulus show very linear behavior with blend percentage at each pressure level. The speed of sound data were also linear with biodiesel percentage, but it was necessary to use higher degree polynomials to increase the regression accuracy. The density, speed of sound, and isentropic bulk modulus data also showed very linear behavior with pressure. Although not shown, results were similar at 40 °C to those at 20 °C.

Table 2:
Density regression constants

Samples	$C_1 \times 10^4$	$C_2 \times 10^4$	$C_3 \times 10^4$	$C_4 \times 10$	R^2	$Se_y \times 10^4$
No. 2 Diesel Fuel Blends	2.6324	5.8574	-6.5302	8.6671	0.9983	5.5
No. 1 Diesel Fuel Blends	5.9030	6.1040	-6.5757	8.3318	0.9991	7.2
Density (gr/cm^3) = $C_1 \times T(°C) + C_2 \times P(MPa) + C_3 \times$%(Biodiesel Percentage, 100) + C_4						

Table 3:
Speed of Sound regression constants

Sample	No. 2 Blends	No. 1 Blends
C_1	-3.5972	-3.7043
C_2	4.6849	5.0232
C_3 x 10	2.3682	6.5479
C_4 x 10^2	1.4412	1.4958
C_5 x 10^3	-3.9664	-6.9146
C_6 x 10^2	-1.6236	-1.7425
C_7 x 10^4	8.8429	11.8120
C_8 x 10^{-3}	1.4570	1.4147
R^2	0.9989	0.9990
$Se_y \times 10^4$	2.0	2.1
Speed of Sound (m/s) = $C_1 \times T(°C) + C_2 \times P(MPa) + C_3 \times$%(Biodiesel Percentage, 100) + $C_4 \times T \times P + C_5 \times P \times$% + $C_6 \times P^2 + C_7 \times$%^{2} + C_8		

Table 4:
Isentropic Bulk Modulus regression constants

Samples	C_1	$C_2 \times 10^{-1}$	C_3	$C_4 \times 10^{-3}$	R^2	Se_y
No. 2 Diesel Fuel Blends	1.1927	1.2170	-9.7434	1.8384	0.9985	6.8
No. 1 Diesel Fuel Blends	2.7763	1.2206	-9.6579	1.6727	0.9983	8.1
Isentropic Bulk Modulus (MPa) = $C_1 \times T(°C) + C_2 \times P(MPa) + C_3 \times$%(Biodiesel Percentage, 100) + C_4						

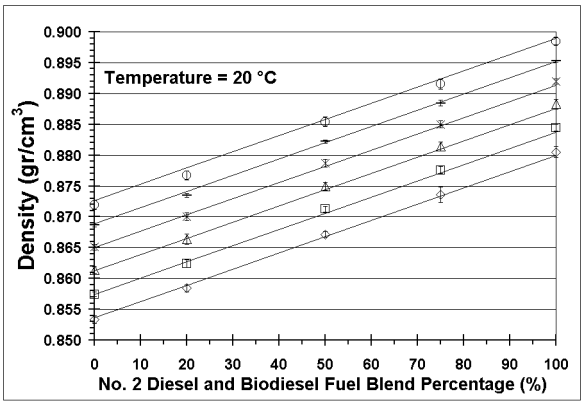


Figure 7:
Density comparison between measured data and regression equation (◊ P_0= 1 Atm, □ P_1= 6.46 MPa, Δ P_2= 13 MPa, × P_3= 19.5 MPa, – P_4= 25.69 MPa, ○ P_5=32.46 MPa, and —— Three variable regression (T, P, and %))

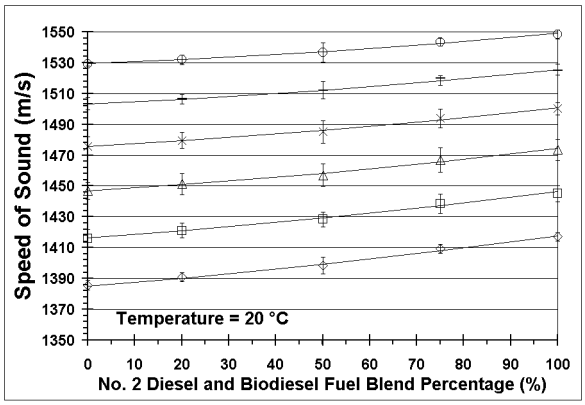


Figure 8:
Speed of sound comparison between measured data and regression equation. See figure 7 for legend

Conclusions

Biodiesel has different physical and chemical properties that provide its advantages over petroleum-based diesel fuel. However, these property differences can also provide disadvantages such as power loss and higher NOx emissions.

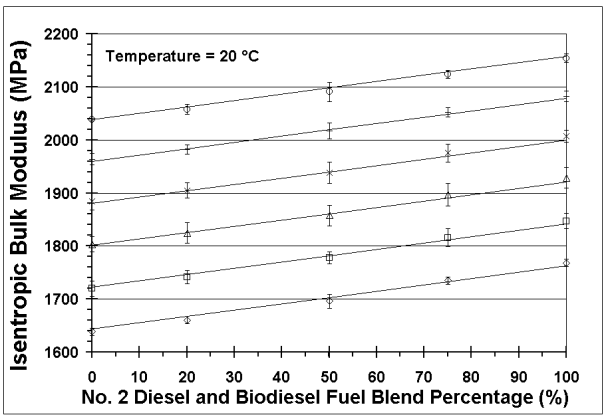


Figure 9:
Isentropic bulk modulus comparison between measured data and regression equation. See figure 7 for legend

Therefore, the blending effects on the fuel properties should be known and the detection of the blend level may be required in order to provide equal power and emissions.

In this study, a linear change in the density, speed of sound, and the isentropic bulk modulus with biodiesel blend percentage has been observed. Regression equations and constants as a function of temperature, pressure, and blend fraction were given.

References

Boelhouwer, J.W.M. (1967) Sound Velocities in and Adiabatic Compressibilities of Liquid Alkanes at Various Temperatures and Pressures. Physica, Vol. 34, 484-492.

Graboski, M.S. and McCormick, R.L. (1998) Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel engines. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24. 125-164.

Heisler, H. (1995) Advanced Engine Technology. Society of Automotive Engineers. Warrendale, Penn.

Kuo, Hung-Liang (1971) Variation of Ultrasonic Velocity and Absorption with Temperature and Frequency in High Viscosity Vegetable Oils. Japanese Journal of Applied Physics. Vol 10, No 2, February, 167-170.

McClements J., D. and Povey, M. J.W. (1992) Ultrasonic analysis of edible fats and oils. Ultrasonics Vol. 30 No. 6, 383-387.

McClements J., D. and Povey, M. J.W. (1988) Ultrasonic Velocity Measurements in Some Liquid Triglycerides and Vegetable Oils. JAOCS, Vol. 65, No 11, November, 1787-1790.

Monyem, A., Van Gerpen, J.H., and Canakci, M. (2001a) "The Effect of Timing and Oxidation on Emissions from Biodiesel-Fueled Engines," Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, V. 44, No. 1, pp. 35-42.

Monyem, A. and Van Gerpen, J.H. (2001b) The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions. Biomass and Bioenergy, V. 20, No. 4. pp. 317-325.

Rolling, R. E. and Vogt, C.J. (1960) The Adiabatic Bulk Modulus of Normal Paraffin Hydrocarbons from Hexane to Hexadecane. Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, Sept. 1960, 635-644.

Sharp, C.A., S.A. Howell, and J. Jobe, (2000a) "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emission from Modern Diesel Engines, Part I Regulated Emissions and Performance," Society Of Automotive Engineers Technical Paper No. 2000-01-1967, SAE, Warrendale, Penn., USA.

Sharp, C.A., S.A. Howell, and J. Jobe, (2000b) "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emission from Modern Diesel Engines, Part II Unregulated Emissions and Chemical Characterization," Society Of Automotive Engineers Technical Paper No. 2000-01-1968, SAE, Warrendale, Penn., USA.

Tat, M.E. and Van Gerpen, J.H. (1999) The Kinematic Viscosity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel. Journal of American Oil Chemists Society, Vol. 76, no. 12, 1511-1513.

Tat, M.E. and Van Gerpen, J.H. (2000a) The Specific Gravity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel. Journal of American Oil Chemists Society, Vol. 77, no. 2, 115-119.

Tat, M.E., Van Gerpen, J.H., Soylu, S., Canakci, M., Monyem, A. and Wormley, S. (2000b). The Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Biodiesel at 21 °C from Atmospheric Pressure to 35 MPa. Journal of American Oil Chemists Society, Vol. 77, no. 3, 285-289.

Tat, M.E. and Van Gerpen, J.H. (2002) Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Alkyl Monoesters at Elevated Temperatures and Pressures. Manuscript submitted to the Journal of American Oil Chemists Society.

Einsatz von Biodiesel in Sportbooten am Bodensee - Informationen zum Projekt "Biodiesel und Sportschifffahrt in der Euregio Bodensee"

Klaus Schreiner[1]

Zusammenfassung

Am Bodensee wird die Verwendung von Biodiesel in Sportbooten in einem Projekt untersucht. An dem Projekt beteiligen sich verschiedene Wassersportverbände, die UFOP und die Fachhochschule Konstanz. Während der Einsatz von Biodiesel in Kraftfahrzeugen Stand der Technik ist, ergeben sich in Sportbooten Besonderheiten, die mit dem speziellen Betrieb dieser Wasserfahrzeuge zusammenhängen. Es sind dies die hygroskopische Eigenschaft des Biodiesels in einer feuchten Umgebung, die begrenzte Haltbarkeit von Biodiesel, wenn die Boote nur wenige Stunden pro Jahr betrieben und nur einmal pro Jahr betankt werden, sowie eine eventuelle Schmierölverdünnung wegen des hohen Teillastanteils. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse der Untersuchungen in den ersten beiden Jahren des Projekts zusammen. Es kann festgestellt werden, dass in diesen zwei Jahren keine biodieselbedingten Ausfälle aufgetreten sind und dass mit großer Wahrscheinlichkeit der generelle Einsatz von Biodiesel in Sportbooten empfohlen werden kann.

1 Einleitung

Pflanzenöle und Pflanzenölester sollten aus Gründen des Umweltschutzes (CO_2-Bilanz, Rußemissionen, Ungiftigkeit, biologische Abbaubarkeit) gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bevorzugt verwendet werden. Die Umrüstung von Dieselmotoren auf den Betrieb mit Biodiesel ist ökologisch sinnvoll und entspricht dem Stand der Technik. Andererseits ist Biodiesel nicht in beliebiger Menge verfügbar. Deswegen sollte er besonders dort eingesetzt werden, wo seine spezifischen Vorteile optimal genutzt werden können.

Ein wesentlicher Vorteil von Biodiesel ist seine biologische Abbaubarkeit (Wassergefährdungsklasse 1). Hinzu kommen die relativ geringen Umrüstkosten. Dadurch ist Biodiesel prädestiniert als idealer Kraftstoff für Binnengewässer und insbesondere für Sportboote, die nur relativ wenige Betriebsstunden im Jahr eingesetzt werden. Eine Umrüstung von Sportbooten auf den Betrieb mit Pflanzenöl lohnt sich im Allgemeinen finanziell nicht. Die Kosten für die Umrüstung dieser relativ kleinen Motoren auf den Betrieb mit Pflanzenöl wären im Vergleich zu den jährlichen Kraftstoffkosten unverhältnismäßig hoch.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit Erfahrungen, die in den letzten Jahren beim Biodiesel-Einsatz in Sportbooten auf dem Bodensee gemacht wurden. Der Bodensee ist ein Trinkwasserreservoir für viele Millionen Menschen in Süddeutschland. Wenn es gelingen würde, einen großen Teil der Boote auf dem See mit Biodiesel zu betreiben, wäre ein wesentlicher Beitrag für den Umweltschutz in dieser Region geleistet.

2 Details zum Einsatz von Biodiesel in Sportbooten

Während die Verwendung von Biodiesel in Kraftfahrzeugen erprobt und bewährt ist, ist dies bei Sportbooten noch nicht der Fall. Das hängt mit der typischen Betriebsweise von Sportbooten zusammen:

Sportboote werden nur wenige Stunden pro Jahr betrieben (ca. 30 Stunden). Das bedeutet, dass der Kraftstofftank eventuell nur einmal pro Jahr oder noch seltener befüllt wird und damit die Lebensdauer des Biodiesels eine Rolle spielt. Gegebenenfalls muss der Tankinhalt entnommen und anderweitig entsorgt

[1] Institut für Verbrennungsmotoren, Fachhochschule Konstanz, Brauneggerstr. 55, 78462Konstanz

werden (z.B. in einem mit Biodiesel betriebenen PKW).

Zum anderen werden Sportboote in einer feuchten Umgebung betrieben. Deswegen darf die hygroskopische Eigenschaft von Biodiesel nicht vernachlässigt werden. Das betrifft sowohl den Eintrag von Luftfeuchtigkeit durch defekte Tankdeckeldichtungen als auch über die Tankentlüftung. Sportboote werden üblicherweise im Winter aus dem Wasser genommen und eingelagert. Durch Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht und auch während des gesamten Winterhalbjahres kommt es zu einem ständigen Luftaustausch zwischen dem Luftpolster über dem Kraftstoff im Tank und der Umgebungsluft. Dadurch gelangt ständig neue, feuchte Luft in den Tank. Auf diese Weise kann sich der Wassergehalt im Biodiesel während der Wintereinlagerung ständig erhöhen.

Weiterhin werden Sportboote häufig im Teillastgebiet betrieben, wodurch die Gefahr einer Schmierölverdünnung besonders groß ist. Insbesondere die (Hilfs-)Motoren von Segelyachten werden zuweilen nicht einmal betriebswarm.

Hinzu kommen die Lösungsmitteleigenschaften von Biodiesel. Im Gegensatz zu Fahrzeuglackierungen sind die lackierten Oberflächen von Booten nicht unbedingt biodieselbeständig. Deswegen muss eventuell verschütteter Kraftstoff sofort weggewischt werden.

Viele Sportboote werden mit Kanistern betankt. Der Bootsbesitzer muss deswegen darauf achten, dass er den Kraftstoff in Reservekanistern an Bord bringt, die eine biodieselbeständige Innenoberfläche aufweisen.

3 Das Biodieselprojekt

Wegen der oben genannten möglichen Probleme beim Einsatz von Biodiesel in Sportbooten wurde vor gut zwei Jahren ein entsprechendes Projekt in die Wege geleitet. Es handelt sich dabei um das Projekt "Biodiesel und Sportschifffahrt in der Euregio Bodensee", das von verschiedenen Organisationen unterstützt wird. Es sind dies die Arbeitsgemeinschaft Freizeit und Natur Bodensee e.V. (Arge Fun), der Bodensee-Segler-Verband (BSVb), der Internationale Motorboot-Verband (IBMV) und die Fachhochschule Konstanz. Finanziell wird das Projekt von der UFOP unterstützt. Initiiert wurde das Projekt von Hans Plaettner-Hochwarth, der schon seit vielen Jahren sein Segelboot mit Biodiesel betreibt und der mit viel Enthusiasmus das Projekt in die Wege geleitet hat.

Alle Mitarbeiter im Projekt arbeiten ehrenamtlich. Finanzielle Unterstützung durch die UFOP gibt es nur für Sachausgaben: Das sind insbesondere Unterstützungen der Bootsbesitzer bei der Umrüstung der Boote auf den Betrieb mit Biodiesel und die Übernahme der Kosten für die Untersuchung der Motoren wie beispielsweise die regelmäßige Analyse des Motorenöls oder für die Analyse der Kraftstoffqualität.

Das Biodiesel-Projekt hat sich vielfältige Ziele gesetzt. Ganz allgemein geht es darum, Sportbootbesitzer davon zu überzeugen, dass sie der Umwelt und damit dem Bodensee etwas Gutes tun, wenn sie ihre Dieselmotoren mit Biodiesel betreiben. Dazu werden im Rahmen des Projektes Bootsbesitzer und die Bevölkerung über die Vorteile und die speziellen Umrüstungsmaßnahmen bei Biodiesel aufgeklärt. Es wurden Kontakte zu den Motorenherstellern geknüpft, um deren Unterstützung zu erlangen, falls Schwachstellen bei der Anwendung von Biodiesel in Sportbootmotoren gefunden werden. Um den Zustand der Bootsmotoren zu überwachen, werden bei den beteiligten Projektteilnehmern regelmäßig Motorölproben gezogen und analysiert. Ebenso werden Kraftstoffproben gezogen und analysiert. In einem parallelen Langzeit-Lagerversuch wird untersucht, wie sich die Eigenschaften von Biodiesel bei einer Lagerung über mehrere Jahre hinweg verändern. Um Informationen über den Betrieb der Sportbootmotoren auf dem Bodensee zu erlangen, führen die Projektteilnehmer Fahrtenbücher, in denen sie Angaben über die Einsatzzeiten und das Lastprofil machen. Das Projektteam unterstützt die Projektteilnehmer bei der Beschaffung von biodieselbeständigen Schläuchen und Dichtungen.

Eine wesentliche Aufgabe des Biodiesel-Teams war es, die Treibstoffversorgung am Bodensee zu verbessern (Tabelle 1). Die ersten Projektteilnehmer mussten ihre Boote noch mit Reservekanistern betanken. Mittlerweile ist es gelungen, eine erste Seetankstelle in Kressbronn davon zu überzeugen, Biodiesel anzubieten.

Am Biodiesel-Projekt beteiligen sich zurzeit 21 Segelboote und drei Motorboote. Bei den Motoren handelt es sich um Dieselmotoren mit den in der Tabelle 2 gezeigten Spezifikationen.

Tabelle 1:
Tankmöglichkeiten für Biodiesel am Bodensee

Ort am Bodensee	Versorgungsmöglichkeiten mit Biodiesel
Kressbronn	Erste RME-Seetankstelle im Wassersportzentrum
Kressbronn	Kanister-Depot beim Hafenmeister des MYCO
Wallhausen	Kanister-Depot bei der Seetankstelle Rechner
Konstanz	Kanister-Depot bei Yachtausrüstung und Yachtcharter Dieter Engert, neben dem DSMC
Konstanz	RME-Tankstellen bei Fa. Ley (Nähe Flughafen)
Friedrichshafen	Tankstelle Schindele, fünf Minuten vom Hafen des WYC entfernt
Fischbach	RME-Tankstelle bei Fa. Welsch (Esso)
Fussach	Kanister-Depot bei der Seetankstelle Schwenninger

Tabelle 2:
Von den Teilnehmern im Biodieselprojekt verwendete Motoren

Motor	Leistung / kW	Zylinderzahl	Teilnehmer
BMW D 7 (Hatz)	4,5	1	00-10-S
			00-12-S
Bukh DV10ME	7,4	1	00-02-S
Faryman 33 L 30	6,6	1	00-13-S
Mercedes OM 326	110,3	6	01-06-M
Thornicraft TD Mandoria	70,4	6	00-09-M
Volvo Penta 2001	6,6	2	01-01-S
Volvo Penta 2001 SDC	5,9	2	01-05-S
Volvo Penta 2002	13,2	2	01-02-S
Volvo Penta 2010 BBT	7,4	2	01-10-S
Volvo Penta 2020	13,3	3	00-14-S
Volvo Penta AQ AD 31	95,6	4	00-16-M
Volvo Penta MD 2003	20,5	3	00-15-S
			00-15-S
Volvo Penta MD 2010 BBT	7,4	2	00-03-S
Volvo Penta MD 5C	7,0	1	00-01-S
Volvo Penta MD 7A	9,5	2	01-03-S
			00-04-S
Yanmar 1GM10	5,5	1	00-08-S
Yanmar 1GM10C	6,7	1	00-11-S
			01-04-S
Yanmar 2GM20	13,2	2	00-06-S
			00-07-S
Yanmar YSM8	5,8	1	01-12-S

Die Motorenhersteller unterstützen das Biodieselprojekt durch die Übernahme von Patenschaften. Insgesamt wurden durch die intensive Arbeit von Hans Plaettner-Hochwarth die in der Tabelle 3 genannten Zusagen gegeben:

Tabelle 3:
Freigabe von Bootsmotoren für den Betrieb mit Biodiesel

Hersteller	Zusage
Beta Marine	Freigabe (Kubota-Grundmotor mit genereller Freigabe)
Farymann Diesel	Freigabe (von Anfang an im Projekt dabei)
IVECO aifo	Keine Probleme (wenn es bei der Bestellung angegeben wird)
Lombardini Marine	Unterstützung zugesagt, übernimmt keine Garantie
MerCruiser	Freigabe für Kammermotoren, für DI-Motoren liegen keine Erfahrungen vor (Patenschaften für Motoren des Projekts zugesagt)
nanni diesel	Freigabe (Kubota-Grundmotor mit genereller Freigabe)
Steyr Motorentechnik	Freigabe (Es liegt Prüfung nach § 1.4 Abs. 2 der Anlage C zur BSO für RME vor!)
Volkswagen AG marine	Generelle Freigabe für alle SDI- und TDI-Motoren
Volvo Penta	Mündliche Zustimmung zum Projekt, Übernahme von Patenschaften zugesagt (eventuelle Freigabe in absehbarer Zeit)
Yanmar	Keine Freigabe, aber Zusage von Patenschaften durch den Importeur MARX GmbH&Co, Hamburg
Achtung: Freigaben gelten nur für Motoren ab einem bestimmten Baujahr! In Einzelfällen muss mit dem Motorenhersteller verhandelt werden. Dies wurde bereits in einigen Fällen mit Erfolg praktiziert.	

Das Projekt befindet sich in seinem dritten und letzten Jahr. Ein Abschlussbericht wird Anfang nächsten Jahres veröffentlicht. In dem vorliegenden Vortrag sollen eine Zwischenbilanz gezogen und die wichtigsten Ergebnisse erläutert werden. Die Auswertungen, die hier präsentiert werden, wurden im Rahmen von Studienarbeiten am Institut für Verbrennungsmotoren der Fachhochschule Konstanz durchgeführt.

4 Ergebnisse der Untersuchungen in der Saison 2001

Die Betriebszeiten der Boote werden mit Fahrtenbüchern dokumentiert. Im Jahr 2000 wurden im Rahmen des Biodiesel-Projekts insgesamt 559 Stunden, im Jahr 2001 insgesamt 817 Stunden mit Biodiesel auf den See gefahren. Auf Grund der Eintragungen in den Fahrtenbüchern hat sich das folgende mittlere Lastprofil ergeben:

19 % Volllast
67 % Teillast
14 % Leerlauf

Die Lastbereiche wurden folgendermaßen definiert:

Leerlauf: Der "echte Leerlauf" einschließlich Schleichfahrt
Volllast: Die letzten 500/min bis zur max. Drehzahl
Teillast: Alle anderen Drehzahlen

Die Lastprofile wurden aufgezeichnet, um bei eventuellen Motorproblemen auf Grund der Kenntnis des Lastprofils auf die Ursachen für die Probleme schließen zu können. Allerdings wurde aus Kostengründen keine automatische Messdatenerfassung installiert. Die Lastanteile wurden vielmehr von den Bootsbetreibern am Ende jedes Einsatztages abgeschätzt.

Die Lastprofile der einzelnen Teilnehmer unterscheiden sich deutlich, wie Abbildung 1 zeigt:

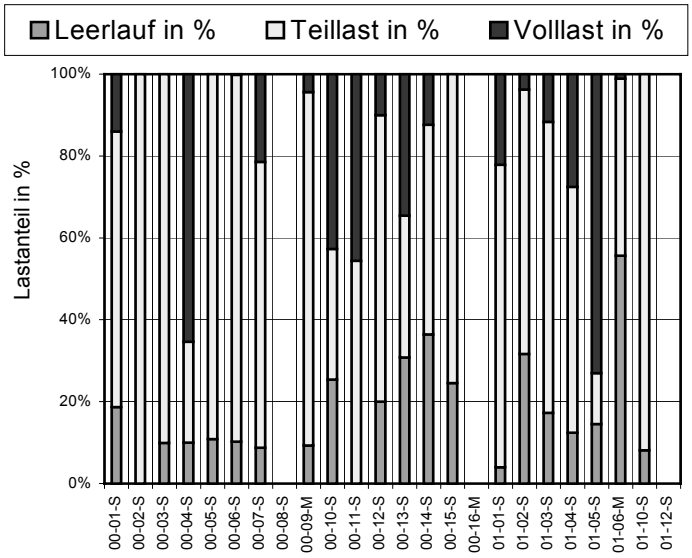


Abbildung 1:
Lastprofil der beteiligten Boote in der Saison 2001 bei insgesamt 817 Betriebsstunden

Abbildung 2 zeigt, wie viele Stunden die jeweiligen Boote in der Saison 2001 mit Biodiesel betrieben wurden. Ein Motorboot (00-16-M) wurde mehr als 100 Stunden mit Biodiesel betrieben. Ein anderer Teilnehmer (00-12-S) ist wegen Krankheit fast gar nicht mit Biodiesel gefahren.

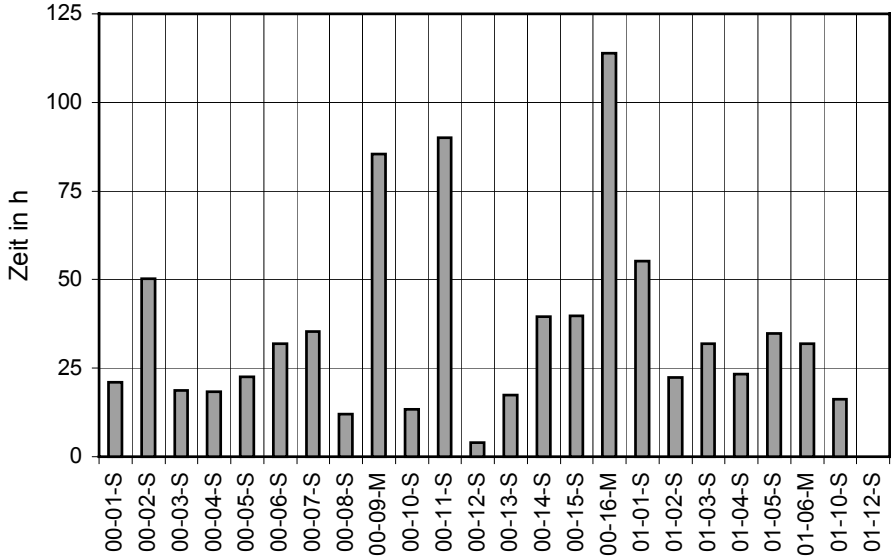


Abbildung 2:
Betriebszeit der einzelnen Boote in der Saison 2001 bei insgesamt 817 Betriebsstunden

Biodiesel hat andere Verdampfungseigenschaften als Dieselkraftstoff, und deswegen wird befürchtet, dass es gerade bei Motoren, die viel im Teillastgebiet betrieben werden, zu einer Schmierölverdünnung kommen kann. Deswegen werden regelmäßig Ölproben aus den Motoren der Projektteilnehmer entnommen. Die Ölproben werden zu einem Institut (Wearcheck) geschickt und dort hinsichtlich von 30 Kriterien analysiert. Es hat sich gezeigt, dass die meisten dieser Kenngrößen vollkommen unkritisch sind. Lediglich bei einigen Motoren haben sich einige dieser Kriterien (Es sind dies die Anteile von Ei-

sen, Chrom, Aluminium, Kupfer, Silizium und Biodiesel im Motorenöl.) als leicht erhöht herausgestellt. In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse der einzelnen Motoren grafisch dargestellt. (Diese Darstellung ist nicht ganz konsistent, weil zur Beurteilung eigentlich der Typ des verwendeten Öls berücksichtigt werden muss, wie es das Öllabor auch tut. Denn die Additive in den Motorölen enthalten teilweise die gleichen Komponenten, die sich auch auf Grund von Motorverschleiß im Öl finden können.)

Da die Zahlenwerte der dargestellten Ölbestandteile sehr unterschiedlich sind, sind sie in der Abbildung normiert dargestellt. Als Normierungsgrößen werden in Absprache mit Wearcheck die folgenden Zahlenwerte verwendet:

Kenngröße	Normierungswert
Eisen	150 mg/kg
Chrom	25 mg/kg
Aluminium	30 mg/kg
Kupfer	30 mg/kg
Silizium/Staub	30 mg/kg
Kraftstoff	5 %

Diese Normierungswerte sind so zu verstehen, dass ein kleinerer Wert als unbedenklich einzustufen ist. Ein größerer Wert ist ein Hinweis darauf, dass man sich den Motor näher anschauen sollte, um die Ursachen zu verstehen.

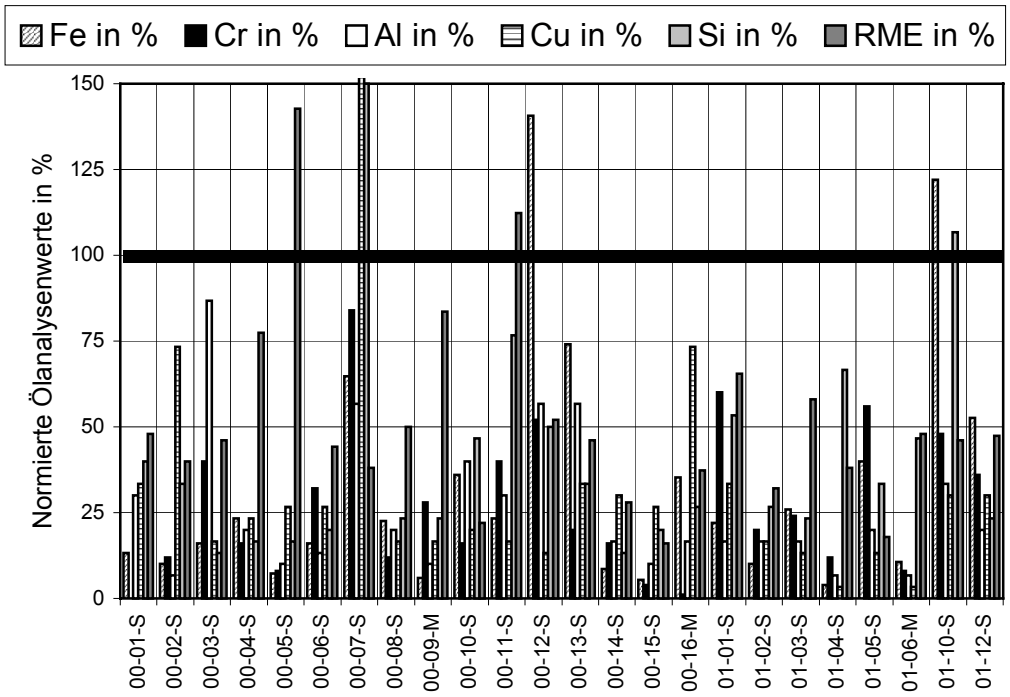


Abbildung 3:
Normierte Ölanalysen der beteiligten Boote in der Saison 2001

In der Abbildung kann man erkennen, dass fast alle Boote unbedenkliche Ölwerte haben. Lediglich die Boote 00-05-S, 00-07-S, 00-11-S, 00-12-S und 01-10-S haben einzelne Werte größer als 100% und müssen näher betrachtet werden. Die Besitzer dieser genannten Boote wurden angesprochen und es wurde versucht, im Gespräch mit ihnen herauszufinden, was die Ursachen für die erhöhten Werte sein könnten. Dabei wurden einige interessante Details gefunden, auf die in diesem kurzen Vortrag aber nicht ausführlich eingegangen werden kann. Als Ergebnisse der Befragungen kann aber festgestellt werden:

Bei einem Boot war die erste Ölprobe schlecht, weil der Besitzer jahrelang entgegen der Betriebsvorschrift keinen Ölwechsel vorgenommen hatte. Bei einem anderen Boot lagen schlechte Werte vor, weil die Ölprobe unsachgemäß bei kaltem Motor gezogen wurde. Bei einem dritten Boot waren die Werte schlecht, weil das Boot 1996 einen Motorschaden (Kurbelwellendichtring defekt, Kühlwassereinbruch) hatte und seitdem die Werte immer schlecht waren. Ein viertes Boot war vor einigen Jahren gesunken. Nach dem Bergen des Bootes wurde der Motor mehrmals mit Öl gespült. Trotzdem waren die Ölanalysen noch schlecht. Nachdem

im letzten Jahr erneut der Motor mehrmals gespült wurde, sind heute die Ölwerte in Ordnung. Bei anderen auffälligen Booten werden während der Saison mehrmals Ölproben gezogen, um Erfahrungen über die zeitliche Zunahme der Kenngrößen zu sammeln.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Werte der Ölanalysen nicht ohne Kenntnis der Vorgeschichte des Motors verstanden werden können. Deswegen sollte man, wenn man beabsichtigt, den Zustand seines Motors durch Ölanalysen zu überwachen, bereits vor der Umrüstung auf Biodiesel das fossile Öl analysieren, was im Rahmen des Projekts auch bei einigen Teilnehmern getan wurde.

Es ist aber beruhigend, dass bei keinem einzigen Boot die Ölwerte wegen des Betriebes mit Biodiesel auffällig geworden sind. Bei Sportbooten ist eine eventuelle Schmierölverdünnung auch deswegen weniger zu befürchten, weil die Motoren nur relativ wenige Stunden pro Jahr betrieben werden. Deswegen wird bei fast allen Booten ein Ölwechsel nicht wegen langer Betriebszeiten vorgenommen, sondern weil die Betriebsvorschrift mindestens einmal pro Jahr einen Wechsel fordert.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der im Biodiesel-Projekt berücksichtigt wird, sind die subjektiven Erfahrungen der Projektteilnehmer. Dazu werden am Ende jeder Saison Fragebogen mit insgesamt zwölf Fragen an die Projektteilnehmer ausgegeben und diese gebeten, die Fragen zu beantworten. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4:
Ergebnisse der Befragung der Projektteilnehmer

Nr.	Frage	betroffene Boote	möglicher Antwortbereich			betroffene Boote
1	Entschluss für RME:		positiv		negativ	
2	Zufrieden mit RME-Team?		ja		nein	
3	Reibungsfreie Treibstoffversorgung?		ja		nein	00-04-S
4	Reaktion der Clubkollegen:		positiv		negativ	
5	Kaltstartverhalten:	01-01-S	verbessert		verschlechtert	00-05-S 00-09-S 00-11-S
6	Laufruhe:		positiv		negativ	
7	Erhöhter Kraftstoffverbrauch?	01-04-S	ja		nein	
8	Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem?	00-01-S	ja		nein	
9	Einfluss auf Motorleistung:		positiv		negativ	00-08-S 00-11-S 01-05-S
10	Einfluss auf Abgasverhalten:	00-02-S 00-03-S 00-06-S 01-01-S	positiv		negativ	00-09-S 01-03-S
11	RME in Standheizung:	00-11-S	positiv		negativ	00-15-S
12	Projekt weiterempfehlen?		ja		nein	

Die zwölf Fragen sind in der ersten Spalte in einer Kurzform dargestellt. Die Teilnehmer können die Fragen auf einer Skala von 1 bis 5 beantworten. In der Abbildung ist der Wertebereich der gegebenen Antworten grau hinterlegt. Der Mittelwert aller Antworten ist schwarz gekennzeichnet.

Die erste und zweite Frage beschäftigen sich mit der Zufriedenheit der Projektteilnehmer. Die Antworten sind durchweg positiv. Auch die Kraftstoffversorgung (Frage 3) ist bis auf einen Fall, der aber geklärt werden konnte, zufrieden stellend gewährleistet. Die Reaktionen der Clubkollegen (Frage 4) auf das Biodieselengagement der Teilnehmer sind aber eher verhalten.

Das Kaltstartverhalten der Boote (Frage 5) hat sich bei einigen Booten verbessert und bei anderen verschlechtert. In Projektbesprechungen werden die Erfahrungen der Teilnehmer gesammelt und Ideen zur Beseitigung der Probleme (z.B. erhöhte Startdrehzahl, Service und Neueinstellung der Einspritzanlage) ausgetauscht. Laufruhe, Kraftstoffverbrauch und Motorleistung (Fragen 6, 7 und 9) haben sich nicht wesentlich geändert.

Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem (Frage 8) sind vereinzelt aufgetreten, weil nicht alle Kraftstoffschläuche und Tankdeckeldichtungen durch RME-beständige ersetzt wurden. Bei einem sehr alten Boot (Baujahr 1959) wurden nach der Umrüstung die Schweißnähte des Tanks undicht, und der Tank musste ersetzt werden.

Das Abgasverhalten der Boote hat sich eher verbessert, teilweise aber auch verschlechtert. Allgemein sind die Projektteilnehmer sehr damit zufrieden, dass das Heck des Bootes im Vergleich zum Betrieb mit fossilem Diesel deutlich weniger verrußt und dass der Dieselgeruch im Boot wegfällt. Allerdings habe einige Boote Probleme mit Weißrauch. In einigen Fällen konnten diese durch eine Inspektion des Motors und der Einspritzanlage (neue Einspritzdüsen) beseitigt werden. In anderen Fällen wurde aber noch keine Abhilfemaßnahme gefunden. Interessant ist, dass sich Motoren gleichen Typs durchaus unterschiedlich verhalten können.

Die Zeile 11 beschäftigt sich mit der Frage, ob Biodiesel auch in der Standheizung verwendet werden kann. Lediglich zwei Projektteilnehmer haben eine Standheizung an Bord. Einer von ihnen nutzt Biodiesel in der Standheizung mit Erfolg, der anderen nicht. Die Frage, ob die Projektteilnehmer das Projekt weiter empfehlen können (Zeile 12), wird im Allgemeinen mit ja beantwortet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Teilnehmer am Biodiesel-Projekt sind fast ausnahmslos mit ihrer Entscheidung zur Teilnahme sehr zufrieden. Im Rahmen des Projekts konnten eventuelle Schwachstellen des Einsatzes von Biodiesel in Sportbooten (Haltbarkeit von Biodiesel, hygroskopische Eigenschaften) aufgezeigt und Lösungen für deren Beseitigung erarbeitet werden. Die bisherigen Erfahrungen mit Biodiesel in Sportbooten sind dermaßen positiv, dass sein Einsatz für die meisten Motoren wahrscheinlich empfohlen werden kann.

Nach den positiven Erfahrungen der letzten beiden Jahre wird das Projekt im Jahr 2002 weiter betreut, Ergebnisse werden gesammelt und diese dann im Winter ausgewertet. Anfang 2003 soll ein Abschlussbericht veröffentlicht werden, in dem die Ergebnisse zusammengefasst werden und in dem Hinweise gegeben werden, was man bei der Umrüstung von Sportbooten auf Biodiesel beachten muss.

Für eine Fortführung des Projektes wurden im Ministerium Ländlicher Raum in Stuttgart Geldmittel beantragt. Falls die Mittel bewilligt werden, soll bei einigen Booten die Verwendung von Oxidationskatalysatoren untersucht werden. Oxidationskatalysatoren haben den Vorteil, dass dadurch der typische Biodieselgeruch beseitigt wird und auch eventuelle Abgasprobleme reduziert werden können.

Literatur

Gloxin, A, Henßler F (2000) Biodiesel und Sportschifffahrt in der Euregio Bodensee. Studienarbeit FH Konstanz

Joachim, J (2001) Auswertung der Betriebserfahrungen in der Saison 2000. Studienarbeit FH Konstanz

Schelling, S (2002) Auswertung der Betriebserfahrungen in der Saison 2001. Studienarbeit FH Konstanz

Allgemeine Infos zum Projekt und Download der bisherigen Arbeiten zu finden in <www.klaus-schreiner.de/biodiesel.htm>

Erfahrungen mit Biodiesel aus gebrauchten Speiseölen in Österreich

Martin Mittelbach[1]

1. Einleitung

Am seinerzeitigen Institut für Organische Chemie (heute: Institut für Chemie) der Karl-Franzens-Universität Graz wurden bereits 1981 Versuche zur Herstellung von Fettsäuremethylestern aus Rapsöl durchgeführt [1]. Diese Versuche führten 1985 zur Errichtung der weltweit 1.Pilotanlage zur Herstellung von Rapsölmethylester in Silberberg, Stmk. Aufgrund des sehr hohen Preises von Rapsöl wurde bereits damals der Einsatz von billigeren Rohstoffen in Erwägung gezogen, die nicht im Nahrungsmittelbereich einsetzbar sind.

So wurden schon 1985 erste Emissionsmessungen mit 100 % Altspeiseölmethylester in Kooperation mit dem renommierten Motoren-Entwicklungs Unternehmen AVL-List GmbH durchgeführt. Eine Publikation in einer amerikanischen Fachzeitschrift im Jahre 1988 zu diesem Thema [2] führte dann zu einem weltweiten Echo. Zeitschriften wie Science News, Geo, aber auch Tageszeitungen und Magazine verbreiteten die Nachricht vom "Frittendiesel" wie ein Lauffeuer. Es dauerte jedoch noch einige Jahre an intensiver Forschungsarbeit, bis 1993 die 1.Produktion von Altspeiseölmethylester in Mureck, Stmk, sowie der erfolgreiche Einsatz in verschiedensten Fahrzeugen gestartet werden konnte.

In der Arbeitsgruppe „Nachwachsende Rohstoffe“ werden aber auch laufend neue Rohstoffe auf ihre Eignung für die Biodiesel-Erzeugung geprüft. So wurden einerseits ungebrauchte Pflanzenöle, die auf Grund toxischer Inhaltsstoffe nicht für den Verzehr geeignet sind, als Rohstoffe eingesetzt, wie z.B. Öl aus den Samen von Jatropha curcas L. (Purgiernussöl) oder Ricinusöl, andererseits auch tierische Fette wie Hühnerfett und Rindertalg, aber auch Abfallfette aus der Kadaververarbeitung sowie Fettabfälle aus Fettabscheidern. Ziel all dieser Forschungsarbeiten ist eine möglichst wirtschaftliche Herstellung und Bereitstellung von Alternativkraftstoffen in solchen Mengen, die einen signifikanten Beitrag zur Einsparung von mineralischen Ressourcen liefern. Oberste Priorität hat dabei die Qualität des hergestellten Treibstoffs, um einen störungsfreien Betrieb im Praxiseinsatz zu ermöglichen.

2. Die Sammlung von gebrauchten Speiseölen

Aufgrund der begrenzten Mengen von ungebrauchten Pflanzenölen für die Biodiesel-Produktion ist der Einsatz von gebrauchten Frittierölen aus dem Haushalt und aus der Industrie von großer Bedeutung. Die Vorteile des Einsatzes dieser Rohprodukte liegen einerseits im doch recht niedrigen Preis und auch in der Tatsache, dass es hier zu keiner Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion kommt. Aufgrund der BSE-Krise und der damit nur beschränkten Verwendung von Abfallölen im Futtermittelbereich bietet sich eine energetische Verwendung nahezu an. Die Nachteile liegen in den unterschiedlichen Qualitäten der Rohstoffe sowie in der für die Sammlung notwendigen Logistik. So werden heute in Europa zwar alle in der Industrie eingesetzten Frittieröle gesammelt und verwertet, die Mengen jedoch, die im Haushalt anfallen, werden zum Großteil noch über den Kanal „entsorgt“. Dies führt zu einer Kontamination im Kanalsystem und in den Kläranlagen, wodurch sich Folgekosten ergeben, die man sich durch eine Sammlung und Wiederverwertung ersparen könnte.

Der Pro-Kopf-Verbrauch von Speiseölen pro Jahr liegt in Europa zwischen 30 kg in Österreich und 88 kg in den Niederlanden. Die maximale Sammelmenge an gebrauchten Brat- und Frittierölen liegt bei max. 5 kg pro Person und Jahr, Praxiserfahrungen nach Installation einer Sammellogistik in Gemeinden führt zu einer realistischen Menge von 3 kg pro Person und Jahr, was in Österreich einer Menge von 24.000 Tonnen an Altspeiseöl entspricht. In der Annahme, dass die Umwandlung zu Biodiesel mit 100 %iger Ausbeute erfolgt, ergibt sich in Österreich eine zusätzliche Menge, die in etwa der derzeitig in Österreich produzierten Menge Biodiesel aus ungebrauchten Ölen entspricht.

1993 wurde in der Steiermark die Arbeitsgemeinschaft „STAME“ (Steirischer Altspeiseölmethylester“, die sich zum Ziel gesetzt hat, flächendeckend Altspeiseöl aus Haushalten und Gastgewerbebetrieben zu sammeln, zur Biodieselanlage der SEEG (Südsteirische Energie- und Eiweißgenossenschaft) in Mureck zu liefern und in hochwertigen Treibstoff umzuwandeln. Der Treibstoff sollte dann einerseits von den Gemeinden im Zuge einer genossenschaftlichen Beteiligung und andererseits von an-

[1] Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Chemie, Bereich Organische und Bioorganische Chemie, AG Nachwachsende Rohstoffe, Heinrichstraße 28, A-8010 Graz, Österreich, E-Mail: martin.mittelbach@uni-graz.ac.at

deren Großverbrauchern eingesetzt werden. Vom Land Steiermark wurde eine Werbekampagne zur Sammlung von Altspeiseöl gestartet. Im Jahre 1994 wurde mit der Produktion von Biodiesel aus recyclier-tem Altspeiseöl begonnen.

In 175 Gemeinden in der Steiermark und Salzburg wurden ca. 130.000 Stück Altspeiseölsammelkübel an Haushalte verteilt und ca. 550 Sammelcontainer sind in Altstoffsammelzentren aufgestellt. 130 McDonalds Betriebe in Österreich und 16 Betriebe in Slowenien entsorgen ihr Frittieröl über die SEEG. Im Jahre 2001 wurden insgesamt 3.300 Tonnen Altspeiseöl gesammelt und zu Biodiesel verarbeitet.

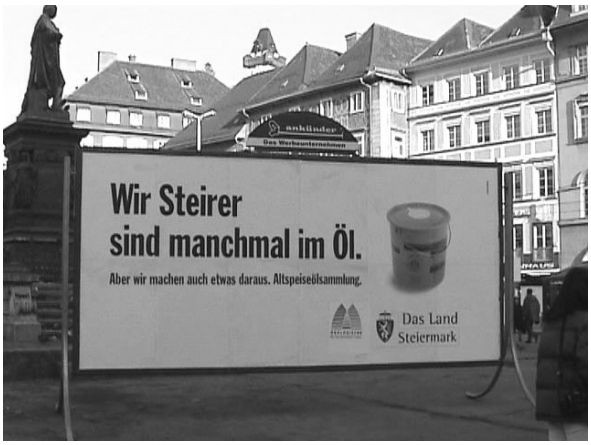


Abbildung 1:
Werbe-Kampagne für die Altspeiseölsammlung in der Steiermark

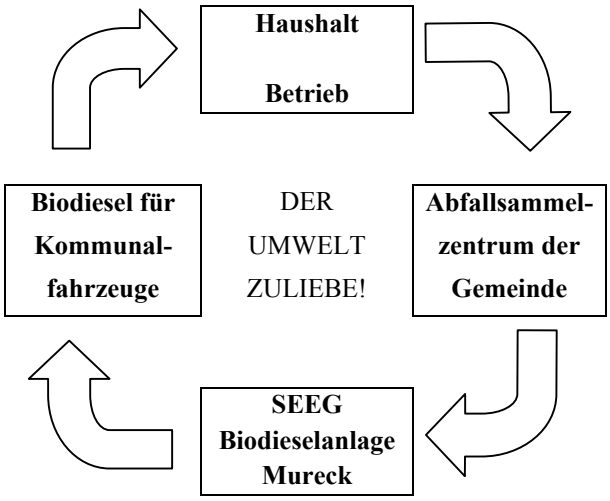


Abbildung 2:
Kreislaufprinzip: "Von der Pfanne in den Tank"

Herstellung und Qualität von Biodiesel aus recyclierten Speiseölen

In langjähriger Forschungsarbeit im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wurde an der Entwicklung eines geeigneten Prozesses zur Herstellung von Fettsäuremethylestern aus recyclierten Speiseölen gearbeitet. Der Prozess unterscheidet sich zwar prinzipiell nicht von jenem für ungebrauchte Öle, aber aufgrund der verschiedenen Verunreinigungen ergeben sich mit herkömmlichen Prozessen doch entscheidende Probleme. Insbesondere der höhere Gehalt an freien Fettsäuren und Wasser sowie andere Verunreinigungen wie Salze und Tenside beeinflussen traditionelle Reaktionsschritte negativ. Es zeigte sich, dass einerseits eine Vorreinigung der gesammelten Öle notwendig ist, andererseits müssen einzelne Reaktionsschritte modifiziert werden. Das Umesterungsverfahren wurde in der Biodiesel-Anlage der SEEG in Mureck erfolgreich eingesetzt. Bis heute (Mai 2002) wurden in dieser Anlage ca. 15.000 Tonnen Biodiesel aus reinem recyclierten Speiseöl produziert, daneben gibt es jedoch noch die Produktion von Biodiesel aus ungebrauchtem Speiseöl.

Ziel ist es auch aus 100 % Altspeiseöl Biodiesel entsprechend internationalen Normen herzustellen. Den größten Einfluss auf die Biodiesel-Qualität haben dabei die beim Erhitzen gebildeten polaren bzw. polymeren Bestandteile, die durch thermische Belastung bzw. Oxidation gebildet werden.

Um den Einfluss von Polymeren zu untersuchen, wurde in einem Laborversuch Rapsöl auf 180°C erhitzt, und der Anteil an polymeren Bestandteilen bestimmt. In gewissen Zeitintervallen wurden mit den Proben auch Umesterungen durchgeführt und die erhaltenen Fettsäuremethylester auf ihre Qualität hin untersucht [4].

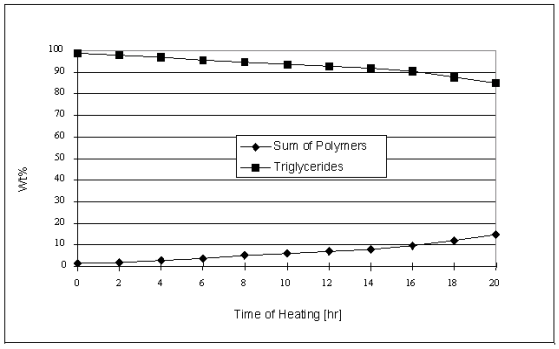


Abbildung 3:
Einfluss der Erhitzungsdauer bei 180°C auf die Bildung von Polymeren

Wie in Abbildung 3 ersichtlich steigt der Anteil an polymeren Bestandteilen nach ca. 16 h Erhitzung auf 180°C auf einen Gehalt von über 10 %. Dabei werden sowohl dimere als auch trimere Triglyceride gebildet. Es wurde nun untersucht, ob und in welchem Ausmaß bei der Umesterung der Gehalt an Polymeren abnimmt, da ja anzunehmen ist, dass auch die polymeren Triglyceride umgeestert werden.

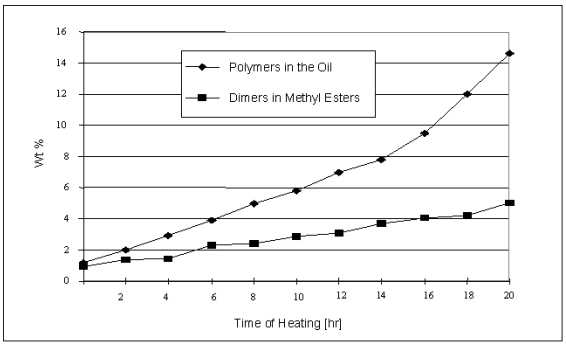


Abbildung 4:
Vergleich Polymer-Gehalt im Öl und im Fettsäuremethylester

Es zeigte sich dabei, dass durch die Umesterung der Gehalt an Polymeren drastisch abnimmt, wobei hauptsächlich dimere Fettsäuremethylester übrigbleiben. Es kommt offensichtlich auch zur Umesterung von Polymeren Glyceriden, wobei nur mehr über die Fettsäurekette verbundene Methylester als Dimere übrigbleiben.

Der Einfluss des Gehaltes an Dimeren auf kritische Biodiesel-Eigenschaften wie Viskosität und Conradson-Koks-Rückstand ist in den Abbildungen 5 und 6 aufgezeigt.

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, steigen die Viskositäten von Öl und Methylester kontinuierlich mit der Erhitzungsdauer an, ab 15 h Erhitzung wird im Methylester bereits der in der E DIN 51606 für Biodiesel angegebene Grenzwert der Viskosität erreicht. Bereits nach 5 h Erhitzungsdauer wird bereits der Grenzwert des Conradson-Wertes von 0.05 % erreicht (Abbildung 6).

Es zeigt sich somit, dass bei Einsatz von Altspeiseöl die in den Normen für Biodiesel vorgesehenen Werte für Viskosität und Conradson-Rückstand gute Hinweise liefern, ob stark überhitzte Fette eingesetzt wurden.

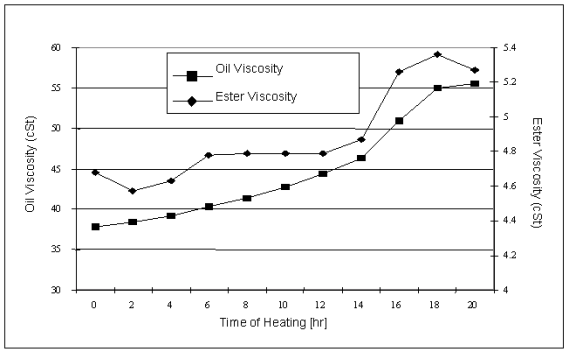


Abbildung 5:
Viskositäten bei 40°C von Öl und Methylester

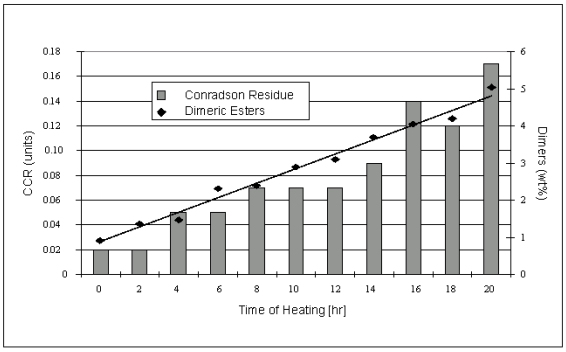


Abbildung 6:
Gehalt an dimeren Estern und Conradson-Koks-Rückstand

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, weichen die Analysenwerte von Biodiesel aus recycliertem Speiseöl (AME) nur in wenigen Punkten von jenen von Rapsöl ab, wobei nur der Wert des Estergehaltes knapp außerhalb der Norm liegt. So liegen wie erwartet die Werte für die Viskosität und des Conradson-Rückstands leicht über jenen von RME. Die Iodzahl liegt deutlich unter jener für RME, dementsprechend ist auch der CFPP deutlich niedriger. Überraschend ist der hohe Wert der Oxidationsstabilität von AME, der offensichtlich nicht nur vom natürlichen Gehalt von Antioxidantien abhängt, die beim Erhitzen des Fettes ja weitgehend verbraucht sein müssten, sondern vor allem auf den niedrigen Gehalt an höher ungesättigten Fettsäuren zurückzuführen ist.

Tabelle 1:
Typische Analysenwerte für RME und AME entsprechend E-DIN 51606

Parameter	**Methode**	**Einheit**	**AME**	**RME**	**E DIN 51606**
Dichte bei 15°C	ISO 3675	[g/cm^3]	0,8809	0,8796	0,875-0,900
Viskosität bei 40°C	ISO 3104	[mm^2/s]	4,63	4,24	3,5-5,0
CFPP	DIN EN 116	[°C]	0	-10	0-/ -20
Flammpunkt	DIN EN 22719	[°C]	166	164	>110
Schwefel		[%m/m]	0,0008	0,0004	<0.01
CCR von 100%	DIN 51551	[%m/m]	0,04	0,01	<0,05
Sulphatasche	DIN 51575	[%m/m]	0,002	0,006	<0,02
Wasser	ASTM D 1744	[mg/kg]	400	300	<300
Gesamtverschmutzung	DIN 51419	[mg/kg]	7	6	<20
Säurezahl	DIN 51558	[mgKOH/g]	0,36	0,37	<0,50
Oxidationsstabilität	pr EN 14214	[h]	5,9	9,1	
Methanol	E DIN 51608	[%m/m]	0,03	0,04	<0,20
Estergehalt	pr EN 14103	[%m/m]	95,4	98,2	>96,5
Monoglyceride	E DIN 51609	[%m/m]	0,165	n.d.	<0,80
Diglyceride	E DIN 51609	[%m/m]	n.d.	n.d.	<0,20
Triglyceride	E DIN 51609	[%m/m]	n.d.	n.d.	<0,20
Freies Glycerin	E DIN 51609	[%m/m]	0,003	n.d.	<0,02
Gesamtglycerin	E DIN 51609	[%m/m]	0,046	n.d.	<0,25
Iodzahl	DIN 53241-1	[gI_2/100g]	88,7	112,9	<115
Phosphor		[mg/kg]	<1	1	<10
Alkaligehalt (Na, K)	DIN 51797-3	[mg/kg]	1,3	3,5	< 5

Praxiserfahrung mit Biodiesel aus recyclierten Speiseölen in Grazer Stadtbussen

Die Grazer Verkehrsbetriebe sehen sich seit vielen Jahren dazu verpflichtet, im Sinne des Umweltschutzes alle derzeit bestehenden Möglichkeiten, alternative Treibstoffe – wie z. B. LPG, CNG, Wasserstoff, Brennstoffzellen, Biodiesel etc. - im Kraftfahrlinienbetrieb einzusetzen, ins Auge zu fassen und gegebenenfalls auch beim täglichen Einsatz im Linienverkehr zu testen.

Als im Jahre 1994 an die Grazer Verkehrsbetriebe der Wunsch herangetragen wurde, in Form eines Pilotversuches einen Treibstoff, der aus einem alltäglichen Abfallprodukt gewonnen werden kann, bei den innerhalb des Kraftfahrlinienbetriebes der Grazer Verkehrsbetriebe verwendeten Dieselmotoren der Autobusse einzusetzen, war eine spontane Bereitschaft dazu gegeben.

Abbildung 7

Somit wurden zunächst 2 GVB-Busse der Typen STEYR SS 11 HUA 210 und MAN NL 202 ab 7. 11. 1994 diesem Pilotversuch unterzogen.

Voraussetzung war die Umrüstung der von Biodiesel betroffenen Treibstoffschläuche, Schaugläser, Schlauchverbindungen etc. und somit alle mit diesem Treibstoff in Verbindung kommenden Bereiche eines Dieselmotores, wobei es sich dabei meist nur um diverse Gummi- bzw. Kunststoffmaterialien handelt.

Im Zuge dieses Pilotversuches, der sich über ca. 3 Jahre erstreckte, wurden durch das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz und dem Institut für Organische Chemie der Universität Graz unter Zurverfügungstellung der zum Einsatz gelangten GVB-Autobusse laufend Messungen bzw. Überprüfungen in Hinblick auf das Emissionsverhalten, das Fahrverhalten, die Auswirkungen auf Leistung und Verbrauch, die Einwirkungen bezüglich Motoröl, den Verschleiß und eventuelle Motorverschmutzungen durchgeführt.

Die o. a. Messungen bzw. Überprüfungen erfolgten alle am Rollenprüfstand der TU GRAZ mit Unterstützung der GVB-Autobuswerkstätte.

Vor Beginn des Pilotversuches wurde der Motor des MAN - Busses praktisch bis auf den Motorblock innerlich erneuert und somit grundüberholt.

Nach einer Laufleistung von ca. 273 000 km wurde dieser Motor zerlegt und hinsichtlich seines Erscheinungsbildes nach Einsatz von AME überprüft; es konnte kein andersgearteter Verschleiß im Vergleich zum Einsatz von mineralischem Dieseltreibstoff festgestellt werden.

Ebenso wurde auch die Konsistenz des eingesetzten Motoröles innerhalb der Messzyklen mit überprüft und dabei trotz aller Befürchtungen und den von Motoröl-Lieferanten für diesen Einsatz eines Treibstoffes angebotenen Spezialölen keine Notwendigkeit erkannt werden, ein an diesen Einsatz gebundenes Motoröl einzusetzen.

Die zwar mögliche, jedoch nach dem Langzeitversuch zu erkennende marginale Verdünnung des Motoröles bei Einsatz von AME hat sich nicht als gravierend erwiesen.

Für einen Betreiber ergibt sich damit die Möglichkeit, aus betriebswirtschaftlichen Gründen das bisher für eine Fahrzeugflotte des Umfanges in Größe der GVB bereits vorhandene Motoröl weiter einzusetzen.

Trotzdem wurden die Ölwechselintervalle vorerst um ca. 25% bezogen auf die üblichen Intervalle nach einer Laufleistung von 40.000 km heruntergesetzt. Lediglich der Mehrverbrauch, der sich durch den etwas geringeren Heizwertes ergibt, beträgt ca. 6% mehr als der bei Einsatz von herkömmlichem Diesel-Treibstoff, was jedoch kein Kriterium gegen den Einsatz von AME (bzw. FME) darstellen sollte.

Die positiven Ergebnisse dieses Pilotversuches waren schlussendlich der Anlass, dass die GVB nach Abschluss desselben im Jahre 1997 sich dazu entschlossen haben, weitere 8 Autobusse mit dieser Treibstoffart und mit Unterstützung der Stadtgemeinde Graz in Betrieb zu setzen. Nach diesen positiven Erfolgen wurden weitere 10 Autobusse 1999 und weitere 35 im Jahre 2000 mit diesem Treibstoff in Betrieb genommen. Somit werden heute 55 von insgesamt 138 Bussen, das sind 40 % der gesamten Fahrzeugflotte der Verkehrsbetriebe der Grazer Stadtwerke AG, mit Biodiesel aus recycliertem Speiseöl betrieben. Dabei wurden von Beginn des Projektes bis Ende 2001 eine Biodieselmenge von 2,2 Millionen Liter in einer Gesamt-Kilometer-Leistung von 4,7 Millionen verfahren.

Die Busse werden ganzjährig mit 100 % Biodiesel betrieben, wobei in sehr kalten Jahreszeiten bei Bedarf mineralischer Dieselkraftstoff beigemischt oder in reiner Form eingesetzt wird.

Zusammenfassung

Obwohl von einigen Seiten Skepsis hinsichtlich des Einsatzes recyclierter Speiseöle und –fette für die Biodiesel-Produktion geäußert wird, konnten wir mit unserem langjährigen Projekt zeigen, dass die Eignung eines Rohstoffes nicht nur von der Art des Ausgangsproduktes, sondern insbesondere von der Qualität und Reinheit des hergestellten Biodiesels abhängt. Biodiesel aus recycliertem Speiseöl kann durchaus mit entsprechender Technologie in normgerechter Qualität hergestellt werden, wobei im langjährigen Praxisbetrieb kein Unterschied zu Rapsölmethylester festgestellt werden konnte. Lediglich das Kälteverhalten ist etwas schlechter, was jedoch durch entsprechende Additive oder Mischungen mit mineralischem Diesel ausgeglichen werden kann.

Die Sammlung von Altspeiseöl und dessen Umwandlung zu Biodiesel stellt somit nicht nur eine ökologisch sinnvolle Verwertung eines Problemstoffes dar, sondern wird auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Erreichung des Zieles der Europäischen Kommission liefern, den Biotreibstoffanteil in Zukunft in der Europäischen Gemeinschaft drastisch zu erhöhen.

Literatur

Mittelbach, M., M. Wörgetter, J. Pernkopf, H. Junek. Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, I; Preparation and Use of Rape Oil Methyl Ester; Energy Agric. 2 (1983) 369.

Mittelbach, M., P. Tritthart. Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, III; Emission Tests Using Methyl Esters of Used Frying Oil; J.Amer.Oil Chem.Soc. 65 (1988) 1185.

Mittelbach, M., B. Pokits, A. Silberholz. Liquid Fuels from Renewable Resources: Production and Fuel Properties of Fatty Acid Methyl Esters from Used Frying Oil; Proceedings of an Alternative Energy Conference, 14-15 December 1992, Nashville, USA, 1992, 74.

Mittelbach, M., H. Enzelsberger. Transesterification of Heated Rapessed Oil for Extending Diesel Fuel J.Amer.Oil Chem.Soc. 76 (1999) 545-550

Mittelbach, M., S. Gangl. Long Storage Stablity of Biodiesel Made from Rape Seed and Used Frying Oil J.Amer.Oil Chem.Soc. 78 (2001) 573-577

Erfahrungsbericht aus dem „Demonstrationsvorhaben Biodiesel der Stadtwerke Neuwied GmbH“

Rolf Neiß[1]

Das Betriebsgelände der Stadtwerke Neuwied GmbH befindet sich im Bereich der Wasserschutzzone IIIa, in der grundsätzlich keine Tankstellen zulässig sind.

Die Betankung der Busse fand bis zur Errichtung der Biodieseltankstelle an einer ca. 2,25 km entfernten angemieteten Tankstelle mit jährlichen Kosten für Tankfahrten und Miete in Höhe von 105.257 DM = 53.817,05 Euro statt.

Es wurden daher auch Überlegungen aufgestellt, die 27 SWN eigenen Busse auf Erdgas umzustellen und eine Erdgastankstelle im Betrieb zu errichten. Diese Überlegungen erfuhren jedoch wegen der hohen Investitionskosten von 80.000 DM pro Bus und rd. 0,5 Mio. DM für die Tankstelle keine Realisierung.

Mit Datum vom 30.07.97 wurde den SWN GmbH durch die Vermieterin des bisherigen Standortes der Tankstelle im Rheintalweg mitgeteilt, dass durch den Verkauf des gesamten Geländes an eine Stahlbaufirma incl. des Kranbahnanschlusses an den Rhein eine Verlegung der Tankstelle bis zum Jahresende erforderlich sei.

Die Vermieterin stellte ein Ersatzgrundstück am Ende des Rheintalweges zur Verfügung und erklärte sich bereit, alle Kosten für die Umsetzung der Tankstelle zu übernehmen und so das bestehende Mietverhältnis vom 01.06.94 mit Mietkosten von 2.000,-- DM/pro Monat = 24.000,-- DM pro Jahr bis zum 31.05.2004 fortzusetzen.

Aus diesem Anstoß heraus wurden nochmals kurzfristig alle bisher schon getätigten Überlegungen zu einem wirtschaftlicheren und umweltschonenderen Betrieb der Busse mit Erdgas bzw. Biodiesel geprüft, und nach Wegen gesucht, die Aufwendungen für den bisherigen Tankdienst außerhalb des Betriebes zu verringern sowie entsprechende Landeszuschüsse zu erhalten.

Nach eingehender Prüfung wurde die Alternative Erdgasbetankung aus Kostengründen fallengelassen.

Die Umstellung auf Biodiesel war nach dem Ergebnis einer Ortsbesichtigung bei den Kreiswerken Heinsberg und weiteren Recherchen bei anderen Betreibern technisch machbar, und günstigere Treibstoffkosten und Landeszuschüsse i.H. von 40 % finanzierbar, sie führt aus Umweltgesichtspunkten zu einer erheblichen Entlastung der Innenstadt durch verringerten Schadstoffausstoß und fördert nachhaltig die Entwicklung nachwachsender Rohstoffe und ihre Verwendung im Energiebereich sowie in der Wasserschutzzone.

Die Kosten und der technische Aufwand der notwendigen Fahrzeugumrüstung wurden durch eine Studie der GET (Gesellschaft für Entwicklungstechnologie mbH), Jülich, belegt.

Der Treibstofflieferant war bereit, die vorhandene Tankanlage in das Betriebsgelände umzusetzen und künftig mit Biodiesel zu betreiben.

Seitens der Bezirksregierung wurde eine Ausnahmegenehmigung für eine Biodieseltankstelle im SWN – Betriebshof in Aussicht gestellt. Ein entsprechender Bauantrag wurde am 16.09.97 eingereicht.

Das Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau war nach einer am 24.09.97 erfolgten Abstimmung bereit, das Vorhaben mit einem Zuschuss i. H. von 40 % noch in 1997 zu fördern. Als Projektbeginn wurde der 01.11.97 vorbehaltlich der Zustimmung vereinbart.

Hierbei wurden noch 10 Fahrzeuge unseres Kooperationspartners, der VRW GmbH, mit einbezogen, ferner auf Wunsch des Ministeriums zu Abrundung des Demonstrationsprojektes ebenso 7 kleinere Nutzfahrzeuge aus dem sonstigen Fuhrpark der SWN und 2 Fahrzeuge des Abwasserbetriebes.

Der Aufsichtsrat der SWN stimmte im Oktober 1997 diesem Vorhaben zu.

Das Wirtschaftsministerium förderte das Vorhaben im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

Die erforderliche Baugenehmigung sowie die Ausnahmegenehmigung zur Errichtung einer Biodieseltankstelle im Wasserschutzgebiet konnten in kürzester Zeit eingeholt werden.

Enorme Schwierigkeiten ergaben sich zu Anfang lediglich durch die Informationsdefizite der örtlichen Niederlassungen von Mercedes und MAN hinsichtlich der notwendigen Umrüstmaßnahmen.

Diese Schwierigkeiten können u.a. durch die Einschaltung der GET, Jülich (Gesellschaft für Entwicklungstechnologie) gemeinsam mit dem zuständigen Mitarbeiter des Ministeriums, Herrn Dr. Stegmann und dem erklärten Willen der SWN zur Umstellung ausgeräumt werden.

Alle vorherigen Bedenken der Hersteller stellten sich im wesentlichen als haltlos heraus. Durch den

1 SWN GmbH, Hafenstraße 90, 56564 Neuwied, E-Mail: r.neiss@swn-neuwied.de

Reinigungseffekt des Biodiesels kam es lediglich vereinzelt zu Leistungsverlusten durch Filterzusetzungen, die nach dessen Reinigung aufgehoben waren.

Die Umrüstung erfolgte in Kooperation mit Mercedes und MAN.

Die folgende Übersicht über die Projektdaten- und Projektziele zeigt die wesentlichen Fakten auf.

1. Projektdaten

1.1. Umstellung von 45 Fahrzeugen auf Biodiesel:

26 Busse SWN
10 Busse VRW
7 Transporter SWN
2 LKW des Abwasserbetriebes

1.2. Neubau einer Biodieseltankstelle im Betriebshof der SWN

1.3. Forschungs- und Entwicklungsprojekt (FuE)

mit Landeszuschuss i.H. von 210.330,-- DM
= 40 % von 525.825,-- DM Gesamtkosten

1.4. Kooperation mit VRW (10 Bussen) und Fa. Schlick (Tankstelle)

1.5. Sehr schnelle Projektumsetzung nach eingehender Vorermittlung

1.6. Hohe Flexibilität und Innovationsfreude aller Beteiligter

- Kooperation mit VRW und Treibstofflieferant 08./09.97
- Bauantragstellung 17.09.97
- Aufsichtsratsbeschluss 10.10.97
- Baugenehmigung 14.10.97
- Ausnahmegenehmigung für Tankstelle 15.10.97
- Bewilligung Zuschuss 21.10.97
- Start der Umrüstmaßnahmen 14.11.97
- Start Tiefbauarbeiten Tankstelle 14.11.97

1.7. Fertigstellung 31.12.97

1.8. Start aller 45 ungerüsteten Fahrzeuge mit Biodiesel 01.01.98

2. Projektziele

2.1 Erprobung der Alltagstauglichkeit von biodieselbetriebenen Fahrzeugen

2.2 Verstärkter Einsatz von biodieselbetiebenen Fahrzeugen und Geräten im Trinkwasserschutzgebiet

2.3 Verstärkter Anbau von Raps im Trinkwasserschutzgebiet

2.4 Verbesserte Luftqualität in der Innenstadt durch Biodiesel und Oxidationskatalysatoren

- 100 % weniger Schwefel und Schwefeldioxid
- 92 % weniger HC (Kohlenwasserstoffe)
- 90 % weniger CO (Kohlenmonoxid)
- 69 % weniger Rußpartikel

2.5 Großer Beitrag zur Energieeinsparung und zum Klimaschutz sowie zur Förderung des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe

Bei ca. 1 Mio. Liter Biodieselverbrauch pro Jahr:

- bis zu 3.240 t CO_2 Reduzierung pro Jahr (3,24 kg $CO_{2\ eq}$ für jeden Liter min. Diesel, der durch Biodiesel ersetzt wird)
- bis zu 42,9 Mio. MJ = 11,88 Mio. kWh bzw. 1,464 Mio. kg SKE Einsparung an fossiler Energie pro Jahr
- Die erforderliche Rapsmenge ist als nachwachsender Rohstoff anbaubar auf ca. 750 ha landwirtschaftlicher Stilllegungsfläche (3 t Raps/ha → 1.300 Liter Biodiesel/ha)
- Mit der Herstellung von 1 Mio. Liter Biodiesel auf rd. 750 ha landwirtschaftlicher Stilllegungsfläche können 10 bis 15 Arbeitsplätze in der Landwirtschaft und der herstellenden Industrie geschaffen bzw. dauerhaft gesichert werden.

2.6 Senkung der Gefährdung von Wasser und Boden

- Biodiesel ist leicht biologisch abbaubar, ungiftig und kein Gefahrgut!

Nach Vorlage des Abschlußberichtes wurde den SWN und Ihren Projektpartnern VRW, Abwasserbetrieb und dem Treibstofflieferanten im September 2001 durch den rheinland-pfälzischen Wirtschaftsminister Hans Artur Bauckhage ein erfolgreicher Projektverlauf bescheinigt.

Neben dem Nachweis der Altagstauglichkeit stellten sich wesentliche Umweltentlastungen, wirtschaftliche Vorteile durch den Preisvorteil von Biodiesel und eine vernünftige Nutzung von Stilllegungsflächen

in der Landwirtschaft, verbunden mit einem Ausbau von Arbeitsplätzen heraus.

Nach der projektbezogenen Umrüstung von 57 Fahrzeugen wurden in der Zwischenzeit weitere neue Fahrzeuge entsprechend für den Einsatz von Biodiesel ausgerüstet, beschafft.

Der Treibstofflieferant hat in der Folge eine für die Öffentlichkeit rund um die Uhr zugängliche Tankstelle errichtet. Er berät gleichsam, ob evtl. Umrüstungen notwendig sind.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass alle geplanten Projektziele erreicht wurden und die Maßnahme aus ökologischen und ökonomischen Gründen als voller Erfolg anzusehen ist.

Biodiesel im Zielkonflikt mit Anforderungen an den Dieselmotor

Richard Dorenkamp, Thomas Garbe, Gerhard Ohlendorf[1]

1. Einleitung und Problemstellung

Aus zahlreichen landwirtschaftlichen Erzeugnissen, wie z.B. aus Raps, aus Sojabohnen oder aus Fleischabfällen lassen sich biologische Öle oder Fette gewinnen. Dank intensiver Bemühungen in den achtziger und neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts ist es möglich, daraus industriell eine spezielle Sorte Kraftstoff herzustellen, den „Biodiesel“. Die meisten Volkswagen Fahrzeuge, die ab 1996 hergestellt worden sind (alle seit 1998), dürfen unter bestimmten Auflagen mit Biodiesel aus Raps („RME“) betrieben werden. Insbesondere die Materialbeständigkeit aller Teile, welche mit Kraftstoff in Verbindung kommen, mußte hierzu erheblich verbessert werden.

Für den Einsatz von Biodiesel spricht zum einen die Sicherung bäuerlicher Einkommen sowie die Schaffung neuer Arbeitsplätze in der Herstellindustrie. Da Biodiesel zum anderen auf dem Markt etwas preiswerter als gewöhnlicher Diesel erhältlich ist, wird er von vielen Fahrzeughaltern als attraktives Angebot wahrgenommen. Der europäischer Gesetzgeber befürwortet den Biodiesel aus Gründen des Klimaschutzes, handelt es sich beim Biodiesel doch um eine regenerative Energieform.

Die Allgemeinheit betrachtet Biodiesel hierbei als vollständiges Äquivalent zum Dieselkraftstoff, mit welchem sorglos ein modernes Fahrzeug betrieben werden kann. Ein Hersteller von Automobilen, welcher Biodiesel als Treibstoff zuläßt, hat jedoch zu bedenken, daß sämtliche Leistungsmerkmale eines produzierten Fahrzeuges auch bei Einfüllen des Alternativkraftstoffes nach wie vor erfüllt sein müssen. Moderne Dieselfahrzeuge sollten stets einen niedrigen Kraftstoff- und Ölverbrauch aufweisen und sie müssen bei einer hohen Lebensdauer gut recyclingfähig sein. Neben niedrigen Kosten bei Herstellung und Wartung müssen die Fahrzeuge leicht zu handhaben sein. Leistung und Komfort spielen eine besondere Rolle, da sie ursprünglich als Nachteil des Dieselmotors wahrgenommen wurden. Abgesehen davon, daß es schon aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit notwendig ist, leistungsfähige Dieselfahrzeuge zu bauen, müssen die Automobilhersteller den Anteil an Dieselfahrzeugen in ihrer Flotte anheben, um die ihrerseits getroffene Selbstverpflichtung zur CO_2 – Absenkung der Fahrzeugflotte einhalten zu können.

2. Fahrzeugentwicklung für den Betrieb mit mineralischem Dieselkraftstoff

Am Beispiel des VW – Golf sei kurz die Fahrzeugentwicklung der letzten 10 Jahre umrissen: Konnten 1993 aus 1l etwa 35 kW Leistung produziert werden, sind es inzwischen über 55 kW. Zugleich verbraucht ein Golf IV TDI je Tonne Fahrzeuggewicht weniger als 4l Kraftstoff auf 100 km; beim Golf I waren es noch deutlich mehr als sechs Liter. Erfüllte ein handelsüblicher Golf im Jahre 1993 gerade die EU – Abgasnorm II, genügen deutlich leistungsstärkere Fahrzeuge derweil den strengen Abgasnormen EU III und sogar EU IV. Sowohl die Partikelemissionen als auch der NO_x – Ausstoß wurde somit annähernd halbiert.

Im Gegensatz zu manchen Mitbewerbern ist es der Volkswagen – Entwicklung gelungen, allein durch einen verfahrensoptimierten, direkteinspritzenden Motor in Kombination mit einem nachgeschalteten Oxidationskatalysator die gesetzten Ziele zu erreichen. Hierbei ist insbesondere der Einsatz des hochdruckeinspritzenden Pumpe – Düse – Systems mit Einspritzdrücken bis 2000 bar entscheidend.

Wie Abbildung 1 verdeutlicht, hat der Kraftstoff ein erheblichen Einfluß auf die innermotorischen Verbrennungsvorgänge, welcher bei der Konstruktion und Applikation berücksichtigt werden muß.

[1] Volkswagen AG, Postfach 1769, 38436 Wolfsburg

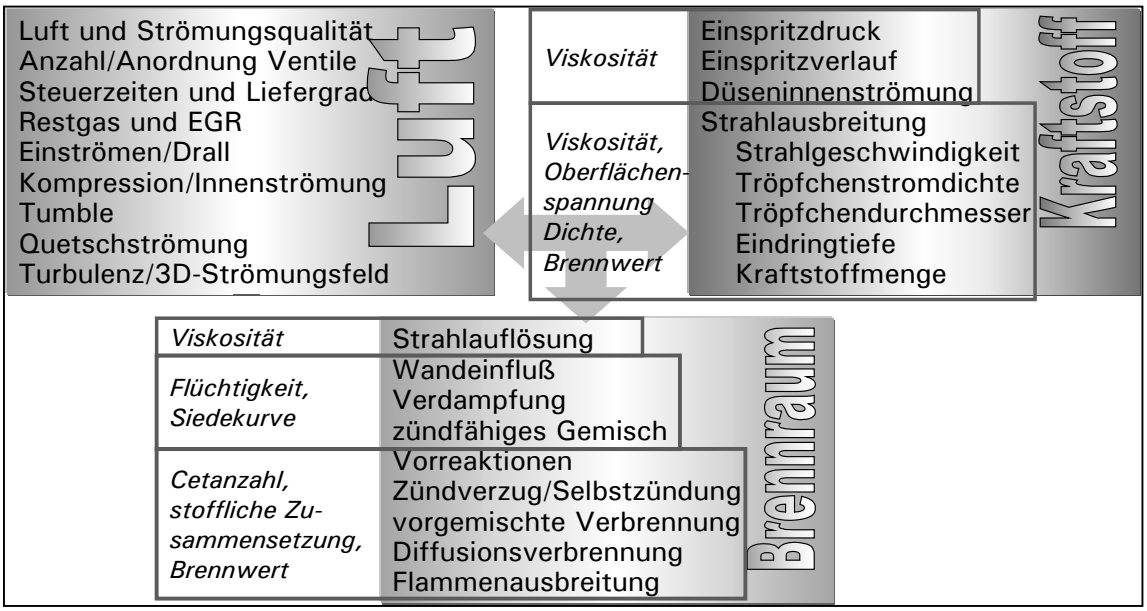


Abbildung 1:
Einfluß von Kraftstoffparametern auf innermotorische Prozesse

Wie allgemein bekannt, bestehen gerade bezüglich der relevanten Parameter Viskosität, Dichte, Brennwert und bezüglich des Verdampfungsverhaltens doch Unterschiede zwischen konventionellem Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 und handelsüblichem Biodiesel. Wie Abbildung 2 zeigt, sind bei modernen Motoren extreme Anforderungen an die Steuerungsgenauigkeit des Motors zu erfüllen, um einen korrekten Verbrennungsablauf zu gewährleisten.

Im folgenden soll nun weniger auf einzelne Verbrennungsabläufe eingegangen werden, sondern auf die Auswirkungen des RME – Einsatzes auf die oben genannten Anforderungen.

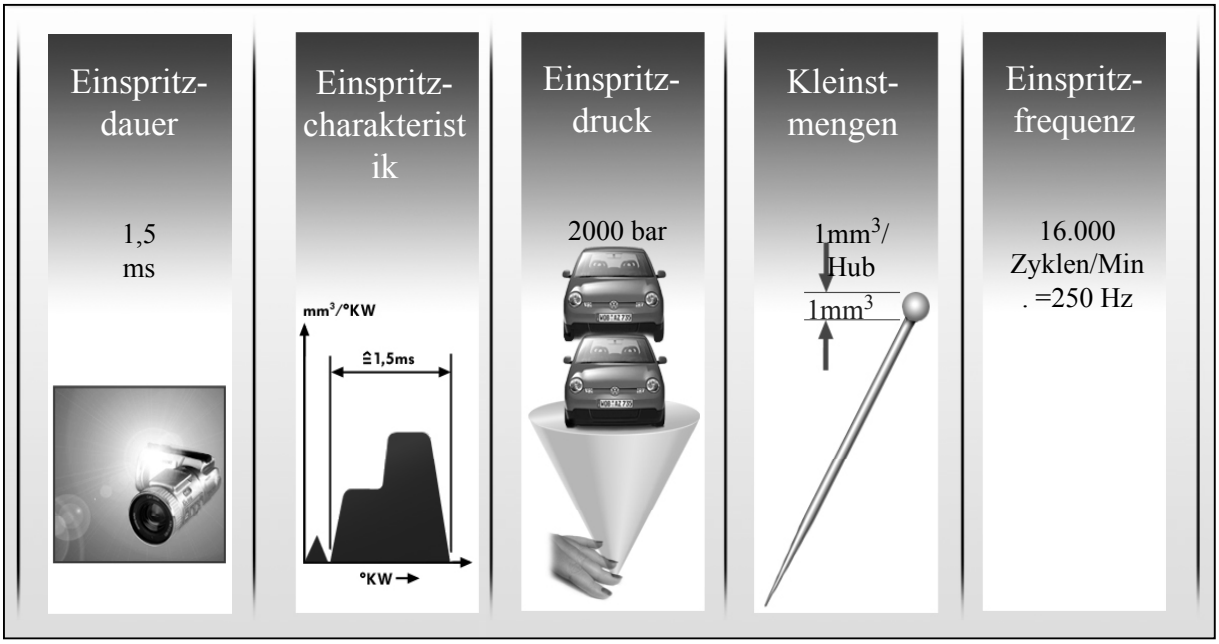


Abbildung 2:
Präzisionsanforderung der Hochdruckeinspritzung

3. Verhalten eines DI – Fahrzeuges bei Betrieb mit RME

Bedingt durch den geringeren Brennwert des Biodiesels – welcher durch die höhere Kraftstoffdichte nicht vollständig kompensiert wird – weisen sämtliche bei VW untersuchten Fahrzeuge eine um etwa fünf Prozent abgesenkte Motorleistung auf. Aus Abbildung 3 wird ersichtlich, daß bezüglich des Verbrauches im NEFZ prinzipiell derselbe Effekt beobachtet wird, daß aber je nach Fahrzeug (abstimmung) einige Differenzen auftreten können.

Bezüglich der Emission gesetzlich limitierter Schadstoffe tritt keine generelle Erhöhung oder Senkung auf, sondern es wird vielmehr ein Phänomen beobachtet, welches als NO_X – Partikel – Trade – Off bezeichnet wird: Während die Stickoxide um etwa 20% angehoben werden, sinkt die Emission fester Partikel um etwa 40%, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist.

Die Applikation der Motorsteuerung ermöglicht nun eine gewisse Verschiebung auf der durch die Emission von Dieselkraftstoff und RME aufgespannten Hyperbel im Partikel – Stickoxid – Trade - Off.

Faktisch werden deshalb dem (Volkswagen) Kunden keine „auf Diesel“ optimierten Fahrzeuge angeboten, sondern die einprogrammierte Motorsteuerung stellt bereits einen Kompromiß bezüglich beider Kraftstoffe dar.

Auch bei der Entwicklung der „Hardware“ muß für RME eine Reserve einkalkuliert werden.

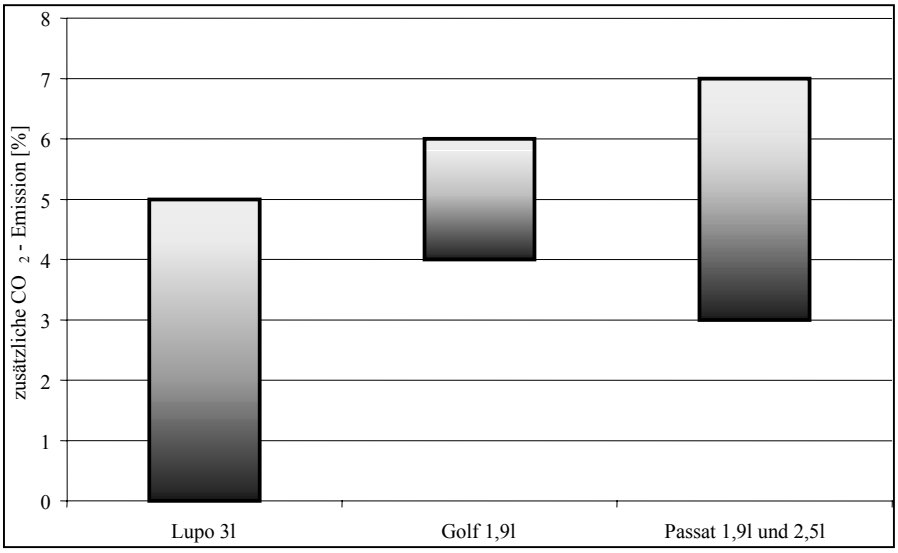


Abbildung 3:
Verbrauchsunterschiede durch Einsatz von RME

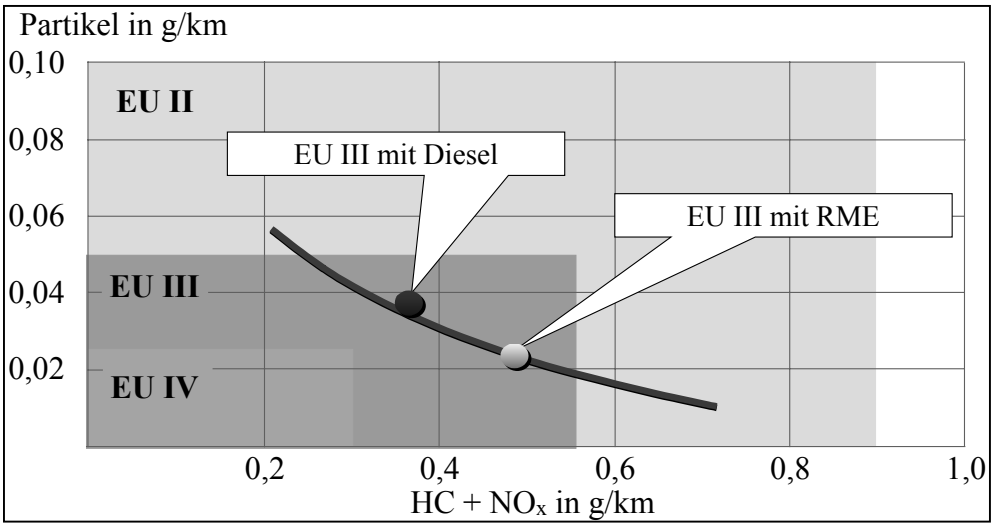


Abbildung 4:
NOx – Partikel – Trade – Off bei Einsatz von RME

4. Vorhalte bei der Entwicklung

Die gegenüber Dieselkraftstoff erhöhte Viskosität bewirkt eine höhere Belastung des Einspritzsystems, namentlich der Einspritzdüsen. Um einer Schädigung des Motors vorzubeugen, muß der Einspritzdruck etwa 150 bar niedriger gewählt werden als es für mineralischen Diesel notwendig wäre. Auf diese Weise sind alle produzierten Fahrzeuge auf höhere Verbrauche und Emissionen ausgelegt, als dies notwendig wäre, wenn Biodieselbetrieb ausgeschlossen wäre. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit der Motorleistung vom Einspritzdruck und die für Biodiesel vorgehaltene „Reserve!“.

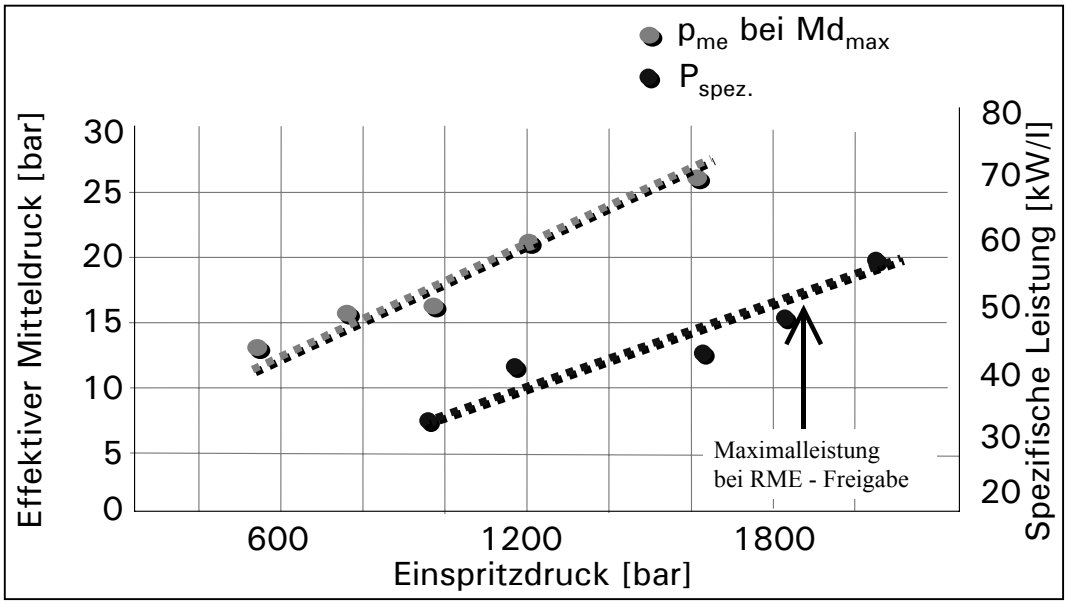


Abbildung 5:
Abhängigkeit der Motorleistung vom Einspritzdruck

Neuerdings muss auch bei der Auslegung (Größe, Edelmetallbeladung) des Oxidationskatalysators eine spezielle RME – Reserve eingehalten werden. Solange Kraftstoff üblicherweise mehrere einhundert ppm Schwefel enthielt, konnte die Vergiftung des Katalysators mit Phosphor aus –schwefelfreiem- RME vernachlässigt werden. Spätestens wenn der europäische Markt mit schwefelfreiem (< 10 ppm) Dieselkraftstoff versorgt wird, liegt die Vergiftung durch Phosphat über derjenigen mit Sulfat. Hierbei ist zu beachten, daß durch hohe Abgastemperaturen ein Sulfatvergiftung gegenüber einer Phosphatvergiftung regenerierbar ist.

Bezüglich konventioneller Fahrzeugkonzepte kann man zusammenfassen, daß mit einigen Einschränkungen der Gebrauch von RME gewährleistet werden kann.

In Zukunft werden die Fahrzeugemissionen wahrscheinlich nochmals gesenkt werden müssen. Hierfür sind bei VW verschiedene Lösungsansätze vorhanden; es soll nun abschließend untersucht werden, ob und in welcher Weise Biodiesel mit solchen Konzepten kompatibel ist. Mehr als in der Vergangenheit gilt, daß nicht ein Fahrzeug entwickelt und dann mit Kraftstoff befeuert wird, sondern daß vielmehr in Zukunft die Entwicklung eines Kraftstoffes synchron zur Motorenentwicklung vorangetrieben werden muß.

5. Künftige Fahrzeugkonzepte und Biodiesel

Zur Erreichung niedrigster Emissionen etwa im Bereich der amerikanischen Ulev – Grenzwerte sollte das Brennverfahren nochmals erheblich verbessert werden. Als Möglichkeit, selbst die Emissionen schwerer Fahrzeuge auf eine sehr niedrige Ebene abzusenken, bleibt die Option einer aus Partikelfilter und Stickoxidkatalysator bestehender aktiver Abgasnachbehandlung.

Das dieselmotorische Brennverfahren entwickelt sich derzeit bei abgesenkten Motorkompressionsraten in Richtung der sogenannten „homogenen Verbrennung“. Hier wird im Gegensatz zur „Diffusions-“ oder Sprayverbrennung angestrebt vor der Zündung ein Gasgemisch aus vollständig verdampftem Kraftstoff und Luft zu erhalten. Durch eine gleichmäßige Zündung über den gesamten Brennraum werden „Hot Spots“ vermieden, in welchen Stickoxide bevorzugt gebildet werden. Erste Versuche haben gezeigt, daß

für einen solchen Motor leichtersiedende Kraftstoffe als der normale Diesel benötigt werden. Wie Abbildung 6 verdeutlicht, geht der Trend hier vom Biodiesel weg, nicht zu Biodiesel (- wie er momentan produziert wird -) hin.

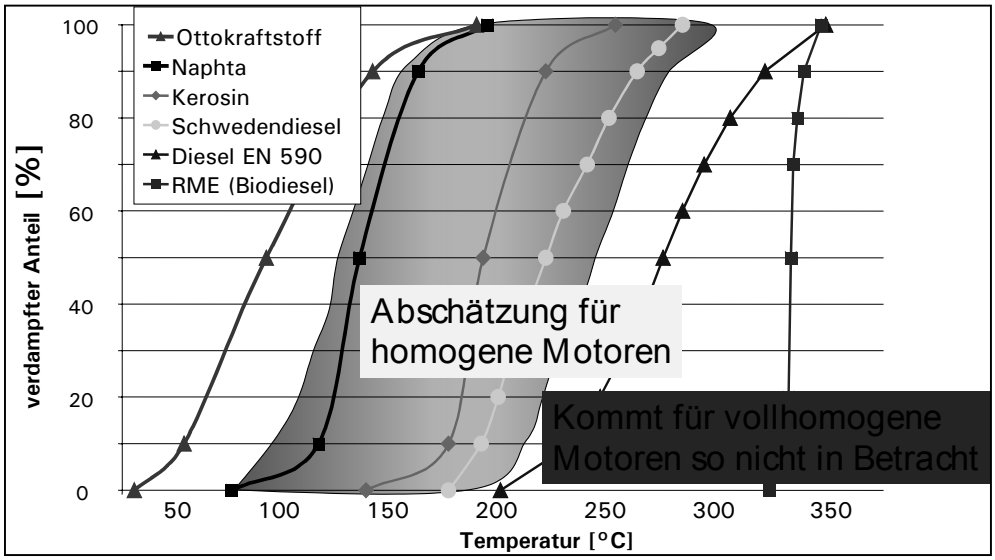


Abbildung 6:
Siedelage verschiedener Dieselkraftstoffe

Abbildung 7 verdeutlicht, daß bei der Verwendung eines Partikelfilters (bei konventionellem DI – Motor) ohne angepaßtes Kennfeld zwar niedrigste Emissionen an Ruß realisiert werden können, daß aber trotzdem bei Betrieb des Fahrzeuges mit Biodiesel aufgrund der erhöhten Stickoxidemission mitunter noch nicht einmal die Abgasnorm EU IV erfüllt wird bzw. daß auch hier Vorhalte bei der Katalysatorauslegung vorgenommen werden müssen oder ein spezielles RME – Kennfeld appliziert werden muß. Es gilt allerdings, daß die Beladung des Filters mit Ruß langsamer erfolgt und somit weniger Regenerationen erzwungen müssen. Ein geringerer Kraftstoffverbrauch ist die Folge.

Anders als beim Rußfilter, welcher einen nahezu einhundertprozentigen Wirkungsgrad aufweist, hat ein NO_x – Nachbehandlungssystem einen Wirkungsgrad von etwa 65%. Somit wird auch bei dessen Anwesenheit ein Sensor notwendig sein. Wie schon beim Oxidationskatalysator gilt, daß eine Vergiftung des Katalysators mit Phosphor extrem bedenklich ist.

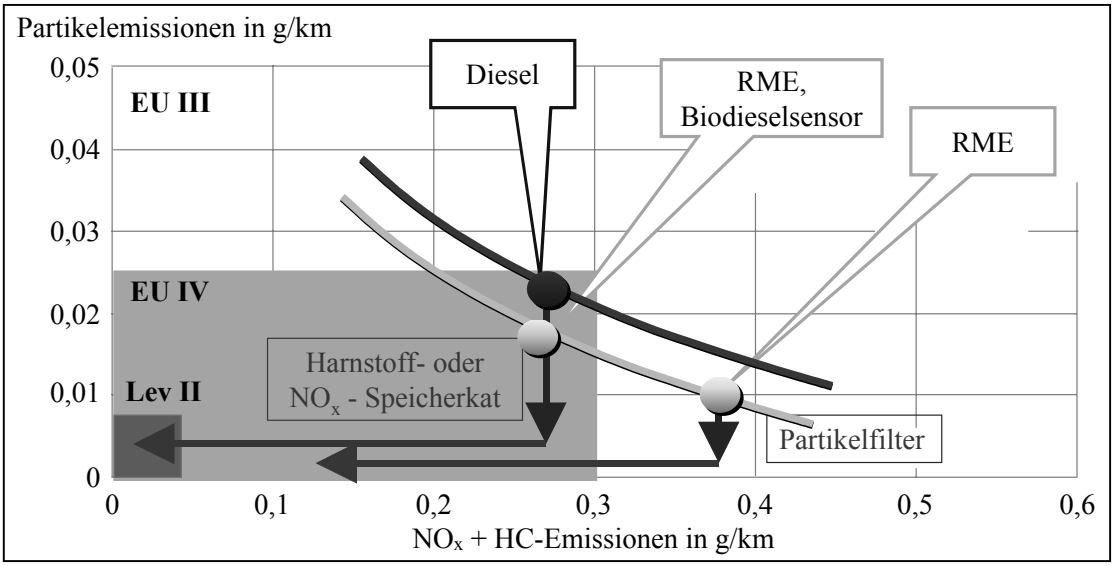


Abbildung 7:
Emission von Fahrzeugen mit aktiver Abgasnachbehandlung bei Einsatz von Biodiesel

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ein Abwägen des Gesagten zeigt, daß die Verwendung von RME in neuen Fahrzeugen inzwischen nur noch wenige Vorteile bietet, denen etliche Nachteile bzw. technische Problemstellungen entgegenstehen. Insbesondere bei neuen Motorenentwicklungen scheint reiner FAME, wie er derzeit existiert, nicht zukunftsweisend zu sein. Die Vorteile (geringer Schwefel- und Polyaromatengehalt) sind weitgehend aufgebraucht; die Emissionen liegen inzwischen auf derselben Hyperbel wie bei Tanken von Kraftstoffen, wie sie in Großbritannien oder Skandinavien schon üblich sind. Studien haben gezeigt, daß schon bald noch bessere Kraftstoffe realisierbar sind, welche nochmals signifikante Absenkungen der Emissionen ermöglichen (vgl. Abbildung 8)

Die Hersteller von Biodiesel werden Antworten auf Fragen bezüglich der aktiven Abgasnachbehandlung und beim neuen Brennverfahren beantworten aber auch die aktuellen Probleme bei der Qualität lösen müssen. Biodiesel wird einen entscheidenden Entwicklungsschritt machen müssen, wenn auch weiterhin als attraktive Variante des Diesels gelten möchte.

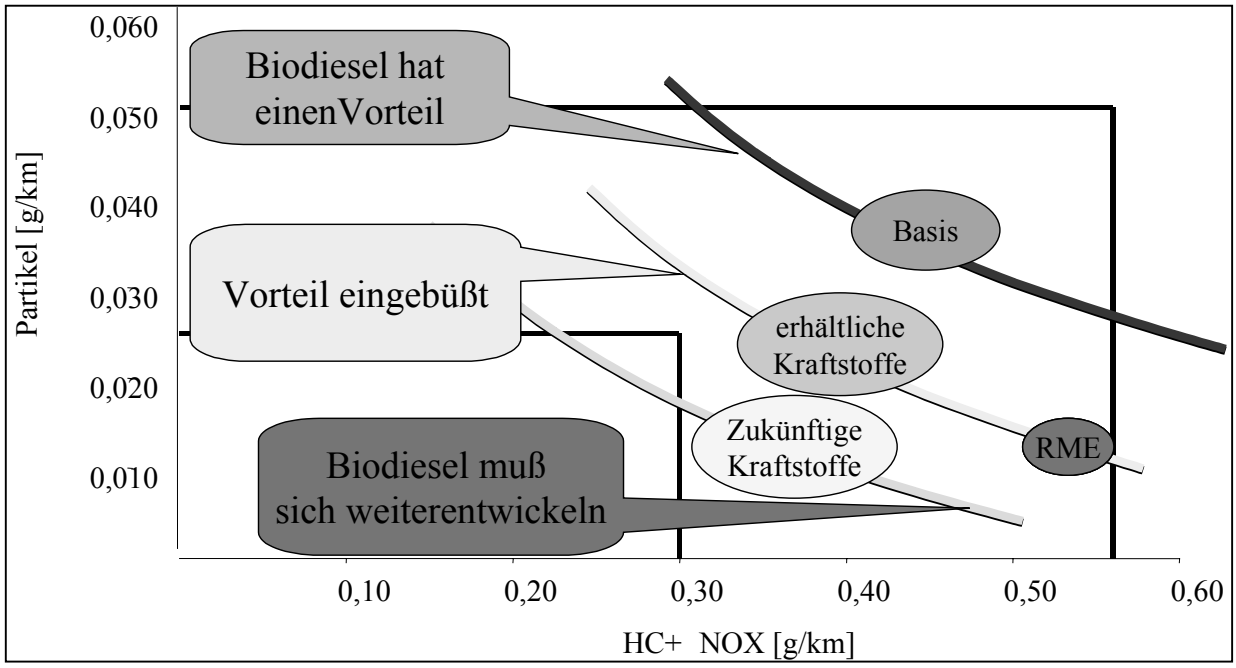


Abbildung 8:
Schadstoffemission bei Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffe

Literatur

R. Dorenkamp, *Mit Hochdruck in die Zukunft,* Baden Badener Unternehmertage, 1.9.2000, Wolfsburg

Dr. Wolfgang Steiger, Die Volkswagen Strategie zum hocheffizienten Antrieb, 22. Internationales Wiener Motorensymposium, 26.-27. April 2001, Wien

T. Garbe, Senkung der Emissionen eines PKW mit direkteinspritzendem Dieselmotor durch Verwendung von Kraftstoffen mit abgestimmtem Siede – und Zündverhalten, Dissertation Dezember 2001, Hannover

Biodiesel in modernen Nutzfahrzeugmotoren

Jürgen Blaßnegger, Stefan Schlag[1]

Kurzfassung

Knapper werdende Rohstoffressourcen und ökologische Überlegungen lassen den Ruf nach alternativen Kraftstoffen lauter werden. Vor allem Biodiesel wurde in letzter Zeit stark forciert. Die Entwicklungstätigkeit der Kraftstoffhersteller, sowie der Motor- und Einspritzsystemproduzenten ermöglicht mittlerweile unter Einhaltung gewisser Randbedingungen einen weitgehend problemlosen Einsatz dieses Treibstoffes. Wichtig für den Biokraftstoffeinsatz in Verbrennungskraftmaschinen ist die Kraftstoffqualität. Nur unter Einhaltung der in Normen verankerten Bewertungsgrößen ist es möglich die Kombination Motor–Einspritzsystem so abzustimmen und zu optimieren, dass Fahrleistungen wie im Betrieb mit fossilen Treibstoffen erreicht werden, was hier in der Bewertung eines Langzeiteinsatzes und verschiedener Prüfstandsuntersuchungen ersichtlich wird. Dies natürlich unter Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzen, sowie ohne erheblichen Mehrverbrauch.

Abstract

Nowadays, reserves of raw materials are in short supply. Due to that and to ecological reasons we are asked to think of alternative fuels. Especially biodiesel fuels are strongly pushed. The work of both, the fuel- and the engine and injection-systems producers makes the use of such fuels possible whereas specific conditions have to be observed. The quality of fuel is relevant for the use of bio-fuel in internal combustion engines. The coordination and optimization of the engine and the injection-system can only be achieved by following the fuel norms. Only then you get the same driving performance as with fossile fuels. This includes both the legally required emission limit and nearly constant fuel consumption.

[1] Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU-Graz, Inffeldgasse 25b, 8020 Graz, Österreich

Biodiesel – Definition

Die ÖNORM C 1191 und DIN E51606 definiert Fettsäuremethylester (FME) als Kraftstoff, der aus Methylester höherer, gesättigter und ungesättigter Fettsäuren pflanzlichen und/oder tierischen Ursprungs besteht und der maximal 1% der Masse FME - lösliche Zusätze zur Qualitätsverbesserung enthält. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der wichtigsten Stoffwerte von Rapsölmethylester (RME), Altspeiseölmethylester (AME) und fossilem Dieselkraftstoff.

Tabelle 1:
Durchschnittliche Stoffwerte AME, RME, Diesel

	Einheiten	AME	RME	Diesel
Unterer Heizwert	kJ/kg	~36500	37100	42700
Kraftstoff-dichte (15°C)	g/cm^3	0.88	0.878	0.835
Cetanzahl		49	48	50
Stöch. Luftver-hältnis	kg/kg	~12.8	12.82	14.4
Viskosität (20°C)	cSt	7. 05	7. 07	6.77
Viskosität (40°C)	cSt	4. 25	4. 35	4. 0
Flamm-punkt	°C	110	111	81
Siede-beginn	°C	307	ca.320	ca.180
Siedeende	°C	340	ca.360	ca.350
CFPP	°C	-5	-12	+5-24
Kohlen-stoff	% (Masse)	77.4	77.5	87
Wasser-stoff	% (Masse)	12	12.1	13
Sauerstoff	% (Masse)	10.6	10.4	0
Schwefel-anteil	% (Masse)	<< 0.01	0.002	0.04

Ausgangsprodukte

Die Ausgangsprodukte aus denen Biodiesel erzeugt wird, können pflanzlichen oder tierischen Ursprungs sein. Zur Zeit ist Rapsöl, das weltweit am häufigsten herangezogene Ausgangsprodukt gefolgt von Sonnenblumenöl. Recycelte tierische und pflanzliche Altöle und Fette werden regional oftmals forciert, gesamt gesehen nehmen sie jedoch nur einen verschwindend kleinen Anteil von unter 1% ein. Zuletzt wurde Biokraftstoff auch aus Tiermehl erzeugt. Man erhofft sich daraus auch eine Lösung der Tiermehlproblematik. Diese Treibstoff ist jedoch noch nicht normgerecht, da gewisse Eigenschaften von diesem Produkt noch nicht vollständig erfüllt werden. Vor allem die Kaltstarteigenschaften sind nicht zufriedenstellend.

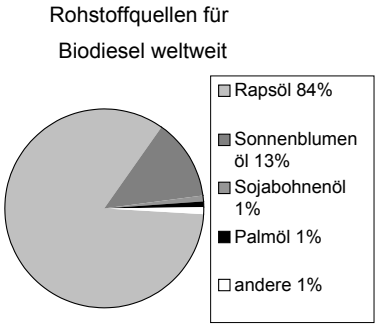


Abbildung 1:
Rohstoffquellen für Biodiesel

Motortechnische Untersuchungen, Feldtests

Die Erkenntnisse der Untersuchungen resultieren aus der Betreuung einer breiten Flottenanwendung und aus Prüfstandsuntersuchungen am Motoren- und Rollenprüfstand.

Die Untersuchungen sollten klären, ob die in den bekannten Normen (ÖNORM, DIN) festgelegten Treibstoffqualitätskriterien für einen problemlosen Einsatz aus technischer Sicht ausreichend sind. Die Bewertungskriterien dabei waren:

- Emissionsverhalten
- Fahrverhalten, Leistung und Verbrauch
- Schmierölverhalten
- Motorverschleiß
- Motorverschmutzung

Treibstoffe

Bei den verwendeten Treibstoffen handelte es sich um handelsüblichen Dieselkraftstoff (0.05 %Masse Schwefel), um normgerechten Rapsölmethylester (RME) sowie um Altspeiseölmethylester dessen Qualität der österreichischen Norm für Fettsäuremethylester (C1191) entsprach.

Fahrzeuge und Motoren

Die verwendeten Versuchsträger entsprachen dem Stand der Technik. Direkteinspritzende Nutzfahrzeug - Dieselmotoren mit und ohne Turboaufladung, 6 und 10 Zylinder, Hubraum 7 bis 10 Liter, AGR. Weiter wurden ein aufgeladener Motor und ein unaufgeladener Motor für eine Anwendung in Traktoren sowie 3 moderne Diesel PKW vermessen.

Testzyklen

Die Testzyklen an den Motor- und Rollenprüfständen waren so angelegt, dass einerseits bestmöglich die realen Einsatzbedingungen nachvollzogen wurden und andererseits die in der Abgasgesetzgebung vorgeschriebenen Testzyklen beinhaltet waren.

- Motorprüfstand: ECE-R49-13-Stufen-Test (Abbildung 2)
- LKW-Rollenprüfstand: Münchner Stadtlinienzyklus vom TÜV-Bayern (Abbildung 3), repräsentativer Müllfahrzeugzyklus vom TNO Road-Vehicles Research Institute, Niederlande
- PKW-Rollenprüfstand: EU-ECE Driving Cycle

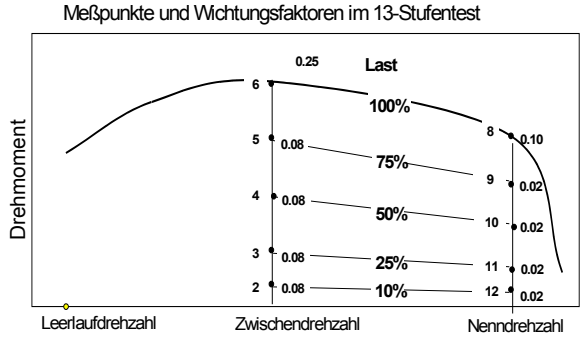


Abbildung 2:
ECE-R49-13 Stufen Test

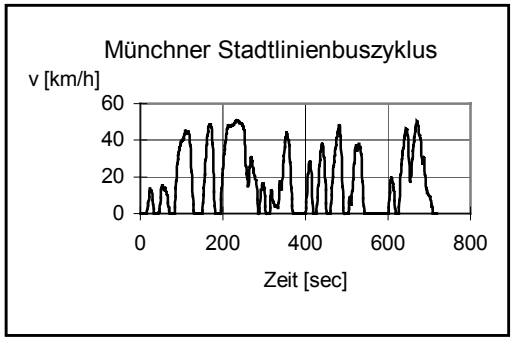


Abbildung 3:
Münchner Stadtlinienbuszyklus

Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen

Leistung, Verbrauch und Wirkungsgrad

Die Messungen, sowohl am Motorprüfstand als auch am Rollenprüfstand haben ergeben, dass der Wirkungsgrad des Motors unabhängig vom Motorenkonzept und Kraftstoff in den meisten Fällen innerhalb der Messgenauigkeit gleich bleibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich im Brennverlauf zumindest energetisch keine wesentlichen Änderungen ergeben. Unterschiede im Wirkungsgrad sind dann zu bemerken, wenn sich bedingt durch die geänderte Kraftstoffviskosität geänderte Einspritzbeginne ergeben, und darauf keine Anpassung vorgenommen wurde.

Für die Motorleistung gilt, dass bei gleichem Einspritzverhalten und damit gleichem Wirkungsgrad wegen des geringeren Heizwertes und der höheren Dichte von AME bzw. RME mit einer Leistungseinbuße von 8% zu rechnen ist. Weiter hängt die Leistungseinbuße im realen Betrieb davon ab, wie das Einspritzsystem auf die geänderte Kraftstoffviskosität reagiert. Aus den gleichen Gründen ergibt sich eine Verbrauchserhöhung von 7 bis 8% volumetrisch.

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid stellt für Dieselmotoren eine unkritische Emissionskomponente dar. Der im RME gebundene Sauerstoff bewirkt unabhängig vom Motorkonzept zusätzlich eine Senkung der CO-Emissionen um 10 bis 20% gegenüber fossilen Diesel.

Kohlenwasserstoffe

Insgesamt tritt bei den Kohlenwasserstoffen gegenüber Dieselbetrieb eine Verringerung um bis zu 50% auf. Der Streubereich bei den einzelnen Messungen ist jedoch relativ groß. Grund dafür ist, dass HC-Emissionen besonders wegen der hohen Siedelage von RME und AME stark von der Brennraumtemperatur abhängen. Speziell in Betriebspunkten mit niedriger Motorlast und damit auch niedrigerem Temperaturniveau im Brennraum, lagern sich unverbrannte HC-Verbindungen an den Ruß an. Es kommt also zu einer Verlagerung von gasförmigen HC-Emissionen zu den Partikeln. Zusätzlich führen bereits relativ kleine Unterschiede in der Gemischaufbereitung zu deutlich veränderten HC-Emissionen.

Stickoxide

Hier sind speziell im Stationärbetrieb Emissionszunahmen um bis zu 15% zu beobachten. Im dynamischen Betrieb war das Emissionsniveau annähernd gleich hoch wie im Dieselbetrieb. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der im Kraftstoff gebundene Sauerstoff in Kombination mit hohen Brennraumtemperaturen, also bei Betriebspunkten mit Verbrennungs-Luftverhältnissen um 2 und darunter zu erhöhten Stickstoffemissionen führt.

Motoroptimierung

Zusätzlich zu den Prüfstandsuntersuchungen wurde versucht ein Biodieselsetup für einen modernen Common-Rail Motor zu finden. Um eine optimale Einstellung zu finden, bedarf es sehr aufwendiger Einstelltätigkeiten. Die hier durchgeführten Verstellungen sollen nur die Stoßrichtung für ein optimales Kennfeld zeigen. Als Verstellgröße wurde der Einspritzbeginn, die Einspritzmenge und der Einspritzdruck gewählt. Durch kennfeldvariable Veränderung des Einspritzzeitpunktes im Mittel um etwa +3° gegenüber dem ursprünglichen Wert, wurden die NOx Emission auf Werte welche jenen im Dieselbetrieb entsprechen gesenkt. Im Gegenzug kam es dadurch durch zu einer Verbrauchszunahme welche durch Erhöhung des Einspritzdruckes etwas gesenkt werden konnte. Abbildung 4 zeigt eine Gegenüberstellung der Messwerte von limitierten Emissionen und Verbrauch im stationären Dieselbetrieb und im stationären Biodieselbetrieb mit und ohne Biodieselsetup. Im dynamischen Betrieb wurden größenordnungsmäßig die selben Abweichungen festgestellt.

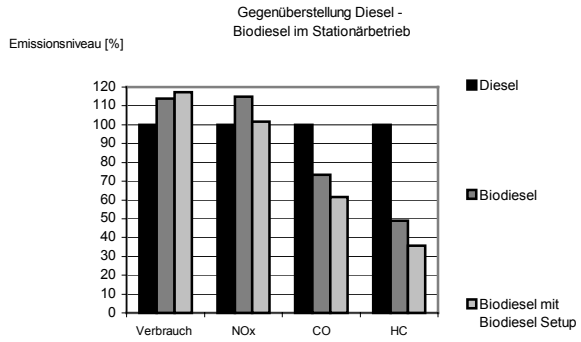


Abbildung 4:
Gegenüberstellung der Messwerte im Diesel und Biodieselbetrieb mit und ohne Biodieselsetup

Rußemissionen

Wegen des im Biodiesel gebundenen Sauerstoffs liegt ein wesentlicher Vorteil dieses Treibstoffes in der Schwarzrauchemission, also in der Abgastrübung. Besonders in Punkten hoher Last liegt die Trübung des Dieselabgases um bis zu dreimal höher.

Partikelemissionen

Definition: Partikel sind alle Stoffe, die an einem teflonbeschichteten Glasfilter oder an einem Teflonmembranfilter, der von verdünntem Abgas mit einer Temperatur von 52°C durchströmt wird abgeschieden werden.

Bei den Partikeln ist nur schwer ein eindeutiger Trend festzustellen. Partikelemissionen im Biodieselbetrieb sind von niedrigerem bis leicht überhöhtem Niveau gegenüber Dieselbetrieb feststellbar. Bei Biodieselbetrieb ist der Anteil an organisch löslichen Komponenten (=unvollständig verbrannter Kraftstoff) im Abgas höher. Zusammen mit dem schon bei den Kohlenwasserstoffemissionen beschriebenen Effekt bei niedrigen Lastpunkten, kommt es in diesen zu einer Erhöhung der Partikelemissionen.

Ergebnisse des Feldtests

Für eine wissenschaftlich kontrollierte Langzeiterprobung von Biodiesel wurden zwei Busse der Grazer Verkehrsbetriebe welche einen Großteil ihrer Flotte mit Altspeiseölmethylester (AME) betreiben über 3 Jahre beobachtet. Während dieser Testdauer betrug die Fahrleistung der Busse 150.000 bzw. 180.000 km. Dies entspricht im Stadtlinienbetrieb einer Biodieseleinsatzdauer von 7500 bzw. 9000 Betriebsstunden. Um eine definierte Vergleichsbasis zu schaffen, wurden beide Busmotoren am Testbeginn generalüberholt. Nach Abschluss der dreijährigen Testphase wurden die Bewertungen nach folgenden Kriterien vorgenommen.

- Ablagerungen im Motor
- Schmierölverhalten
- Verschleiß
- Verbrauch und Emissionsverhalten

Erfahrungen aus dem Biodieselfeldtest

- Subjektive Fahreindrücke: nicht zu bemerkender Leistungsverlust. Ein Grund dafür ist, dass die Fahrzeuge mit der jeweils stärksten erhältlichen Motorisierungsvariante bestückt waren. Dadurch machen sich Leistungseinbußen in der Größenord-

nung von 6-8% subjektiv weniger bemerkbar als bei schwächeren Motorisierungen.
- Verbrauch: stieg um 5% volumetrisch
- Motoröl: kein höherer Motorölverbrauch feststellbar. Es wurde das gleich Fabrikat wie im Dieselbetrieb verwendet
- Ölwechselintervalle: wurden mit 45.000 bzw. 60.000 km gleich wie im Dieselbetrieb gehalten
- Winterbetrieb: mit AME nicht möglich (Kaltstarteigenschaften), im Winter reine Dieselbetankung. Dies brachte Probleme mit sich, da AME Ablagerungen, welche vom Diesel herrühren loslöst und es so zu Filterverlegungen kommen kann.

Ergebnis der Bauteiluntersuchung

- Einspritzpumpe: keine beeinträchtigenden Ablagerungen ersichtlich
- Brennraum: keine über normalen Dieselbetrieb hinausgehende Ablagerungen oder Verkokungen
- Ventile und Abgassystem: keine über normalen Dieselbetrieb hinausgehende Ablagerungen
- Ölraum: keine auffällige Verunreinigung oder Schlammbildung
- An allen Bauteilen konnte kein erhöhtes Verschleißverhalten festgestellt werden.

Untersuchungen am Einspritzpumpenprüfstand

Um die Auswirkung von Biodiesel auf die Einspritzeinrichtung darstellen zu können, wurden verschiedenen Untersuchungen am Einspritzpumpenprüfstand durchgeführt. Dabei wurde die Verklebungsneigung sowie das Einspritzverhalten und die Einspritzqualität untersucht.

Untersuchung der Verklebungsneigung

Diese Versuche wurden mit Unterstützung des Instituts für Chemie durchgeführt. Als mögliche Komponenten für Verklebungserscheinungen wurden Verunreinigungen vom Ausgangsprodukt selbst, oder aus dem Umesterungsprozeß untersucht.
- Kaliumseifen
- Natriumseifen
- Calciumseifen
- Polymere
- Natürliche Fettbestandteile

Es wurden Kraftstoffe hergestellt, welche definiert mit oben genannten Komponenten zu unterschiedlichen Graden verunreinigt wurden. Mit diesen „fertig verunreinigten“ Kraftstoffen wurde ein auf dem Pumpenprüfstand montiertes Einspritzsystem über unterschiedliche Zeitspannen beaufschlagt und anschließend die Nadellösekraft der Einspritzdüsen ermittelt. Zu Verklebungserscheinungen nach 14-stündiger Beaufschlagung kam es ab folgenden Einzelkonzentrationen.

Tabelle 2:
Konzentrationsgrenzen für einzelne Verschmutzungskomponenten, ermittelt für 14-stündige Beaufschlagung

Kalium	5ppm
Calcium	5ppm
Natrium	5ppm
Gesamtverschmutzung	20ppm

Untersuchung des Einspritzverhaltens und der Einspritzqualität

Dabei wurden verschiedene Betriebspunkte jeweils mit Diesel- und mit Biodieselkraftstoff am Pumpenprüfstand mit dem gleiche Einspritzsystem angefahren (LKW-Common Rail System). Die Zuordnung des Einspritzstrahlkegelwinkels über den Raildruck zeigt deutlich, dass um ein gleiches Einspritzergebnis wie im Dieselbetrieb zu erzielen, eine Anhebung des Raildruckes im AME Betrieb um etwa 100 bar notwendig ist. Ein Ergebnis in der gleichen Größenordnung ergab die Untersuchung der Einspritzstrahllängen im Biodiesel- und Dieselbetrieb.

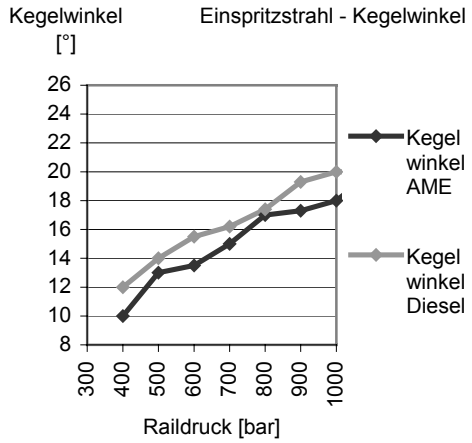


Abbildung 5:
Gegenüberstellung Einspritzstrahlkegelwinkel im Diesel- und Biodieselbetrieb; Einspritzung gegenüber Umgebungsdruck

Zusammenfassung

Unter Einhaltung gewisser Randbedingungen ist der Einsatz von Biodiesel in modernen Verbrennungskraftmaschinen problemlos möglich. Der Wirkungsgrad der Verbrennung bleibt annähernd gleich, der Verbrauch steigt für gleiche Lastpunkte auf Grund des geringeren Heizwertes um etwa 8% volumetrisch an. Bei den Emissionen kommt es zu Verbesserungen bei CO- und HC- sowie bei den Rußemissionen. Die Partikelbelastung variiert. Bei den NOx-Emissionen sind lastabhängig zum Teil Zunahmen zu beobachten. Die letzten beiden Komponenten sind jedoch gegengleich sehr stark von Motorsteuergrößen wie Einspritzzeitpunkt, Einspritzdauer und Abgasrückführrate (AGR-Rate) abhängig. Der biogene Kraftstoff besitzt trotz des geringen Schwefelgehalts gute Schmiereigenschaften. Die Neigung zur Bildung von festen Bestandteilen im Treibstoff bei niedriger Umgebungstemperatur ist gegeben. Im speziellen ist AME - Betrieb in den Wintermonaten nicht möglich. Momentan ist die Biokraftstoff-Produktionsmenge durch die Anlagenkapazität begrenzt, langfristig erfolgt die Begrenzung durch die zur Verfügung stehende Rohstoffmenge. Die theoretisch maximal mögliche substituierbare Menge liegt bei 25% des Gesamtdieselbedarfs. Zusätzlich sind Belastungen, welche durch den Anbau entstehen in eine ganzheitliche Betrachtung mit einzubeziehen.

Literatur

Schlag S.: Biodiesel im realen Motoreinsatz, Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik TU - Graz, 2001

Pischinger R, Sams Th, Mittelbach M: Wissenschaftliche Grundlagen zur Qualitätsbeurteilung von Altspeiseölmethylester und seine Erprobung als Dieselkraftstoff, Forschungsbericht Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik TU – Graz, Institut für Organische Chemie Karl-Franzens - Universität Graz, 1997

Biodiesel und Partikelfilter

Helmut Tschöke, Gunter Braungarten[1]

Abstract

In the context of a research project, the exhaust gas aftertreatment system at a modern passenger car diesel engine with electronically controlled unit injector was examined with biodiesel as well as alternating biodiesel and diesel fuel process. There were accomplished tests of particle filter loading and regeneration with an intermittent working, fuel-additive-supported exhaust gas aftertreatment system. The effect of the system was evaluated on the basis of the pressure difference determined before and behind the filter, the change of the weight of the filter, and the exhaust-gas temperature ahead of the filter. The investigations were implemented during a stationary engine running, predominantly in the range of lower part load. The regeneration of the particle filter was released torque-neutrally through an increase of the exhaust gas temperature by means of engine-related measures. Simultaneously, the burn-off temperature of soot was reduced by fuel additives.

In this text initially, the substantial characteristics of the particle filtration are compared. These characteristics are valid for particles of engines for commercial vehicles with high pressure fuel injection which are emitted during the running with biodiesel and diesel fuel [2], [3]. Subsequently, the results of the exhaust gas aftertreatment with an intermittent working, fuel-additive-supported system with SiC particle filter at a passenger car engine are presented. These results are compared while using biodiesel and diesel fuel.

In principle, the used exhaust treatment system is suitable for biodiesel and diesel fuel processes. However, in-service with biodiesel and diesel fuel considerable differences of the loading of the particle filter arise. These differences occur regarding to the pressure difference of the particle filter dependent on the loading time and the soot mass accumulated in the filter. During regeneration, no significant differences in-service with biodiesel and diesel fuel are to be determined.

Kurzfassung

Am Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen (IMKO) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Abgasnachbehandlung bei Biodiesel- sowie wechselweisem Biodiesel- und DK-Betrieb an einem modernen PKW-Dieselmotor mit elektronisch geregelter Pumpe-Düse-Einspritzung untersucht. Es wurden Partikelfilterbeladungs- und Regenerationsversuche mit einem diskontinuierlich arbeitenden, kraftstoffadditivunterstützten Abgasnachbehandlungssystem durchgeführt, wobei die Wirkung des Systems anhand der über dem Filter ermittelten Druckdifferenz, der Gewichtsveränderung des Filters und der Abgastemperatur vor dem Filter bewertet wurde. Die Untersuchungen erfolgten im stationären Motorbetrieb vorwiegend im unteren Teillastbereich des Motors. Die Regeneration des Partikelfilters wurde durch die Abgastemperaturerhöhung mittels motorischer Maßnahmen drehmomentneutral ausgelöst, gleichzeitig wurde die Rußabbrandtemperatur durch Kraftstoffadditive reduziert.

In diesem Beitrag werden eingangs die für eine Partikelfilterung wesentlichen Eigenschaften der von einem Nfz-Dieselmotor mit Hochdruckeinspritzung emittierten Partikel bei Biodiesel- und bei DK-Betrieb gegenübergestellt [2], [3]. Anschließend werden die Ergebnisse der Abgasnachbehandlung mit einem diskontinuierlich arbeitenden, kraftstoffadditivunterstützten System mit SiC-Partikelfilter bei Betrieb des Pkw-Motors vorgestellt und bei Biodiesel- und DK-Einsatz verglichen.

Das verwendete Abgasnachbehandlungssystem ist grundsätzlich für Biodiesel- und DK-Betrieb geeignet. Es treten bei der Beladung des Partikelfilters bei Biodiesel- gegenüber DK-Betrieb jedoch erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Druckdifferenz des Partikelfilters in Abhängigkeit von der Beladezeit und der auf dem Filter gesammelten Rußmasse auf. In der Regenerationsphase sind keine signifikanten Unterschiede bei Biodiesel- und DK-Betrieb festzustellen.

[1] Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen (IMKO), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

1. Einleitung

Die United Nations Economic Commission for Europe (ECE) gibt die Rahmenbedingungen für die Herstellung emissionsarmer Fahrzeugtypen vor. Die für Dieselneufahrzeuge zukünftig geltenden Abgasstandards beinhalten eine drastische Senkung insbesondere der Partikelemission. Die Partikelemission der derzeit gültigen Vorschriften wird für Pkw mit der Einführung der EU-4-Norm im Jahr 2005 nochmals halbiert, für Nutzfahrzeugmotoren sogar um 80 % reduziert.

Die Emissionsreduzierung stellt deshalb einen Schwerpunkt in der Entwicklung der Dieselmotoren dar. Neben den primären innermotorischen Maßnahmen sind hierbei die außermotorischen Verfahren zur Abgasnachbehandlung sowie die Qualität des Kraftstoffes zunehmend von Bedeutung.

Für den Antrieb von Fahrzeugen werden besonders intensiv in den letzten 10 Jahren u. a. alternative Primärenergieträger für den Einsatz in Verbrennungsmotoren diskutiert, entwickelt und erprobt. Hierbei stehen neben gasförmigen und synthetisch erzeugten flüssigen Kraftstoffen auch pflanzenölbasierte Kraftstoffe im Vordergrund. Zu den letztgenannten gehört auch der in Europa inzwischen weit verbreitete Rapsmethylester (RME) oder Biodiesel genannte Kraftstoff für Dieselmotoren.

Der Einsatz von erneuerbarem und schwefelfreiem Biodiesel (RME) ist ein Beitrag zur Reduzierung der schädlichen und klimarelevanten Abgasemission und schont gleichzeitig die abnehmenden Erdölressourcen. Das Potential von pflanzenölbasierten Kraftstoffen am gesamten für den Verkehr derzeit benötigten Dieselkraftstoff liegt in Europa nach Schätzungen zwischen 5 und 30 % [6].

Am Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen (IMKO) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Abgasnachbehandlung bei Biodiesel-Betrieb an einem modernen Pkw-Dieselmotor mit elektronisch geregelter Pumpe-Düse-Einspritzung untersucht. Das Verbundforschungsvorhaben wurde von der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP), der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), der Volkswagen AG Wolfsburg sowie dem Biodieselhersteller Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co. gefördert und hinsichtlich des zeitgleich bearbeiteten Teilvorhabens „Bestimmung nicht limitierter Emissionen und differenzierte Partikelanalyse“ gemeinsam mit der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL Braunschweig), der Fachhochschule Coburg und der Universität Göttingen bearbeitet [1].

Die bekannten Abgasnachbehandlungssysteme für Dieselmotoren wurden bisher für die Verwendung von Dieselkraftstoff entwickelt. Die Auswirkungen von Biodiesel ebenso wie die Auswirkungen des wechselweisen DK- und Biodiesel-Betriebs auf die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems waren bislang nicht ausreichend bekannt. Der Schwerpunkt der am IMKO durchgeführten Untersuchungen, die nachfolgend im Vordergrund stehen, lag in der Erfassung des grundsätzlichen Betriebsverhaltens eines in Entwicklung befindlichen diskontinuierlich arbeitenden Abgasnachbehandlungssystems mit Kraftstoffadditivunterstützung bei Biodiesel- und wechselweisem Biodiesel- und DK-Betrieb.

Unter Bezugnahme auf das im März 2001 abgeschlossene Verbundvorhaben „Optimierung eines modernen Dieselmotors auf den Betrieb mit Biodiesel“ [2] und die Dissertation „Dreidimensionale Erfassung und Charakterisierung von Dieselpartikeln“ [3] werden außerdem einige wesentliche Untersuchungsergebnisse zur Partikelemission bei Einsatz von Biodiesel und DK in einem Nfz-Dieselmotor vorangestellt, Kapitel 5.1.

2. Aufgabenstellung

Ziel ist die Ermittlung der grundsätzlichen Eignung eines in Entwicklung befindlichen Abgasnachbehandlungssystems bei Einsatz von Biodiesel (RME) und wechselweisem DK- und Biodiesel-Betrieb.

Die Untersuchungen sind an einem serienmäßigen Pkw-Vollmotor mit einem für Dieselkraftstoff optimierten Abgasnachbehandlungssystem und einer Kombination von Regenerierungsverfahren des Partikelfilters durchzuführen.

Beladungs- und Regenerationsverhalten stellen den Schwerpunkt der Prüfstandsuntersuchungen dar.

3. Versuchsträger

3.1 Versuchsmotoren

Als Versuchsträger kam ein 4-Zylinder-PKW-Dieselmotor der Volkswagen AG gemäß Tabelle 1 mit ATL und Ladeluftkühlung zum Einsatz.

Tabelle 1:
Technische Daten der Versuchsträger

	Pkw-Motor	**Nfz-Motor [2]**
Fabrikat/Typ	1,9 l TDI	BF6M1013EC
Arbeitsverfahren	Viertakt-Dieselmotor Direkteinspritzung	Viertakt-Dieselmotor Direkteinspritzung
Zylinderanordnung	4 Zylinder in Reihe	6 Zylinder in Reihe
Hubraum	1,90 l	7,14 l
Hub/Bohrung	95,5 mm/79,5 mm	130 mm/108 mm
Verdichtungsverhältnis	18	17,6
Nennleistung	85 kW bei 4000 1 /min	148 kW bei 2300 1/min
Nennmoment	285 Nm bei 1900 1/min	852 Nm bei 1400 1/min
Einspritzpumpe	Pumpe-Düse-Einspritz-System (PDE)	magnetventilgesteuerte Einzeleinspritzpumpen (PLD)
Aufladung	ATL mit Leitschaufelverstellung	ATL ohne/mit Waste-Gate

Für die Untersuchung der Partikelemission (Partikelgesamtmasse, mittlerer aerodynamischer Partikeldurchmesser, morphologische Struktur, unlösliche und lösliche Fraktion) wurde in [2] der ebenfalls mit ATL und Ladeluftkühlung ausgerüstete Nfz-Dieselmotor der Motorenwerke DEUTZ AG verwendet.

3.2 Abgasnachbehandlungssystem

Die folgende Abbildung 1 zeigt das Abgasnachbehandlungssystem mit den Messstellen für die Abgastemperaturen, die Gasentnahme zur Emissionsmessung, die Rauchgasentnahme zur Bestimmung der Schwärzungszahl sowie für die Druckdifferenz am Partikelfilter.

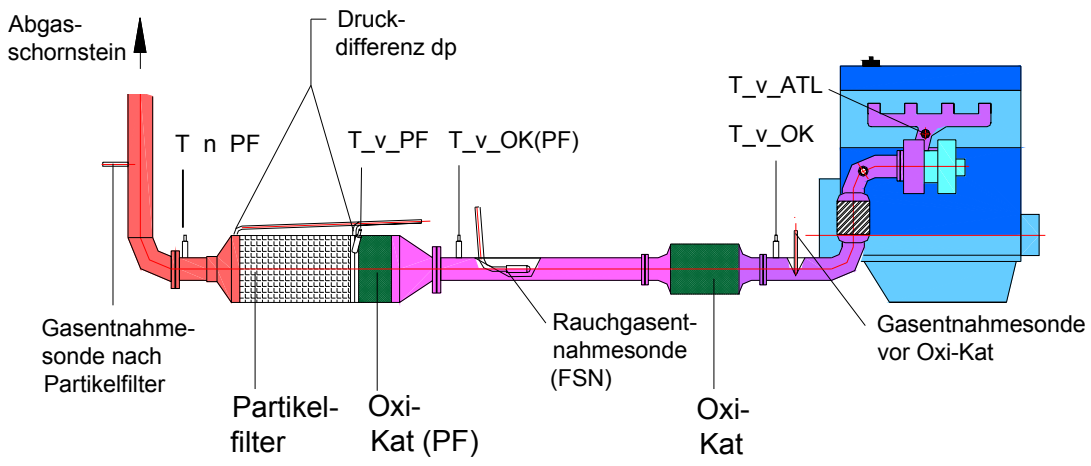


Abbildung 1:
Abgasnachbehandlungssystem mit Messstellenanordnung

Die Anlage stellt ein diskontinuierlich arbeitendes System mit Kraftstoffadditivunterstützung dar, d.h. die Regeneration des beladenen Filters erfolgt diskontinuierlich. Sie wird durch motorische Maßnahmen, die die Abgastemperatur mittels „später“ Nacheinspritzung sowie veränderter Abgasrückführrate und reduzierter Verbrennungsluftmasse drehmomentneutral erhöhen, bewirkt. Die wesentlichen Bestandteile sind

- der motornahe Oxidationskatalysator
- der Oxidationskatalysator vor dem Partikelfilter (gemeinsames Gehäuse mit dem Partikelfilter) und
- der SiC-Partikelfilter,

deren Anordnung hinsichtlich der Leitungslängen und des Abgasgegendruckes nach dem Partikelfilter dem Pkw-Einbau angeglichen war.

3.3 Kraftstoffe

Die wichtigsten Kennwerte der eingesetzten Kraftstoffe sind in der Tabelle 2 enthalten:

Tabelle 2:
Kennwerte der Versuchskraftstoffe

Kraftstoff (ohne Additivzusatz)		**DK**	**Sommer-RME**	**Winter-RME**
Dichte bei 15 °C	kg/m^3	830	883	883
Viskosität bei 40 °C	mm^2/s	2,642	4,50	4,50
Cetanzahl		55	53	>55
Schwefelgehalt	mg/kg	290	<10	<10
Flammpunkt	°C	61	>170	>150
Aschegehalt	%	0,001	<0,01	<0,01
Wassergehalt	mg/kg	54	144	176

Der dem Motorkraftstoff im Vorratstank zugemischte Additivanteil von 0,357 ml/Liter Kraftstoff wirkt als Oxidationsbeschleuniger und erzeugt eine Absenkung der Rußoxidationstemperatur. Als Additiv wurde „satacen 2“ (Wirkstoff Fe) verwendet.

4. Versuchsdurchführung

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der Untersuchung des Abgasnachbehandlungssystems erfolgten stets mit additiviertem Biodiesel (RME) und mit additiviertem Dieselkraftstoff. Die Versuche wurden mit dem jeweiligen Kraftstoff (RME oder DK) fortlaufend nummeriert und die Zahl dem jeweiligen Kraftstoff nachgestellt. (Z. B. bedeutet „RME3“: Versuch Nr. 3 mit additiviertem RME). Zusätzlich erfolgte die Angabe der vor dem jeweiligen Versuch absolvierten Betriebsdauer des Partikelfilters (z. B.: Zeit vor Beladung: 40 h).

Die Versuche wurden mit Biodiesel (Sommer-RME) begonnen (RME0 bis RME2). Für Versuch RME3 und den weiteren Biodiesel-Betrieb kam Winter-RME zum Einsatz.

Nach einer Betriebsdauer von 131 Stunden mit RME erfolgten die Versuche mit DK bis zur 180. Betriebsstunde. Zum Abschluss kam bis zur 213. Betriebsstunde wiederum Biodieselkraftstoff zum Einsatz.

Mit Ausnahme der Regenerationsvorgänge bei Volllast ($n = 4000$ 1/min, $M_d = 203$ Nm) wurde der Pkw-Motor für alle Beladungs- und Regenerationsversuche stationär im Teillastprüfpunkt $n = 1790$ 1/min, $M_d = 39$ Nm betrieben.

Für die Filterbeladung über mehrere Stunden wurden die einzelnen Messgrößen anfangs im Minutenabstand und für die Regeneration im Sekundenabstand erfasst und registriert. Zur genaueren Erfassung der Messwerte außer der Schwärzungszahl wurde von Versuch RME3 an die Abtastrate während der Filterbeladung auf 1Hz und während der Regeneration auf 60 Hz erhöht. Die Messwerte wurden gemittelt und im Minutenabstand bzw. Sekundenabstand registriert.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Kraftstoffverbrauch und Partikelemission bei Biodiesel im Nfz-Dieselmotor [2]

Bekannt ist, dass die Schwärzungszahlen bei RME-Betrieb jeweils deutlich unter den mit DK ermittelten Werten liegen. Ebenso ist bekannt, dass durch einen späteren Förderbeginn bei RME das DK-Stickoxidniveau erreicht werden kann.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der gravimetrischen, volumetrischen und energetischen, spezifischen Kraftstoffverbräuche bei DK- und RME-Betrieb ohne Veränderung der Serienapplikation (ATL ungeregelt) sowie bei dem RME-optimiertem Betrieb. Die Optimierung erfolgte durch Variation des Förderbeginns und des Ladedruckes (ATL mit Waste-Gate).

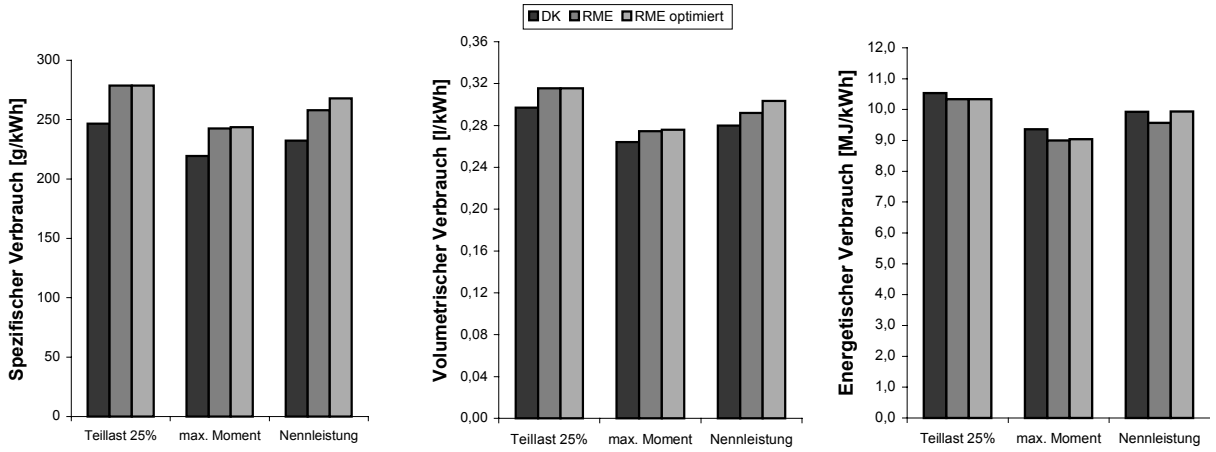


Abbildung 2:
Gravimetrische, volumetrische und energetische Kraftstoffverbräuche bei Teillast 25%, max. Moment und Nennlast

Aufgrund der unterschiedlichen Dichten und Heizwerte ergab sich ein etwa 10% höherer gravimetrischer spezifischer Kraftstoffverbrauch für den Biodiesel und für den volumetrischen Verbrauch eine Erhöhung von ca. 4%. Die Unterschiede im energetischen Verbrauch waren gering.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Partikelgesamtmasse bei DK- und RME-Betrieb für die untersuchten Betriebspunkte. Im RME-Betrieb ist die Partikelgesamtmasse betriebspunktabhängig um bis zu 60 % geringer als die Partikelmasse bei DK.

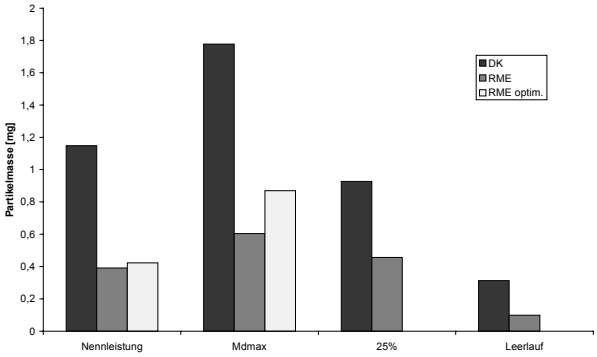


Abbildung 3:
Partikelgesamtmasse bei DK, RME und $RME_{optimiert}$

Die mittleren aerodynamischen Durchmesser der Partikel sind in Abbildung 4 dargestellt:

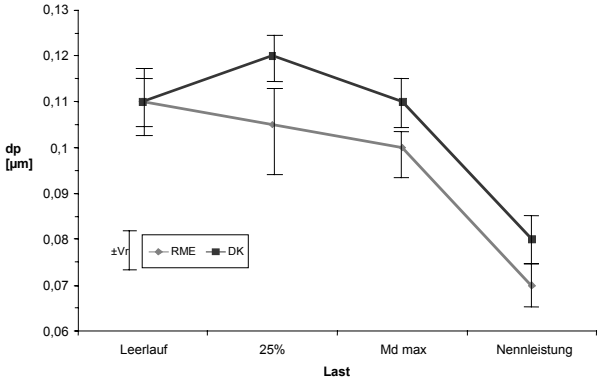


Abbildung 4:
Mittlerer aerodynamischer Partikeldurchmesser dp bei DK und RME

Neben der schon erwähnten Lastabhängigkeit ist hier zunächst deutlich sichtbar, dass die mittleren Durchmesser bei RME-Betrieb kleiner sind als bei DK-Betrieb. Die Unterschiede betragen ca. 10%. Da der Absolutwert jedoch sehr klein ist, sollten diese Unterschiede nicht überinterpretiert werden.

Nach der am IMKO entwickelten Methode [3] wurde die morphologische Struktur der Rußpartikel bei unterschiedlichen Auflösungsstufen für DK und RME ermittelt.

Die Ergebnisse bei Nennleistung zeigt Abbildung 5:

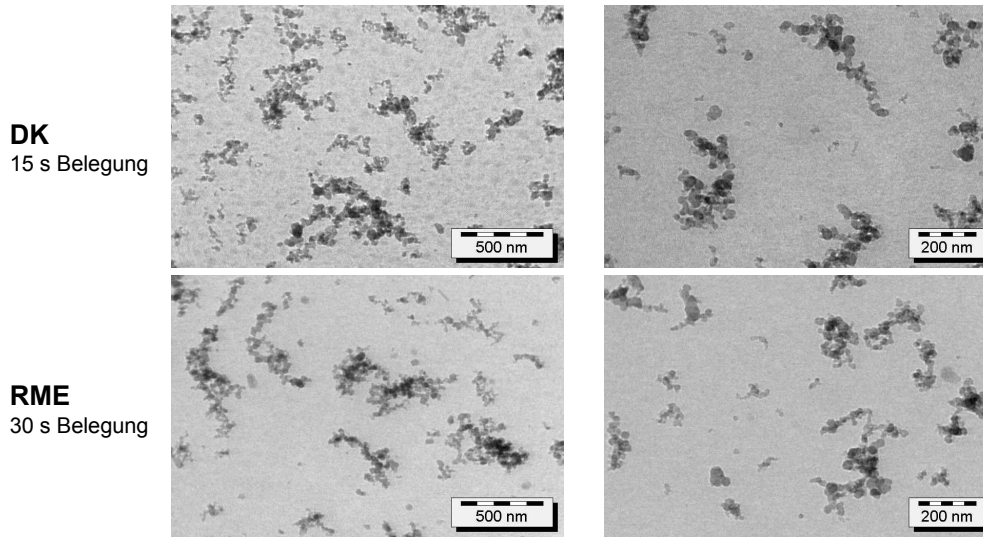


Abbildung 5:
Morphologische Struktur der Partikel für DK und RME bei Nennleistung

Signifikante Unterschiede in der Struktur sind nicht erkennbar. Die Belegungszeit für DK musste jedoch halbiert werden (15 s), da bei 30 s eine „Überbelegung“ mit Rußpartikeln erfolgte und Strukturen kaum mehr erkennbar waren.

Der Anteil unlöslicher Komponenten des Abgases, der näherungsweise dem Ruß entspricht, sowie der löslichen Komponenten geht für die vier untersuchten Betriebspunkte aus Abbildung 6 hervor.

Die in zahlreichen epidemiologischen Studien belegten Gesundheitsrisiken durch Partikelemissionen werden zu einem wesentlichen Teil auf den Rußausstoß zurückgeführt.

Mit Ausnahme des Leerlaufpunktes waren die unlöslichen und die löslichen Fraktionen bei RME geringer als bei DK.

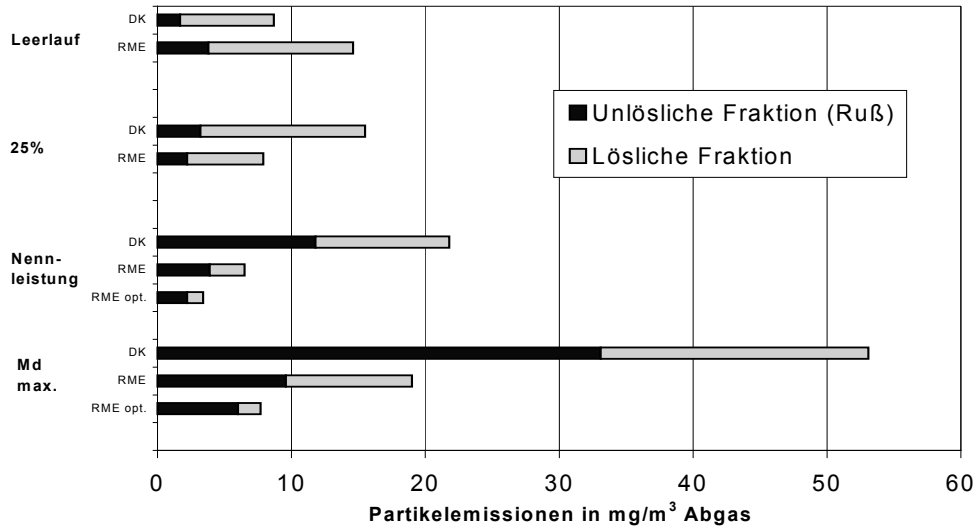


Abbildung 6:
Lösliche und unlösliche Bestandteile (Ruß) am Partikelausstoß im DK- und RME-Betrieb

5.2 Abgasnachbehandlung bei Biodiesel- und DK-Betrieb des Pkw-Motors

Partikelfilter sind nach heutigem Kenntnisstand die einzige verfügbare Ausrüstung, um die Partikelemission direkteinspritzender PKW-Dieselmotoren um mehr als 90 % und damit auf das Niveau von Ottomotoren zu senken. Dies gilt auch für die Kleinstpartikel unterhalb einer Größe von 100 nm [4].

Die wesentliche Herausforderung in der Partikelfiltertechnologie besteht im allgemeinen nicht in der Partikelfiltration sondern in der Regeneration des Filters durch die Verbrennung der angesammelten Partikelmasse im gesamten Motorkennfeld. Die Oxidation von Ruß (graphitischer Kohlenstoff, auch mit angelagerten Kohlenwasserstoffverbindungen) erfolgt mit molekularem Sauerstoff oberhalb von 600 °C. Diese Temperaturen treten im Regelfall beim PKW-Fahrzyklus nicht auf. Deshalb sind zusätzliche Maßnahmen zur Regenerierung des Partikelfilters notwendig:

- Absenkung der Rußoxidationstemperatur (Oxidationsbeschleunigung) einerseits und
- Anhebung der Abgastemperatur andererseits [5].

Die Oxidation kann beschleunigt werden mit Hilfe von:

- NO_2 aus dem Dieselabgas, das in einem Oxidationskatalysator aus NO erzeugt wird,
- katalytischer Beschichtung des Partikelfilters und/oder
- Additivzugabe zum Kraftstoff, wobei die Verbrennungsprodukte des Additivs im Filter katalytisch wirksam werden. Dem positiven Effekt der Senkung der Rußabbrandtemperaturen steht der Nachteil der Aschebildung im Partikelfilter gegenüber. Es wird unterschieden zwischen einer vormotorischen Zugabe des Additivs in den Motorkraftstoff und einer nachmotorischen Zugabe zum Dosierkraftstoff für einen katalytischen Brenner.

Die Anhebung der Abgastemperatur kann erzeugt werden durch:

- motorische Maßnahmen (Motorbetrieb mit sehr „später“ Verbrennung) oder
- direkte Beheizung des Abgases mit elektrischer Heizung oder durch Einsetzen von Brennersystemen.

Es ist unumgänglich, die Druckdifferenz über dem Partikelfilter zu überwachen. Bei Überschreitung eines kritischen Wertes muss die Filterregenerierung durch gezielte obige Maßnahmen eingeleitet werden.

Da bei Motorbetrieb mit Biodiesel und wechselweisem Biodiesel- und DK-Betrieb bisher keine ausreichenden Erfahrungen vorlagen, war sowohl der Beladungs- als auch der Regenerationsvorgang zu untersuchen.

5.2.1 Beladung des Partikelfilters bei Biodiesel-Betrieb

Die zulässige Belademasse des verwendeten Partikelfilters war vom Lieferanten mit 15 g festgelegt. Die bei RME-Betrieb wirkende Druckdifferenz des Filters in Abhängigkeit von der Belademasse und der Beladezeit war nicht bekannt. Für den Motorbetrieb mit Biodiesel war auf Grund der geringeren Partikelemission eine deutlich längere Beladezeit als bei DK-Betrieb zu erwarten. Um die Belademasse zeitabhängig zu erfassen, wurde der Beladevorgang mehrfach unterbrochen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 7.

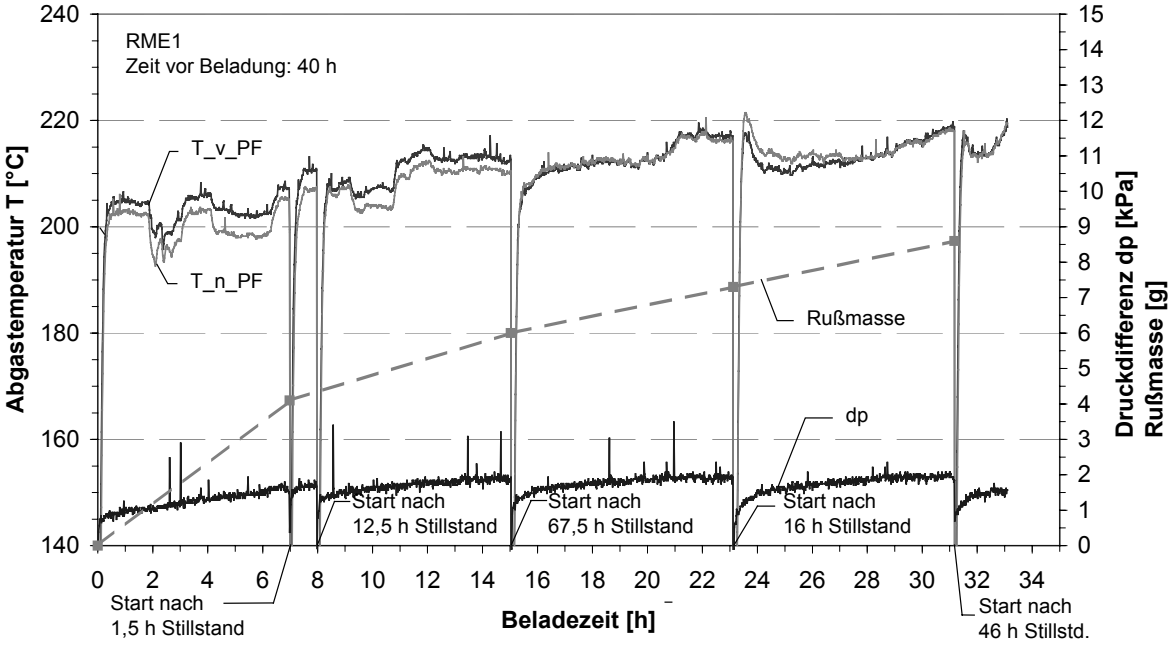


Abbildung 7:
Abgastemperatur vor und nach PF, Druckdifferenz und Rußmasse bei RME-Betrieb für mehrfach unterbrochene Beladung

In diesem wie auch in den folgenden Abbildungen ist unterhalb der Angabe des verwendeten Kraftstoffs und der Versuchsnummer (RME1) die jeweils vor dem Versuch absolvierte Betriebsstundenzahl des Partikelfilters eingetragen.

Nach den 7- und 8-stündigen Beladeperioden wurde der Partikelfilter insgesamt 4 mal bei stets gleicher Temperatur T_v_PF = 65 °C ausgebaut und bei T_v_PF = 48 °C gewogen und unmittelbar danach sofort wieder eingebaut. Mit fortschreitender Beladezeit ist die etwas geringer werdende Rußzunahme sowie die Erhöhung der Abgastemperaturen erkennbar. Die Temperatur nach dem Partikelfilter lag zeitweilig über den vor dem Partikelfilter gemessenen Werten, insbesondere bei Wiederaufnahme des Motorbetriebs nach Stillstandszeiten und längerer Beladezeit.

Die Druckdifferenz über dem Partikelfilter stieg bei den Motorstarts nach den Stillstandszeiten, von 0 kPa beginnend, während der jeweiligen Erwärmungsphase mit zunehmender Abgastemperatur steil an. Bei Erreichen der Betriebstemperatur war sie jedoch stets geringer als vor dem Abstellen des Motors. Sie erreichte im Maximum gerade den Wert von 2 kPa und überschritt nach 31,17 Stunden Beladezeit trotz weiter angewachsener Belademasse kaum den bereits nach 8 Stunden erreichten Wert. Eine kurze Stillstandszeit (hier 1,5 Stunden) hat nur eine geringe Senkung der Druckdifferenz bewirkt.

Bei unterbrechungsfreier Beladung stellte sich ein signifikant anderer Verlauf der Druckdifferenz ein, Abbildung 8:

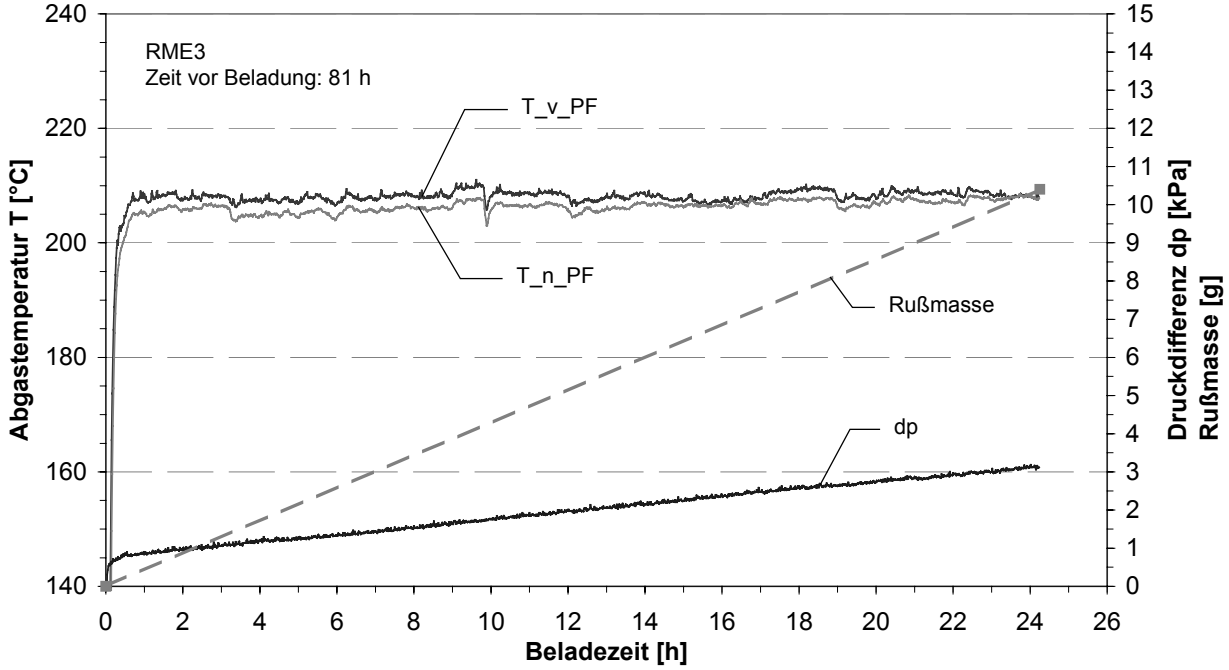


Abbildung 8:
Abgastemperatur vor und nach PF, Druckdifferenz und Rußmasse bei unterbrechungsfreier Beladung für RME-Betrieb

Während der Beladung erfolgte ein kontinuierlicher Anstieg der Druckdifferenz. Der Endwert nach 24,25 Stunden lag geringfügig über 3 kPa. Die Rußmassenbeladung des Filters wurde mit 10,4 g ermittelt. Der Verlauf der Abgastemperaturen erfolgte mit einem leichten Anstieg über der Beladezeit.

Zum Abschluss der Untersuchungen wurde der Versuch nach einer Filtergesamtlaufzeit von 189 Stunden wiederholt, Abbildung 9:

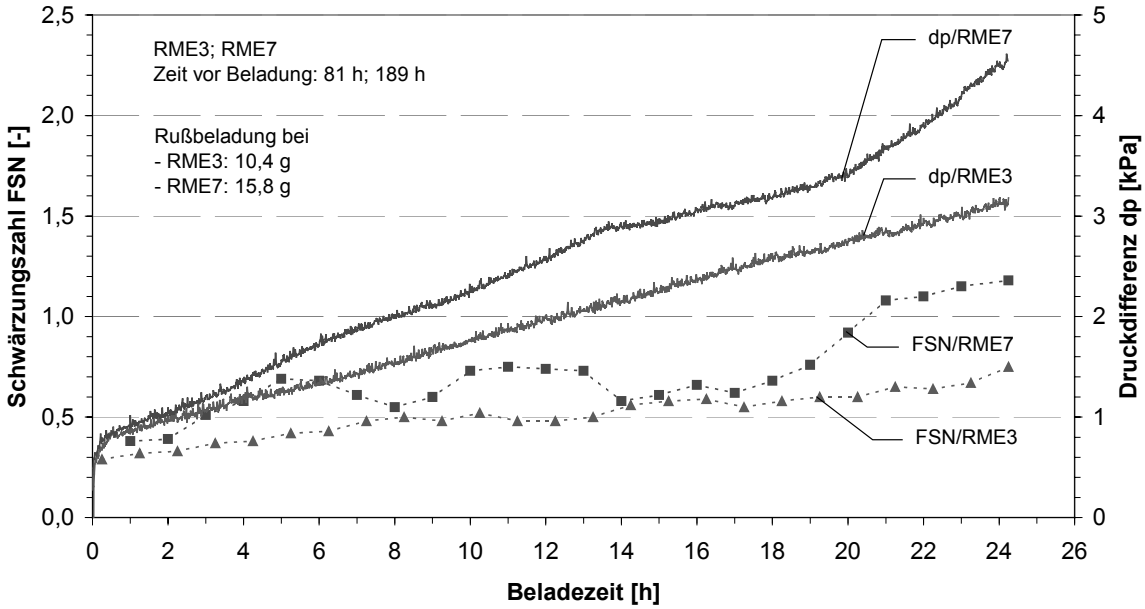


Abbildung 9:
Druckdifferenz und Schwärzungszahl bei RME-Betrieb für unterbrechungsfreie Beladungen

Auffallend ist die im Abschlussversuch RME7 im Vergleich zum Versuch RME3 stark schwankende und auf das ca. 1,5-fache erhöhte mittlere Schwärzungszahl, d.h. die emittierte Partikelmasse war bei Versuch RME7 trotz gleicher Motorbelastung (n = 1790 1/min, M_d = 39 Nm) größer. Es ist erkennbar, dass mit abnehmender Schwärzungszahl bei Versuch RME7 der Anstieg des Differenzdruckverlaufs flacher und mit zunehmender Schwärzungszahl steiler wurde.

Die auf dem Partikelfilter angesammelte Rußmasse betrug 15,8 g und somit gegenüber dem Versuch RME3 etwa das 1,5-fache.

5.2.2 Vergleich der Beladung des Partikelfilters bei RME- und DK-Betrieb

Abbildung 10 zeigt den Vergleich der charakteristischen Unterschiede der unterbrechungsfreien Beladung bei Biodiesel- und DK-Betrieb:

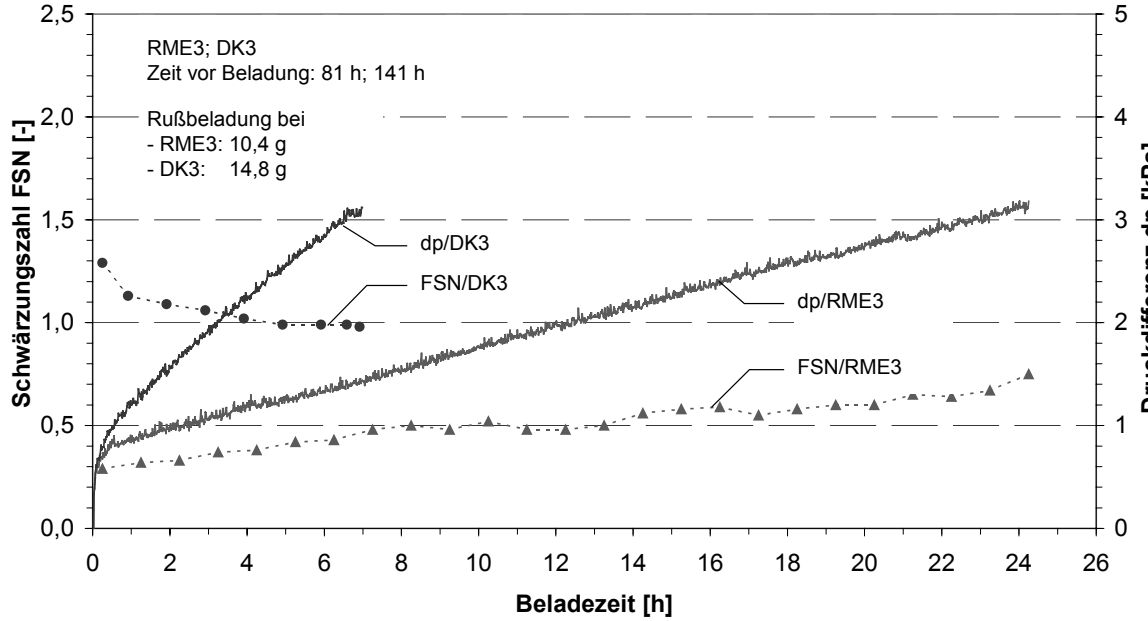


Abbildung 10:
Druckdifferenz und Schwärzungszahl im RME- und DK-Betrieb

- Bei Motorbetrieb mit RME-Kraftstoff erfolgte der kontinuierliche Verlauf der Druckdifferenz über dem Partikelfilter während der Beladezeit mit deutlich geringerem Anstieg als bei DK. In 24,25 Stunden war die Druckdifferenz dp auf ca. 3,1 kPa angewachsen, wobei 10,4 g Ruß im Filter angesammelt wurden. Bei DK hingegen wurden in nur 7–stündiger Beladung 14,8 g Ruß angesammelt, wobei die Druckdifferenz etwa den gleichen Endwert erreichte.
- Die vor dem Partikelfilter gemessene Schwärzungszahl FSN war bei RME gegenüber DK sichtbar geringer und stieg während der Beladezeit an. Die höheren Schwärzungszahlen bei DK wurden während der Beladezeit geringer, blieben jedoch über dem bei RME gemessenen Niveau.

Die Darstellung aller bei gleichem Lastpunkt durchgeführten Beladevorgänge mit den additivierten Kraftstoffen RME und DK hinsichtlich der jeweils im Filter angesammelten Rußmasse zeigt folgende Abbildung 11:

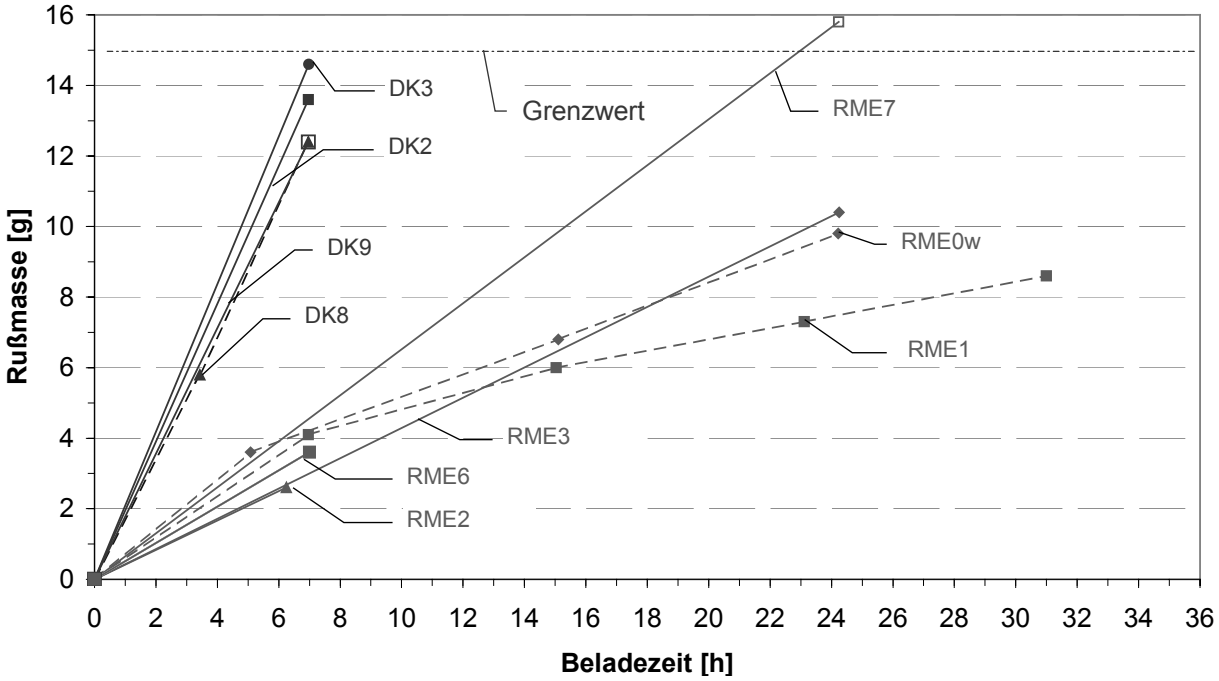


Abbildung 11:
Rußmasse auf dem Partikelfilter für Beladungen im RME- und DK-Betrieb

In diesem Diagramm sind sowohl alle unterbrechungungsfreien Beladevorgänge erfasst, bei denen der Partikelfilter vor Beginn der Beladung und nach Beladungsende zur Bestimmung der angesammelten Rußmasse gewogen wurde, als auch Versuche mit unterbrochener Beladung. Unterbrochene Beladungen sind gestrichelt dargestellt: nach jeder Beladungsperiode wurde der Filter ausgebaut und gewogen (Versuche RME0w, RME1, DK8).

Die bei DK nach jeweils 7 Stunden abgeschlossenen sowie nach 3,5 Stunden unterbrochenen Beladungsvorgänge haben gegenüber RME eine geringere Streuung der ermittelten Rußmasse in Abhängigkeit von der Beladezeit und eine deutlich höhere Rußmasse bei gleicher Beladezeit ergeben.

Dabei ist davon auszugehen, dass die Abgastemperaturen vor dem Partikelfilter bei RME und bei DK keine nennenswerten Unterschiede aufgewiesen haben. Sie lagen bei den unterbrochenen Beladeversuchen bei 205 bis 219 °C (vgl. RME1) und bewegten sich bei unterbrechungsfreier Beladung im allgemeinen zwischen 208 und 212 °C.

Die gemessene Rußmasse bei RME-Betrieb ist sowohl abhängig von der Größe der Schwärzungszahl als auch davon, ob die Beladung ohne oder mit Unterbrechungen erfolgte. Bei DK-Betrieb war der Einfluss von Unterbrechungen offensichtlich geringer, wie am Beispiel des Versuchs DK8 erkennbar ist.

Die folgende Abbildung 12 zeigt die Verläufe der Druckdifferenz für die in Abbildung 11 dargestellten Beladungsvorgänge:

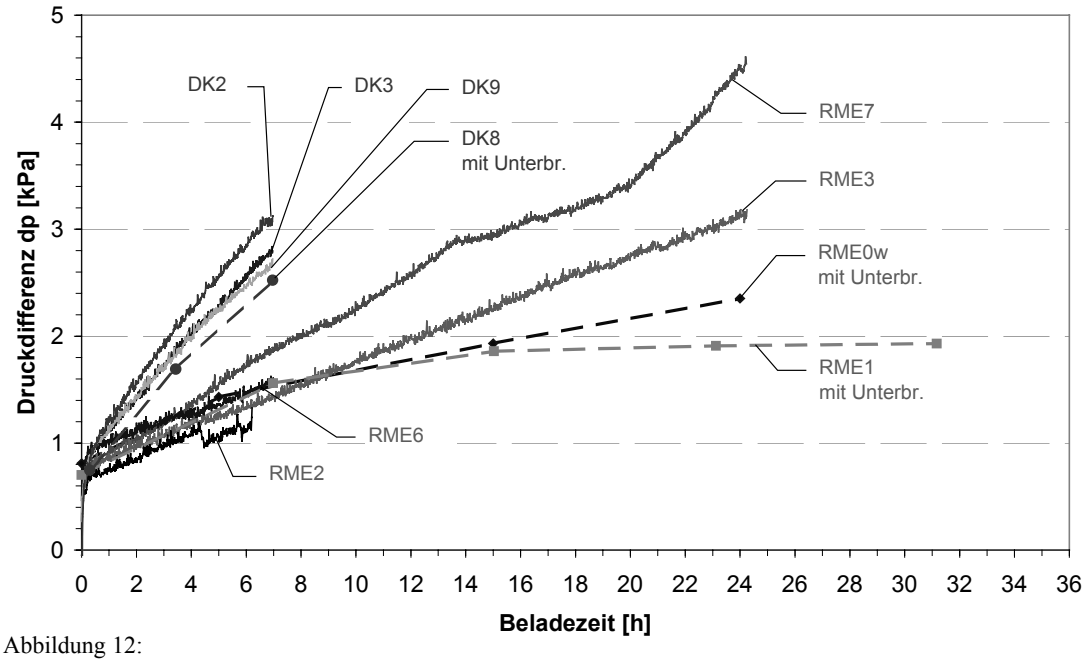


Abbildung 12:
Druckdifferenzen am Partikelfilter für Beladungen bei RME und DK

Bei DK fällt der gegenüber RME steilere Anstieg der Druckdifferenz auf.

Die Unterbrechung des Beladevorgangs über 17,5 Stunden bei Versuch DK8 hatte im Gegensatz zu den Versuchen RME0w und RME1 nur eine geringe Auswirkung auf den Druckdifferenzverlauf.

Bei dem mehrfach unterbrochenen Versuch RME1 stieg die Druckdifferenz nicht über ca. 2 kPa , obwohl dieser Versuch die längste Beladezeit aufwies. Nach der 7. Stunde erfolgten bei diesem Versuch drei Beladeperioden mit dazwischen liegenden Motorstillstandszeiten von 12,5 bis maximal 67,5 Stunden. Die Druckdifferenzverläufe insbesondere der letzten beiden Perioden unterschieden sich nur sehr wenig voneinander. Dabei ist zu bemerken, dass trotzdem eine nahezu konstante Massenzunahme des Partikelfilters von Beladeperiode zu Beladeperiode festgestellt wurde (s. a. Abbildung 7).

Dieses Ergebnis zeigt u. a., dass bei Einsatz von RME-Kraftstoff und den im PKW-Fahrbetrieb im allgemeinen täglich zu erwartenden Stillstandszeiten die Überwachung der Druckdifferenz über dem Partikelfilter als alleinige Größe zur Einleitung der diskontinuierlichen Regeneration und Begrenzung der Beladezeiten nicht ausreicht, da der Rußmasse des Partikelfilters ebenfalls Grenzen gesetzt sind.

In Abbildung 13 wird die Abhängigkeit der Druckdifferenz des Partikelfilters von der beladenen Rußmasse dargestellt:

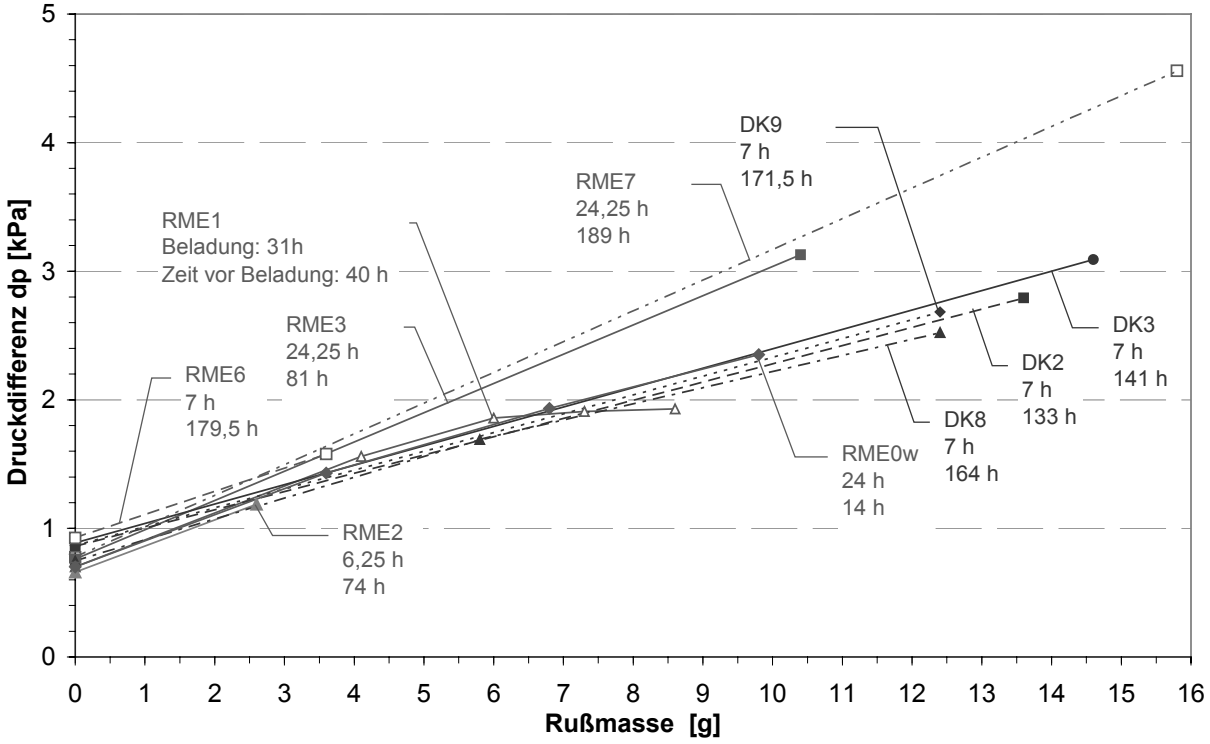


Abbildung 13:
Druckdifferenz in Abhängigkeit von der Rußmasse bei RME und DK

Unabhängig von den aufgetretenen Schwärzungszahlen zeigt diese Abbildung, dass bei den miteinander vergleichbaren unterbrechungsfreien Beladevorgängen DK3 und RME3 die bei RME-Kraftstoff angesammelte gleich große Rußmasse eine höhere Druckdifferenz über dem Filter als bei DK bewirkt.

Abbildung 14 zeigt in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl FSN* der unterbrechungsfreien Beladevorgänge die stündlich angesammelte Rußmasse auf dem Partikelfilter bei RME- und DK-Betrieb. Die mittlere Schwärzungszahl ist hierbei derjenige Mittelwert, der aus den Mittelwerten der während der Beladung im Abstand von 1 Stunde jeweils 3-fach erfassten FSN-Werte gebildet wurde.

Die eingetragenen Messpunkte lassen in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl FSN* die großen Unterschiede der auf dem Filter pro Stunde angesammelten Rußmasse für die Kraftstoffe RME und DK erkennen. Während die Rußmassenzunahme für die Beladung bei Verwendung von RME maximal 0,65 g/h bei FSN* = 0,72 betrug, lag der Wert für DK im Minimum bei 1,77 g/h und FSN* = 0,86.

Die Verlängerung der gewählten linearen Trendlinien für RME zu höheren Schwärzungszahlen und für DK zu geringeren Schwärzungszahlen macht deutlich, dass auch bei gleich hohen Schwärzungszahlen die stündliche Rußzunahme auf dem Filter für beide Kraftstoffe erheblich differieren würde: Bei RME wäre die stündlich angesammelte Rußmasse geringer als bei DK. D.h., dass neben der gemittelten Schwärzungszahl FSN* die Eigenschaften der emittierten Partikel für die angesammelte Masse auf dem Partikelfilter von ausschlaggebender Bedeutung sind.

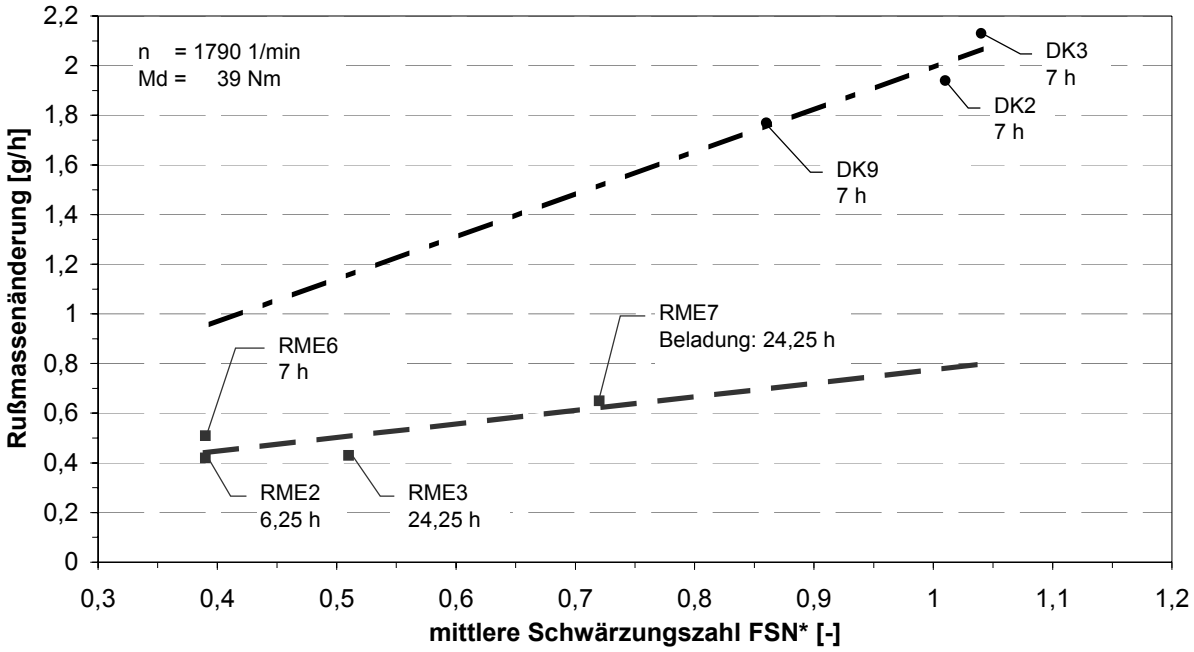


Abbildung 14:
Stündliche Rußmassenänderung bei unterbrechungsfreier Beladung in Abhängigkeit von der mittleren Schwärzungszahl bei RME und DK

Für die in den Abbildungen 7 bis 14 enthaltenen Beladungsvorgänge sind jeweils die mittlere Schwärzungszahl und die zu Beginn und am Ende der Beladung registrierten FSN-Werte in Abbildung 15 dargestellt:

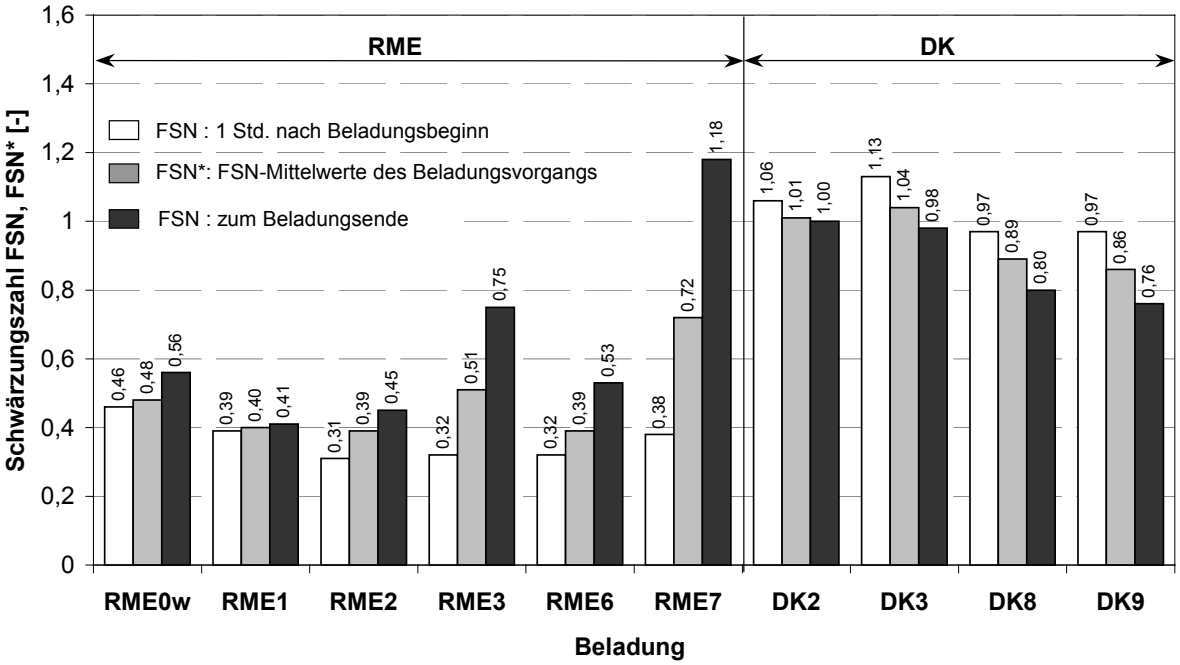


Abbildung 15:
Schwärzungszahl FSN und mittlere Schwärzungszahl FSN* (RME/.DK)

Man erkennt sehr deutlich:

- Bei RME war die gemittelte Schwärzungszahl FSN* eindeutig geringer als bei DK. Die Mittelwerte der einzelnen Beladevorgänge wurden bei RME mit FSN* = 0,39 bis 0,72 und bei DK mit FSN* = 0,86 bis 1,04 festgestellt.
- Bei RME stieg die Schwärzungszahl während der Beladung stets an. Bei DK wurde eine Verringerung der Schwärzungszahl über der Beladezeit festgestellt.

Der Vergleich der bei RME und bei DK gemittelten Schwärzungszahlen FSN* zeigt, dass bei dem hier verwendeten 1,9 l TDI-Motor - wie auch bei Motoren mit größerem Hubvolumen/Zylinder [2] - die Rußemission bei RME-Kraftstoff gegenüber Dieselkraftstoff deutlich niedriger war.

5.3 Regeneration des Partikelfilters bei Biodiesel und DK

In Abbildung 16 ist der Verlauf der diskontinuierlichen, kraftstoffadditivunterstützten Regeneration des Partikelfilters bei Biodieselbetrieb dargestellt.

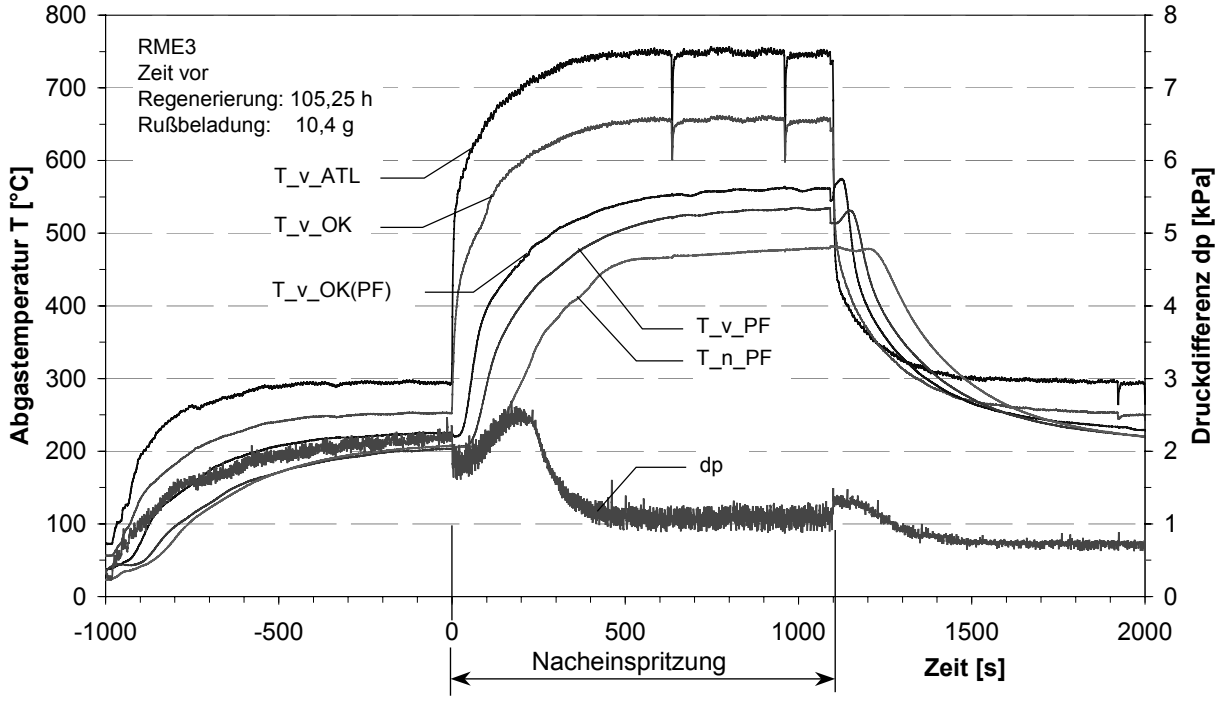


Abbildung 16:
Abgastemperatur und Druckdifferenz am Partikelfilter während der Regeneration im RME-Betrieb

Der Regenerationsvorgang wurde mit dem Einsetzen der drehmomentneutralen Nacheinspritzung (n = 1790 1/min, M_d = 39 Nm) ausgelöst. Die Abgastemperaturen stiegen sofort an. Innerhalb von 470 s wurde die Temperatur vor dem Filter auf 500 °C erhöht. Gleichzeitig erhöhte sich mit dem temperaturbedingten größeren Volumenstrom auch die Druckdifferenz dp über dem Partikelfilter. Nach etwa 200 s verringerte sich die Druckdifferenz, was auf die beginnende Rußoxidation hinweist. Nach weiteren 300 s erreichte die Druckdifferenz während der Nacheinspritzung einen konstanten Wert, der sich erst nach dem Abschalten der Nacheinspritzung und allmählicher Abkühlung des Nachbehandlungssystems weiter verringerte. Nach insgesamt etwa 500 s war somit die Regeneration des Filters abgeschlossen, was daran erkennbar ist, dass keine weitere Verringerung der Druckdifferenz während der Nacheinspritzdauer auftrat.

Nach dem Abschalten der Nacheinspritzung , d.h. zu Beginn des wieder einsetzenden Belademodus, erfolgte trotz steilen Absinkens der Abgastemperatur vor dem ATL und vor dem motornahen Oxi-Kat die Erhöhung der Temperatur nach dem motornahen Oxi-Kat (T_v_OK(PF)) und unmittelbar vor dem Partikelfilter (T_v_PF). Offenbar bewirkte der höhere Sauerstoffanteil im Abgas nach Beendigung der Nacheinspritzung in beiden Oxi-Kat den erneuten Ablauf exothermer Vorgänge (Oxidation von CO und HC). Gleichzeitig stieg die Druckdifferenz über dem Filter

um 0,2 bis 0,3 kPa an. Diese Erhöhung wurde augenscheinlich durch den bei angestiegener Abgastemperatur erhöhten Abgasvolumenstrom bewirkt. Mit sinkender Abgastemperatur fiel die Druckdifferenz innerhalb von etwa 10 min bis auf den nach der Regeneration jeweils niedrigsten Wert. Dieser Wert ist zugleich ein Maß für die Vollständigkeit des jeweiligen Regenerationsvorgangs.

Da während der langen Nacheinspritzdauer der Ruß im Partikelfilter offenbar schon weitestgehend oxidiert wurde, konnte nach Beendigung der Nacheinspritzung trotz des höheren Sauerstoffanteils im Abgas nur andeutungsweise festgestellt werden, dass die Temperatur nach dem Partikelfilter T_n_PF durch erneut einsetzende Rußoxidation ansteigt. Ein sprunghafter Anstieg der Temperatur T_n_PF nach Abschalten der Nacheinspitzung würde darauf hinweisen, dass durch den höheren Sauerstoffanteil im Abgas im Filter noch vorhandene Partikel oxidiert werden. Der allmähliche Anstieg der Temperatur nach dem Partikelfilter ist auf die Abgaserwärmung vor dem Partikelfilter zurückzuführen, die mit zeitlicher Verzögerung auch nach dem Filter bemerkbar ist.

Abbildung 17 zeigt den Ablauf der Regeneration bei DK-Betrieb.

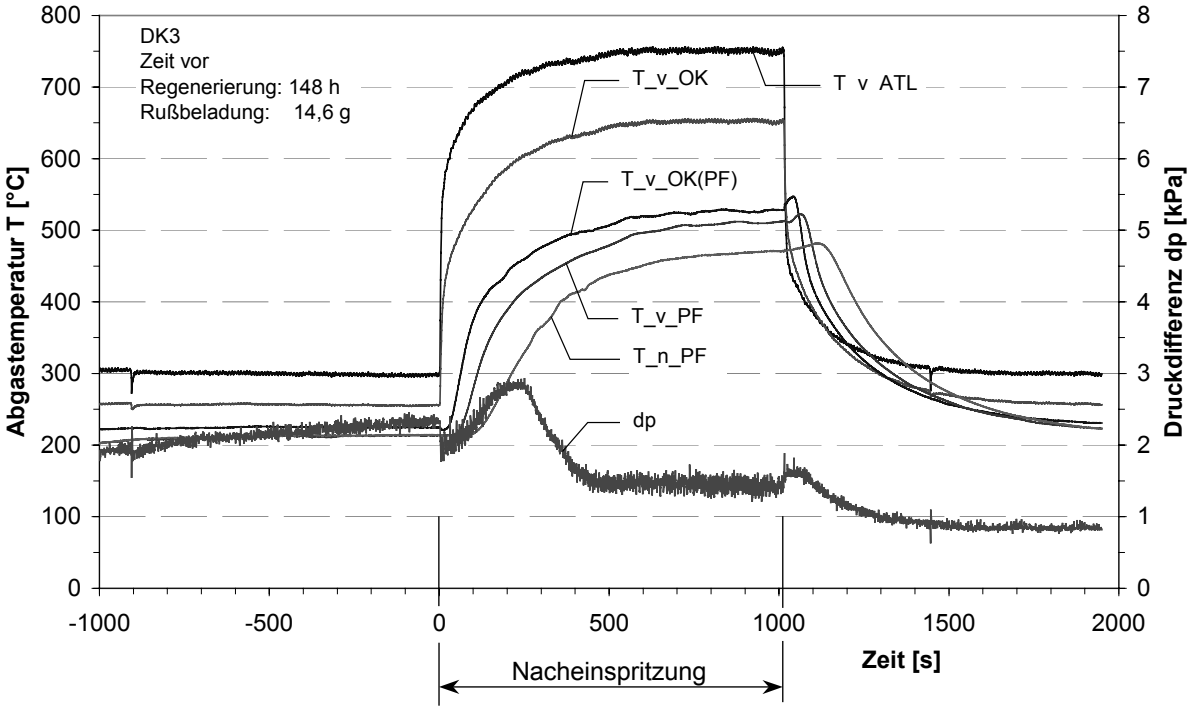


Abbildung 17:
Abgastemperatur und Druckdifferenz am Partikelfilter während der Regeneration bei DK

Der Vergleich mit der Regeneration bei Biodiesel-Betrieb lässt keine signifikanten Unterschiede beider Regenerationsvorgänge erkennen. Lediglich die Druckdifferenz war während der Nacheinspritzdauer bei DK-Betrieb um 0,3 bis 0,4 kPa höher, was mit der größeren Rußbeladung von 14,6 g gegenüber 10,4 g bei Biodiesel-Betrieb erklärt werden kann. Die Druckdifferenz lag auch bei Beendigung des Regenerationsversuch nach ca. 1900 s über dem bei Biodiesel-Betrieb erreichten Wert.

Die Wirksamkeit aller einzelnen Regenerationsversuche ist an der in Abbildung 18 dargestellten Druckdifferenz am Partikelfilter nach der Regeneration zu sehen:

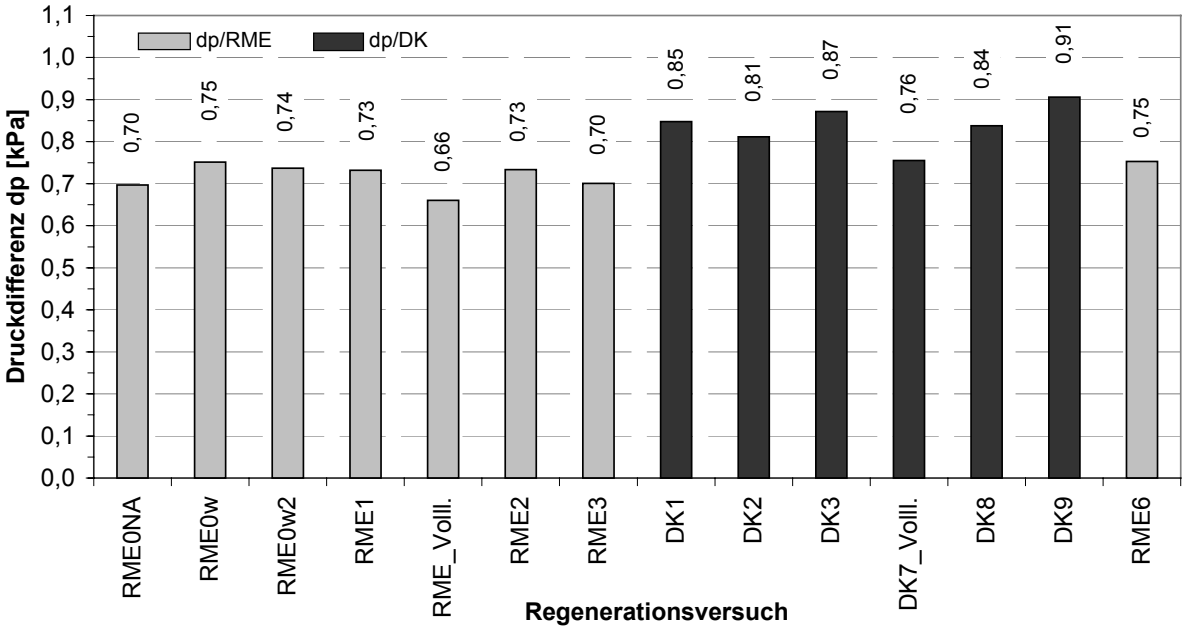


Abbildung 18:
Druckdifferenz am Partikelfilter nach der Regeneration im RME- und DK-Betrieb

In dieser Abbildung sind die Regenerationsversuche in zeitlicher Reihenfolge, von links beginnend, enthalten. Es ist folgendes erkennbar:

- Der Volllastversuch RME_Volll. der sich ohne erneute Beladung an den Regenerationsversuch RME1 anschloss, ergab von allen Regenerationen bei RME die niedrigste Druckdifferenz mit dp = 0,66 kPa. Der nach 3-stündiger Beladung des Partikelfilters erfolgte Volllastversuch DK7_Volll. zeigte bei allen DK-Versuchen ebenfalls den größten Effekt und ergab eine Druckdifferenz über dem Filter von dp = 0,76 kPa.
- Die Druckdifferenzen, der mit Teillast durchgeführten Regenerationsversuche waren bei RME gegenüber DK gleichmäßiger und niedriger. Die für Versuch RME3 ausgewiesene Druckdifferenz lag mit dp = 0,70 kPa an der unteren Grenze des Bereichs, der bei RME im Teillastbetrieb mit 0,70 < dp < 0,75 kPa gemessen wurde. Für den Versuch DK3 dagegen wurde mit 0,87 kPa ein Wert näher an der oberen Grenze des mit 0,81 < dp < 0,91 kPa ermittelten Bereichs gemessen.
- Für den Regenerationseffekt ist es unbedeutend, ob die Beladung des Filters wie z. B. für die Versuche RME0NA, RME0w, RME1 und DK8 ein- oder mehrfach unterbrochen wurde.
- Die nach der letzten Regeneration im Versuch RME6 mit dp = 0.75 kPa ausgewiesene Druckdifferenz zeigt, dass nach der erreichten Filterlaufzeit von 189 Stunden nur eine geringe Erhöhung der Druckdifferenz gegenüber dem Ausgangswert eingetreten ist. Dieser Wert liegt noch in dem bereits bei geringeren Filterlaufzeiten mit RME ermittelten Bereich und gibt damit noch keinen sicheren Aufschluss über die Größe des irreversiblen Differenzdruckanstieges, der durch die Ablagerungen der Additivasche zu erwarten ist.

Die nach dem jeweiligen Regenerationsvorgang gegenüber dem Ausgangsgewicht festgestellte Gewichtsveränderung zeigt Abbildung 19:

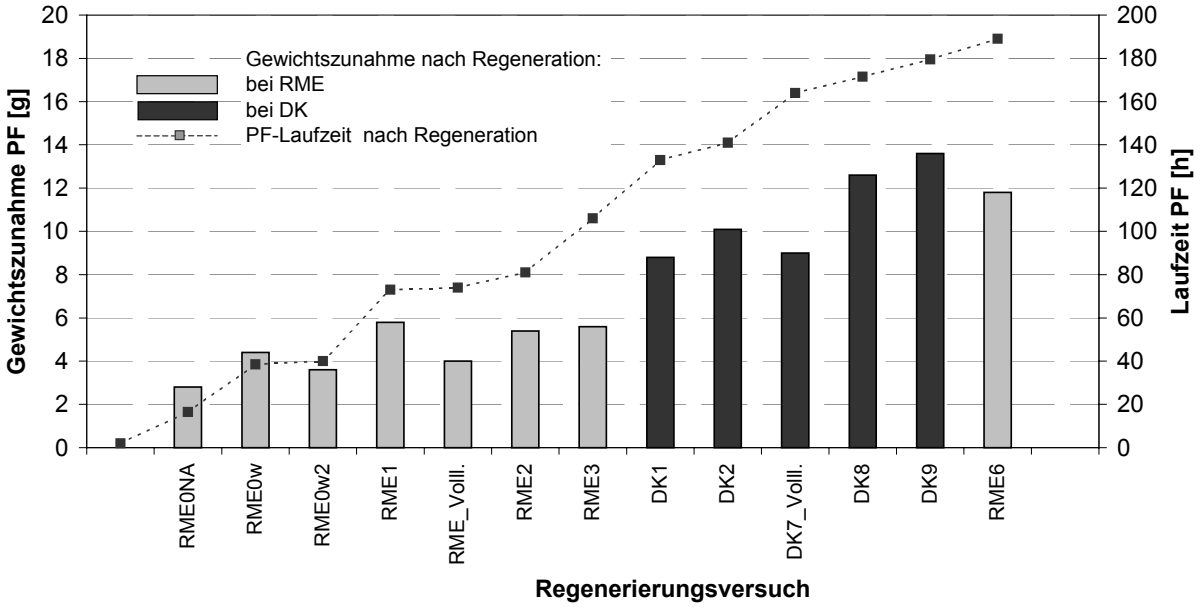


Abbildung 19:
Gewichtsveränderung und Filterlaufzeit nach der Regeneration im RME- und DK-Betrieb

Das Filtergewicht ist erwartungsgemäß mit fortschreitender Laufzeit angewachsen. Die Gewichtserhöhung betrug bei Biodiesel-Betrieb innerhalb der ersten 106 Stunden 5,6 g, das entspricht 0,053 g/h. Die Gewichtserhöhung bei DK ist mit 4,8 g in der Filterlaufzeit von 46,5 Stunden deutlich höher. Sie betrug damit bei DK- im Vergleich zum RME-Betrieb mit 0,103 g/h annähernd den doppelten Wert.

Die zuletzt mit dem Versuch RME6 vorgenommene Regeneration verringerte das Filtergewicht gegenüber der zuvor bei DK durchgeführten Regeneration um 1,8 g, so dass letztlich nach der Laufzeit von 189 Stunden die Gewichtserhöhung für alle durchgeführten Versuche in der Summe mit 11,8 g ermittelt wurde. Dies entspricht einer Gewichtserhöhung von 0,062 g/h.

6. Zusammenfassung

Bezug nehmend auf ein im Jahr 2001 abgeschlossenes Verbundforschungsvorhaben [2] wurden die Ergebnisse zu den Partikeleigenschaften und der Partikelemission eines Nfz-Dieselmotors mit Hochdruckeinspritzung bei Biodiesel-Betrieb dargestellt:

- Die Partikelemission ist bei Biodiesel kleiner als bei DK.
- Der mittlere aerodynamische Durchmesser der Rußpartikel ist bei Biodiesel geringfügig kleiner.
- Die Morphologie der Rußpartikel ist bei Biodiesel ähnlich wie bei DK.
- Die unlöslichen Fraktionen (Ruß) und die löslichen Fraktionen sind bei Biodiesel geringer (Ausnahme: Leerlauf).

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Eignung eines Abgasnachbehandlungssystems an einem 4-Zylinder-Pkw-Motor mit Pumpe-Düse-Einspritzung bei Biodiesel- und anschließendem DK-Betrieb untersucht. Zum Abschluss der Versuche kam nochmals Biodiesel zum Einsatz.

- Das diskontinuierlich arbeitende, kraftstoffadditivunterstützte Abgasnachbehandlungssystem ist grundsätzlich für Biodiesel- und den wechselweisen DK- und Biodiesel-Einsatz geeignet.
- Die Beladung mit Unterbrechungen weist bei Biodiesel- im Vergleich zu DK-Betrieb eine stärkere Abweichung der nach dem Neustart gemessenen Druckdifferenz gegenüber gleicher unterbrechungsfreier Beladezeit auf. Die Druckdifferenz ist bei Biodieselbetrieb kein Maß für die auf dem Partikelfilter angesammelte Rußmasse.
- In der gleichen unterbrechungsfreien Beladedauer wird mit Biodiesel weniger Ruß angesammelt als mit DK, die Druckdifferenz des Partikelfilters ist mit Biodiesel geringer.
- Die Druckdifferenz ist bei gleicher Rußmasse nach unterbrechungsfreier Beladung bei Biodiesel höher.
- Bei gleicher Schwärzungszahl während der Beladung würde bei Biodiesel weniger Ruß im Partikelfilter anfallen.
- Die Regeneration des Partikelfilters ist bei Biodiesel tendenziell wirksamer, die erzielte Druckdiffe-

renz nach der Regeneration und die Gewichtserhöhung des Filters durch Asche sind geringer.

- Die Regeneration bei Volllast ist bei Biodiesel und bei DK gegenüber den jeweiligen Regenerationsversuchen bei Teillast wirksamer.

Literatur

[1] Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Rapsölmethylester, Abschlussbericht FKZ: 00NR006, Magdeburg, Braunschweig, Mai 2002

[2] Optimierung eines modernen Dieselmotors auf den Betrieb mit Biodiesel. Abschlussbericht. Az.: 206.2-3234/1-10(60) Braunschweig, Magdeburg, März 2001

[3] **Franke, H.-U.**: Dreidimensionale Erfassung und Charakterisierung von Dieselpartikeln. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2002

[4] **Herrmann, H.-O., O. Lang, I. Mikulic, V. Scholz**: Partikelfiltersystem für Diesel-PKW, MTZ 9/2001, S. 652 – 660

[5] **Harndorf, H., J. K. Schaller, N. F. Benninger**: Regenerationshilfen für Diesel-PKW

[6] **Tschöke, , H., L. Schulze, M. Schmidt**: Untersuchungen an Dieselmotoren mit Hochdruckeinspritzung und Biodiesel In: Dieselmotorentechnik 2002, expert verlag

Biodieselsensorik

Axel Munack[1], Jürgen Krahl[1, 2], Hermann Speckmann[1]

Zusammenfassung

Es ist heutzutage möglich, moderne Dieselmotoren mit Rapsölmethylester (RME, Biodiesel), fossilem Dieselkraftstoff (DK) oder beliebigen Mischungen beider Reinkraftstoffe zu betreiben, ohne die derzeit gültigen Abgasobergrenzen zu überschreiten. Zukünftig wird es erforderlich sein, den Motor an den Kraftstoff anzupassen, um die schärferen Abgasvorschriften zu erfüllen. Damit entsteht für den weiteren Einsatz von Biodiesel eine durchaus kritische Situation; speziell angepasste Motoren würden nämlich beträchtliche Mehrkosten verursachen. Die erforderliche Adaption ist jedoch ohne mechanische Eingriffe möglich; die moderne elektronische Motormanagementeinheit (EMU) kann benutzt werden, um dies zu erreichen. Allerdings benötigt die EMU die Information, welcher Kraftstoff (oder welches Kraftstoffgemisch) aktuell benutzt wird, um das adäquate Motormanagement einzuleiten (wie die Menge des eingespritzten Kraftstoffes, die Einspritzzeit oder den Einspritzverlauf). Sensorkonzepte, die in der Lage sind, diese Information zu liefern, sind in einem aktuellen Forschungsprojekt untersucht worden. Es zeigte sich, dass der Realteil der relativen Dielektrizitätszahl (ε_r') einen exzellenten Indikator für den Kraftstoff darstellt; ε_r' für Biodiesel ist nämlich mehr als 50 % höher als ε_r' für DK.

Die Versuche, die im Folgenden vorgestellt werden, wurden auf einer breiten Grundlage durchgeführt (Kraftstoffzusammensetzung, Veränderung der Temperatur, Kraftstoffe von unterschiedlichen Herstellern, Sommer- und Winterqualitäten, Alterung, Wassergehalt, typische Verunreinigungen; darüber hinaus: verschiedene Sensoren, die sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich arbeiten). Ergebnisse des Einsatzes eines in der FAL entwickelten Sensorprototyps in einem Audi A4 werden ebenfalls diskutiert.

Schlüsselworte: Biodiesel, RME, Dieselkraftstoff, Kraftstoffmischungen, Kraftstoffsensor, Dielektrizitätszahl

Abstract

Today, it is possible to operate modern diesel engines on rapeseed oil methylester (RME, biodiesel), fossil diesel fuel (DF), or their blends, without violation of the actually valid exhaust limits. In the future, the engine must be adapted to the fuel in order to fulfill sharper exhaust gas regulations. This means that we are entering a critical phase for the further use of biodiesel. A special engine design for biodiesel would be quite costly. However, the required adaptation is possible without mechanical measures; the modern electronic engine management unit (EMU) can be used to achieve this. However: in order to switch to the adequate engine management (like amount of injected fuel as well as time and course of the injection), the EMU needs the information which fuel (or blend) is actually used. Sensor concepts which are able to provide this information have been studied in some depth in an actual research project. The real part of the relative dielectric number (ε_r') turned out to be an excellent indicator. In fact, ε_r' of biodiesel is more than 50 % higher than ε_r' of DF.

The experiments that will be presented were carried out on a broad basis (fuel composition, temperature variation, fuels from different manufacturers, summer and winter qualities, aging, water content, typical contaminations; as well as different sensors operating in frequency domain and time domain). Results from the use of a prototype developed in the FAL in a real application (AUDI A4 passenger car) will be reported, too.

Keywords: Biodiesel, RME, diesel fuel, blends, fuel sensor, dielectric number

[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

Einleitung

Heutzutage werden Dieselmotoren hauptsächlich mit fossilem Dieselkraftstoff (DK) betrieben. Alternative Kraftstoffe, wie Rapsölmethylester (RME) oder Ester anderer Pflanzenöle (z. B. Sojabohnenöl oder Palmöl) haben erst einen kleinen Anteil des gesamten verbrauchten Kraftstoffes erreicht. Die Öffentlichkeit wird jedoch in zunehmendem Maße auf die Alternativen aufmerksam. Schließlich ist es anzustreben, dass mittelfristig vermehrt Konzepte realisiert werden, die den Verbrauch an fossilen Kraftstoffen ersetzen oder zumindest verringern.

Weitere unterstützende Argumente für einen wachsenden Einsatz von RME bestehen in den verminderten Emissionen, die für viele der im Abgas zu findenden Komponenten beobachtet werden. Die Emission von Ruß reduziert sich auf etwa 50 % und die Emission von Partikeln verringert sich um 25 bis 35 %, jeweils verglichen mit DK. Wegen des Fehlens von Schwefel in RME kann das Potenzial von Abgasreinigungssystemen (z. B. Oxidationskatalysatoren) sehr effektiv genutzt werden. Dies reduziert die Emission einiger unerwünschter Substanzen im Abgas und der für Pflanzenölkraftstoffe typische Abgasgeruch – ähnlich dem von Pommes Frites – ist kaum mehr feststellbar.

Moderne Dieselmotoren zeichnen sich durch geringen Kraftstoffverbrauch und viel geringere Emissionen aus als ihre Vorgänger von vor etwa zehn Jahren. Dies beruht auf der Tatsache, dass die amerikanischen und europäischen Grenzwerte für Abgaskomponenten in mehreren Schritten heruntergesetzt wurden und dass die Motorenhersteller in der Lage waren, diese verschärften Grenzwerte durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen sicher einzuhalten. Optimierung führt jedoch im allgemeinen zu dem Problem, dass schon geringe Abweichungen der Kraftstoffzusammensetzung von dem Referenzkraftstoff, der für Entwurf und Feineinstellung benutzt wurde, zu Abgaskonzentrationen führen, die nicht mehr den Spezifikationen entsprechen.

Für den zukünftigen Einsatz von Biodiesel ergibt sich auf diese Weise ein Ernst zu nehmendes Problem. Heutzutage ist es möglich, die modernen Dieselmotoren mit RME, DK oder Gemischen der beiden Reinkraftstoffe zu betreiben, ohne die derzeit gültigen Abgasgrenzwerte zu verletzen. In der Zukunft muss jedoch der Motor auf den Kraftstoff eingestellt werden, um die schärferen Abgasbestimmungen zu erfüllen. Diese Anpassung ist ohne mechanische Maßnahmen möglich; die elektronische Motormanagementeinheit (EMU) kann benutzt werden, um dieses Ziel zu erreichen. Die EMU braucht jedoch die Information, welcher Kraftstoff (bzw. welches Gemisch) aktuell verwendet wird, um ein adäquates Motormanagement, wie z. B. die richtige Menge des eingespritzten Kraftstoffes sowie den Einspritzzeitpunkt und den Einspritzverlauf zu realisieren. Diese Information kann ein Kraftstoffsensor liefern, der in der Kraftstoffzuleitung angeordnet ist, z. B. im Kraftstofffilter.

Im folgenden Beitrag werden die Messprinzipien beschrieben, die in unseren Experimenten eingesetzt wurden. Verschiedene Messergebnisse werden präsentiert, die in der Praxis auftretende Situationen wie sich ändernde Kraftstoffqualitäten, Verunreinigungen, Zusatz von Additiven usw. abbilden. Ergebnisse mit einem Sensorprototyp werden ebenfalls vorgestellt, die an einem Audi A4 1.9 TDI gewonnen wurden.

Messprinzip

Sensorkonzepte, die in der Lage sind, die notwendigen Informationen zu liefern, sind in einem aktuellen Forschungsprojekt untersucht worden, das im Herbst des Jahres 2000 begann. Sie basieren auf Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte und des Bodensalzgehaltes, wobei die komplexe Permittivität (Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl) sich als hervorragender Indikator herausstellte (Paul, 2000). RME und DK sollten sich in den Realteilen der Dielektrizitätszahl ε unterscheiden, da ihre Moleküle unterschiedliche Strukturen aufweisen (RME besteht aus polaren Estern; DK setzt sich überwiegend aus nichtpolaren n-, iso- und zyklischen Kohlenwasserstoffen und aus Aromaten zusammen). Die grundlegende Gleichung lautet:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \left[\varepsilon_r'(\omega) - j \cdot \varepsilon_r''(\omega)\right],$$

wobei ε die absolute Dielektrizitätszahl ist, ε_0 die dielektrische Feldkonstante (im Vakuum) und ε_r die relative Dielektrizitätszahl; $j^2 = -1$. ε_r', der Realteil von ε_r, beschreibt das Speichervermögen eines dielektrischen Materials, wohingegen der negative Imaginärteil, ε_r'', ein Maß für den Energieverlust darstellt. Im Falle von RME und DK ist der Realteil der relativen Dielektrizitätszahl, also ε_r', die Messgröße mit dem größten Informationsgehalt. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung zu Veröffentlichungen anderer Autoren, die z. T. andere Kraftstoffe untersucht haben (Schmitz et al., 1990; Tat und Van Gerpen, 2001). Es stellte sich heraus, dass ε_r' für RME mehr als 50 % größer ist als ε_r' für DK.

Die ersten Typen von Sensoren, die wir in unseren Experimenten eingesetzt haben, waren Bodenfeuchtigkeits- und Ionengehaltssensoren. Dabei handelte es sich um Sensoren des Typs MCM 101 vom IMAG-DLO (Hilhorst, 1997). Diese arbeiten im Frequenzbereich mit fest eingestellter Frequenz. Der Sensor, der in den meisten unserer Experimente zum Einsatz kam,

hatte eine Arbeitsfrequenz von 20 MHz. Die ausgegebenen Signale sind der Realteil von ε_r und die Leitfähigkeit; sie stehen über eine RS232-Schnittstelle zur Verfügung. Der Messbereich für die Leitfähigkeit ist jedoch für Messungen im Boden ausgelegt, so dass im Falle von Kraftstoffen kein verwertbares Messsignal geliefert wird.

Unsere Erwartung war, dass Frequenzen existieren müssten, die bestmöglich geeignet wären, die zwei Kraftstoffe zu unterscheiden. Daher wurde ein Netzwerkanalysator hp 8753ET zur Messung eingesetzt, der einen Frequenzbereich von 300 kHz bis 3 GHz abdeckt. Für den unteren Frequenzbereich von 300 kHz bis 50 MHz wurde eine Messzelle hp 16452A im Transmissionsmodus eingesetzt, während für den höheren Frequenzbereich ein hp 8750C Sensor im Reflexionsmodus Verwendung fand.

Ein dritter getesteter Sensortyp war ein Kavlico-Ölsensor. Dessen zugrunde liegendes Messprinzip ist uns nicht bekannt; der Signalverlauf und die niedrige Messfrequenz von etwa 15 kHz legen jedoch die Vermutung nahe, dass der Sensor im Zeitbereich arbeitet. In diesem Falle wird die Antwort auf eine charakteristische Eingangsfunktion wie etwa eine Strom-Sprungfunktion oder Rampe mittels Spannungsmessung verfolgt. Das Messsignal muss dann noch in ein geeignetes Ausgangssignal umgesetzt werden. Das vom Sensor gelieferte Ausgangssignal war in diesem Fall ein analoges Spannungssignal im Bereich von 2,5 V (für DK) bis 4,7 V (für RME).

Alle oben angesprochenen Sensoren sind relativ teuer, wobei das kostenintensivste Gerät natürlich der Netzwerkanalysator ist. Aber auch die beiden anderen Sensoren werden zu Preisen angeboten, die über dem für einen Einbau in serienmäßige Automobile zur Verfügung stehenden Budget liegen.

Daher haben wir einen eigenen Prototyp für einen Zeitbereichskraftstoffsensor entwickelt. Er besteht aus einem Koaxialkondensator mit einigen analogen und digitalen Integrierten Schaltkreisen zur Gewinnung und Verarbeitung des Messsignals. Die Taktrate für die Messungen beträgt 1 kHz; das (analoge) Sensor-Ausgangssignal ist noch nicht in den zukünftigen Spannungsbereich transformiert. Derzeit wird eine Differenz von ungefähr 0,5 V für DK und RME erhalten. Dieser Sensor wurde auch in praktischen Straßenversuchen eingesetzt; dafür wurde er in den Kraftstofffilter eines Audi A4 1.9 TDI eingebaut.

Ergebnisse

Frequenzverhalten und Temperatureinfluss

Die Ergebnisse mit dem Netzwerkanalysator konnten unsere Erwartung, dass einige optimale Frequenzen zur Unterscheidung zwischen RME und DK existieren, nicht erfüllen. Die Messungen für reinen RME und reinen DK (jeweils in Winterqualität) bei einer Temperatur von 25 °C sind in Abbildung 1 dargestellt. Die relativen Dielektrizitätszahlen zeigen einen relativ flachen Verlauf über der Frequenz.

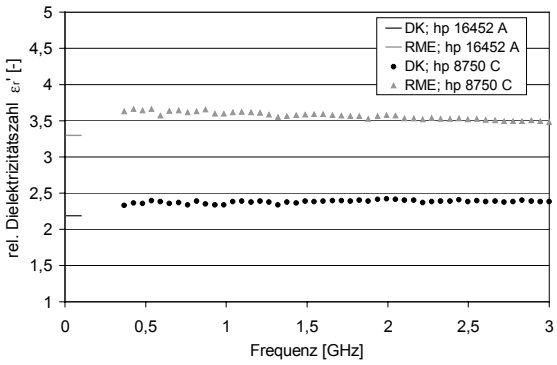


Abbildung 1:
Realteil ε_r' der relativen Dielektrizitätszahl für reinen RME und reinen DK in Abhängigkeit von der Frequenz; hp 16452A Messzelle (ganz links) und hp 8750C Sensor (rechts); Temperatur: 25 °C

Unterhalb von 0,3 GHz werden die Messwerte mit dem hp 8750C Sensor sehr rauschbehaftet (nicht gezeigt), was auf dem sehr kleinen Nutzsignal in diesem Frequenzbereich beruht, das damit zu einem schlechten Signal/Rauschverhältnis führt. Dieser Sensor ist nicht geeignet für Messungen mit kleinem ε_r' in diesem Frequenzbereich. Allerdings ergaben auch die Messungen mit der hp 16452A Messzelle im Bereich von 300 kHz bis 50 MHz keine "optimalen" Frequenzen; vgl. den linken Teil von Abbildung 1.

Die Messergebnisse zeigen eine kleinere Dielektrizitätszahl für den niedrigeren Frequenzbereich. Dies steht im Widerspruch zu theoretischen Überlegungen, die üblicherweise einen Abfall der Dielektrizitätszahl für höhere Frequenzen vorhersagen. Die Erklärung für dieses beobachtete Phänomen wurde noch nicht gefunden; derzeit gehen wir davon aus, dass es sich letztlich um Kalibrierfehler des Netzwerkanalysators für die in zwei unterschiedlichen Moden betriebenen Messzellen handelte. Die Kalibrierungsprozedur wird mit Luft, Wasser und Zellen-Kurzschluss durchgeführt. Wasser hat eine Dielektrizitätszahl, die weit über denjenigen der beiden eingesetzten Kraftstoffe liegt und muss daher als zwar wohl definiertes aber vom Bereich her nicht optimales Kalibriermedium angesehen werden.

Glücklicherweise sind die relativen Differenzen zwischen den beiden Kraftstoffen ausreichend hoch, so dass die beiden Kraftstoffe sehr gut durch die Messung der Dielektrizitätszahl unterschieden werden können.

Eine hohe Temperaturabhängigkeit wird ebenfalls beobachtet. Für höhere Temperaturen nimmt die Dielektrizitätszahl ab (vgl. Abbildung 2). Dieses Verhalten ist auch zu erwarten, da die elektrischen Dipolmomente dem elektrischen Feld nicht vollständig folgen können, wenn eine höhere Aktivierung durch höhere Temperatur stattfindet. Absolut gesehen ist die Temperaturabhängigkeit von ε_r' für RME höher als diejenige für DK. Dies ist jedoch nicht der Fall, wenn man relative Änderungen betrachtet; in diesem Fall erscheint der Temperatureinfluss von ε_r' für DK höher.

Das gleiche Verhalten kann auch beim Einsatz der anderen Sensoren beobachtet werden. Allerdings ist der Temperatureinfluss für reinen DK offensichtlich geringer, wenn Messungen mit den anderen Sensoren vorgenommen werden. Die Ursache für dieses Verhalten ist noch nicht geklärt. Der Ölsensor ist für reinen RME nicht geeignet; in diesem Fall liegen die Messwerte für alle Temperaturen im oberen Sättigungsbereich.

Kraftstoffgemische

Ein nahezu lineares Verhalten von ε_r' kann beobachtet werden, wenn Gemische der beiden Reinkraftstoffe gemessen werden. Dies gilt für alle Sensoren in unseren Untersuchungen mit der oben erwähnten Ausnahme für den Ölsensor, der die obere Sättigungsschwelle bei –15 °C für ein Gemisch mit 75 % RME-Anteil erreicht und dann in der Sättigung bleibt, wenn der RME-Anteil weiter erhöht wird.

Ein typischer Verlauf der Sensorsignale in Abhängigkeit vom RME-Anteil ist in Abbildung 2 gezeigt für den Sensor hp 16452A und in Abbildung 3 unter Benutzung unseres eigenen preiswerten Sensor-Prototyps.

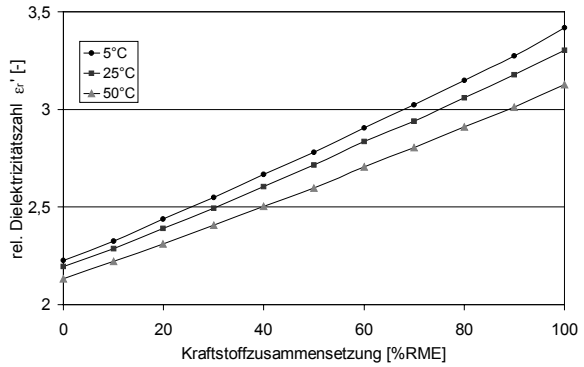


Abbildung 2:
Relative Dielektrizitätszahl ε_r' in Abhängigkeit vom RME-Gehalt und der Temperatur; Netzwerkanalysator und hp 16452A Messzelle

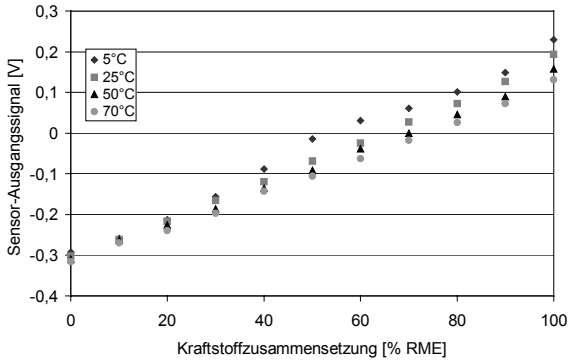


Abbildung 3:
Ausgangssignal des FAL-Kraftstoffsensor-Prototyps in Abhängigkeit von RME-Gehalt und Temperatur

Einfluss des Wassergehaltes und einiger Additive

In der Praxis enthalten Kraftstoffe Additive, beispielsweise im Winter, wenn zu garantieren ist, dass der Kraftstoff keine festen Aggregate bildet (oder sogar vollständig fest wird). Andererseits könnte im Sommer insbesondere bei RME der Wunsch bestehen, Antioxidanzien hinzuzufügen. Darüber hinaus ist bekannt, dass RME hygroskopisch ist, so dass ein merklicher Anteil von Wasser in dem Kraftstoff oder auch in Kraftstoffgemischen enthalten ist.

Daher muss der Einfluss dieser "Kontaminationen" auf die Dielektrizitätszahl bekannt sein. Um den Einfluss einer erhöhten Leitfähigkeit festzustellen, wurde in einem weiteren Experiment das zugesetzte Wasser mit NaCl gesättigt.

Wassergehalt: Der Wassergehalt wurde zwischen 0 und 3000 ppm variiert mit Kraftstoffgemischen von 0 %, 33 %, 66 % und 100 % RME-Anteil bei Temperaturen von 5 °C bis 50 °C. Wenn man einen linearen Einfluss von Wasser annimmt, hätte bei der höchsten Konzentration ein Anstieg von ε_r' um 0,24 auftreten müssen. Der maximale gemessene Anstieg betrug jedoch nur 0,03. Offensichtlich sind die Wassermoleküle nicht in der Lage, sich frei im elektrischen Feld einzustellen. Die Zugabe von NaCl zum Wasser änderte nichts an dieser Beobachtung. Folglich kann der Effekt von Wasser im Kraftstoff auf ε_r' vernachlässigt werden. Dies gilt für alle getesteten Sensoren.

Additive: Als Additive kamen ein BASF-Additiv und Costelan™ mit jeweils 10 ppm zum Einsatz. Es konnte keine signifikante Beeinflussung der Messungen beobachtet werden; die Abweichungen waren geringer als die Standardabweichung der Messfehler.

Kraftstoffqualität

In naher Zukunft wird Dieselkraftstoff mit geringem Schwefelgehalt und niedrigem Anteil aromati-

scher Komponenten in den Markt eingeführt werden. Neben DK mit 250 ppm Schwefel wurden in unseren Versuchen Kraftstoffe mit weniger als 50 ppm Schwefel (derzeitiges am Markt verfügbares Produkt in Deutschland) oder weniger als 10 ppm Schwefel eingesetzt. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die gemessenen Einflüsse auf ε_r' unterhalb der Messgenauigkeit lagen.

Darüber hinaus wurde RME in Sommerqualität von zwölf verschiedenen Tankstellen erworben und zehn unterschiedliche Winterqualitäten von DK wurden auf gleiche Weise beschafft. Einige der RME-Proben erfüllten nicht die deutsche Norm E DIN 51606. Die relative Standardabweichung für ε_r' betrug etwa 0,5 % für RME und 0,2 % für DK, jeweils gemessen bei Temperaturen von 5 °C, 25 °C und 50 °C. Die größte Abweichung eines Kraftstoffes vom Mittelwert betrug weniger als 1,2 % für RME und weniger als 0,4 % für DK bei allen Temperaturen. Dies zeigt, dass in der Tat ein Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Dielektrizitätszahl existiert; der Einfluss ist jedoch nicht so hoch, dass falsche Messergebnisse im Hinblick auf die Kraftstoffzusammensetzung erhalten werden.

Diskussion der Laborexperimente

Zusammenfassend ist zunächst zu bemerken, dass die präzisen Messungen mit dem Netzwerkanalysator eine nahezu lineare Beziehung von ε_r' mit der Kraftstoffzusammensetzung ergaben. Mit Ausnahme der Sättigungseffekte des Ölsensors zeigten die anderen Sensoren dieses Verhalten ebenfalls. Die beobachteten Abweichungen, die durch Additive, Wassergehalt und Kraftstoffqualität hervorgerufen werden, waren im Allgemeinen unterhalb der Standardabweichung der Messwerte.

Der einzige signifikante Effekt, der bislang festgestellt wurde, ist der Abfall von ε_r' bei steigenden Temperaturen, was auf physikalische Phänomene zurückgeführt werden kann. Für eine quantitative Messung der Kraftstoffzusammensetzung muss dieser Effekt in jedem Fall kompensiert werden. Möglichkeiten bietet eine Kompensation der analogen Messwerte oder eine Nachbearbeitung der Messdaten; in beiden Fällen ist eine zusätzliche Temperaturmessung erforderlich. Eine andere Möglichkeit besteht in einer physikalischen Kompensation des Effektes, indem eine weitere Substanz in das elektrische Feld eingebracht wird, die entgegengesetztes Temperaturverhalten aufweist. Dies ist jedoch nur für eine mittlere Betrachtung möglich, etwa für eine Mischung mit 50 % RME-Anteil, da die Reinkraftstoffe unterschiedliches Temperaturverhalten aufweisen, wie oben ausgeführt.

Einbau des FAL-Sensor-Prototyps in einen Audi A4 1.9 TDI

Der Sensor wurde in den Kraftstofffilter eingebaut. Ziel war es, Erfahrungen zu sammeln mit schnell veränderlichen Umgebungsbedingungen (Temperaturen), die elektronischen Bauteile im Falle von mechanischen Schwingungen zu testen und einige Erkenntnisse über den Einfluss der Ablagerung von Kraftstoffverunreinigungen zu sammeln. Diese Tests sind noch im Gange. Zur Zeit, nach etwa 20.000 km, kann folgendes ausgeführt werden: Das analoge Messsignal ist in relativ starkem Umfang elektromagnetischen Störungen ausgesetzt, die von verschiedenen Aggregaten innerhalb des Fahrzeuges ausgehen. Dies bedeutet, dass die Abtastrate im Bereich von 1 Hz liegen sollte, was digitale Filterung und Elimination von Ausreißern ermöglicht.

Die Temperaturabhängigkeiten der Dielektrizitätszahlen der Kraftstoffe sind kritisch. Es wurden Änderungen der Kraftstofftemperatur von mehr als 60 K (-5 °C ... +55 °C) in unseren Winterexperimenten beobachtet. Der obere Wert wird im Sommer sogar noch erheblich höher liegen. Dies bedeutet, dass die Materialien und elektronische Schaltkreise des Sensors für diesen Temperaturbereich geeignet sein müssen und dass eine Temperaturkompensation des Sensor-Ausgangssignals ein wesentliches Element des Sensors darstellt.

Schlussbemerkungen

Die Ermittlung der Kraftstoffzusammensetzung – hier das Mischungsverhältnis von RME und DK – ist ein essenzieller Schritt für ein kraftstoffbasiertes Motormanagement. Dies wird absolut notwendig sein, um zukünftige gesetzliche Anforderungen an die Abgase zu erfüllen. Sensoren, die auf der Messung des Realteils der Dielektrizitätszahl des Kraftstoffes beruhen, haben sich unter verschiedenen möglichen Störeinflüssen als geeignet erwiesen. Ein Prototyp eines preiswerten Sensors für die Serienproduktion wurde entwickelt und getestet.

Danksagung

Die Autoren danken der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen (UFOP) und der Volkswagen AG für die finanzielle Förderung der Untersuchungen. Darüber hinaus danken die Autoren P. Bittner, H.-J. Helke, H. Schönfeld, O. Schröder, J. Semmler, H. Stein und R. Wörner für ihre Beiträge zum Projekt.

Literatur

Hilhorst, M.A. 1997. Dielectric characterization of soil. Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. Also available as: Publication no. 98-01, IMAG-DLO, Wageningen.

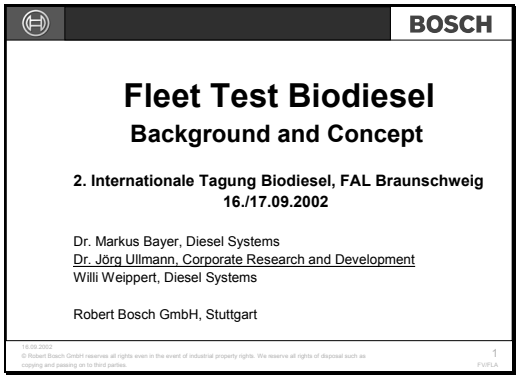
Paul, W. 2000. Permittivity measurements in soil for assessment of water flow, ion concentration and a pollution index. AgEng 2000, Warwick: pt. 2, pp. 367 - 368.

Schmitz, G., R. Bartz, U. Hilger, and M. Siedentop. 1990. Intelligent alcohol fuel sensor. SAE Paper No. 900231. Warrendale, Penn.: SAE.

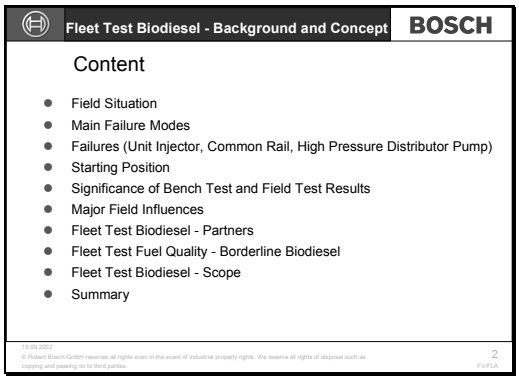
Tat, M.E., and J.H. Van Gerpen. 2001. Biodiesel blend detection using a fuel composition sensor. ASAE Paper No. 01-6052. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Flottenversuch Biodiesel – Hintergründe und Konzeption

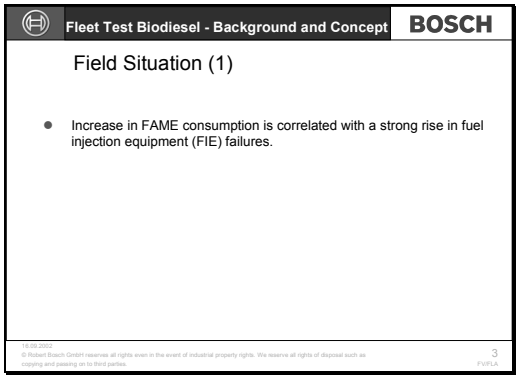
Markus Bayer, Jörg Ullmann, Willi Weippert[1]



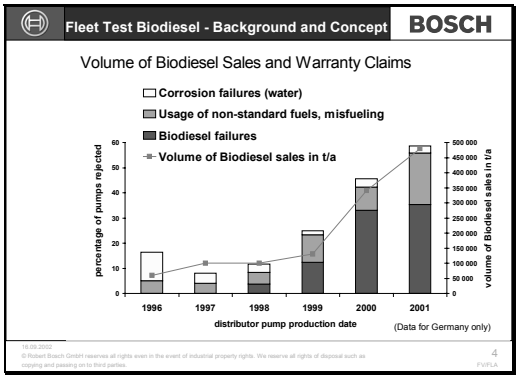
Folie 1



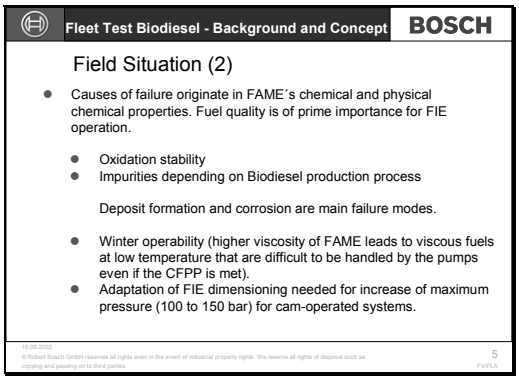
Folie 2



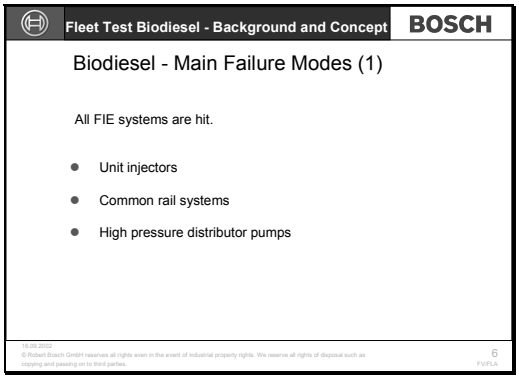
Folie 3



Folie 4

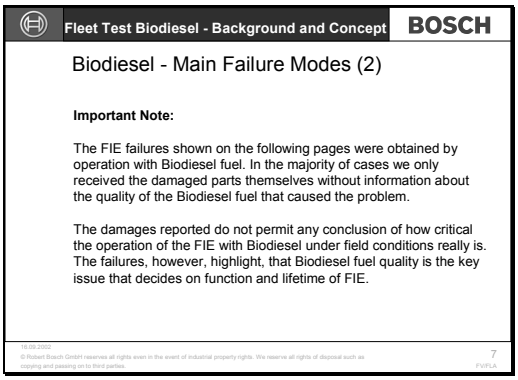


Folie 5

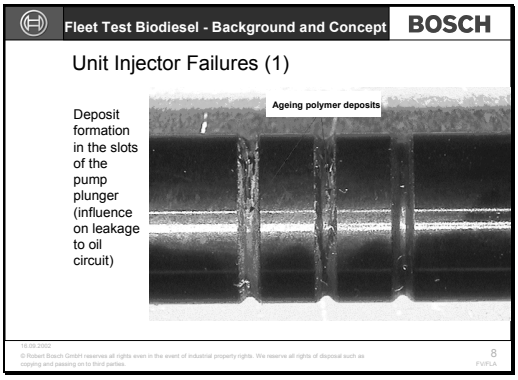


Folie 6

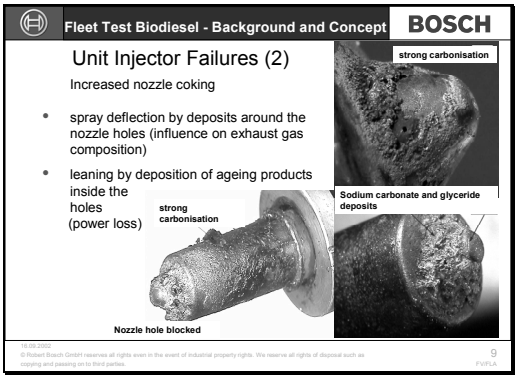
[1] Robert Bosch GmbH, Wernerstraße 51, 70442 Stuttgart



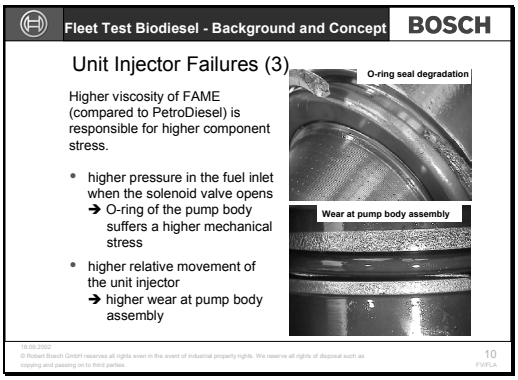
Folie 7



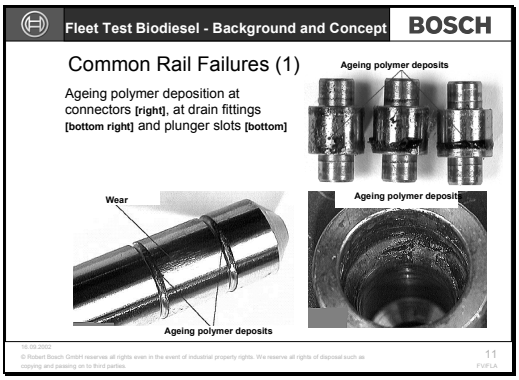
Folie 8



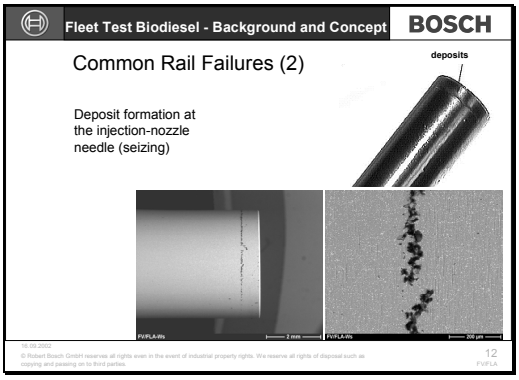
Folie 9



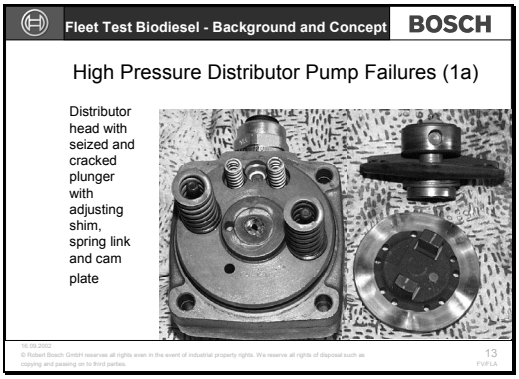
Folie 10



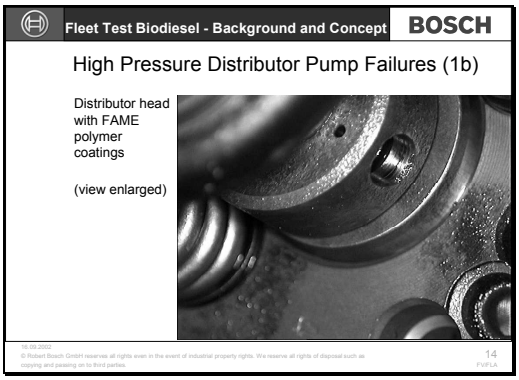
Folie 11



Folie 12



Folie 13



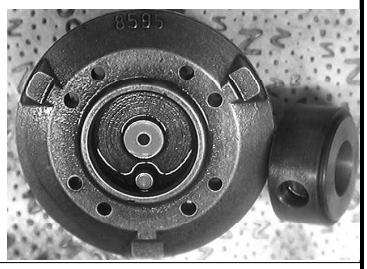
Folie 14

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

High Pressure Distributor Pump Failures (2)

Polymer coatings on cam plate and control spool

- sticking moving parts



16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 15 FV/FLA

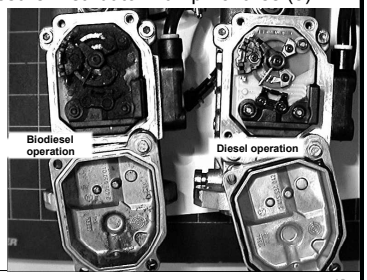
Folie 15

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

High Pressure Distributor Pump Failures (3)

Setting mechanism:

- corrosion by ageing acid evolution
- sticking moving parts by polymer deposition
- hysteresis increase



16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 16 FV/FLA

Folie 16

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Field Situation - Conclusions

The following assumptions for field failures can be made:

- FIE field damages are caused by low quality FAME that does not comply with prEN 14214 requirements.
- The basic properties of FAME itself, e.g. oxidation instability, are responsible for failures under field operation conditions.
- Interchanging refueling of FAME/fossil Diesel contributes to FIE damages.

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 17 FV/FLA

Folie 17

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Starting Position

- FAME quality is being addressed by European Standardisation. Definition of FAME properties and appropriate limits are finalised in Draft prEN 14214.
- There is no comprehensive field experience yet that shows trouble-free function of the FIE over lifetime with the FAME quality defined in Draft prEN14214.

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 18 FV/FLA

Folie 18

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Significance of Bench Test and Field Test Results

- FIE bench test
  - System test under well defined operation conditions for principal safeguarding of functionality.
  - For system and material optimisation
- FIE field test
  - Consideration of individual car application conditions
  - Coverage of operation limits within the sum of all major field influences

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 19 FV/FLA

Folie 19

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Major Field Influences (1)

- FAME
  - Ageing behaviour in the car fuel tank dependant on fuel consumption, fuel temperature and climate
  - high viscosity at low temperature (influence on fuel delivery)
  - Interchanging refueling of FAME/PetroDiesel
    - precipitation of ageing products
    - precipitation of water
  - Water absorption from air

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 20 FV/FLA

Folie 20

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Major Field Influences (2)

- Car operation conditions
  - Motorway, suburban and urban driving
  - Full load (trailer operation, full speed)
  - Hot soak (Restart after short rest during highway driving)
  - Housewives´ cycle
  - Restart after summer holiday standstill
  - Winter operation (cold starting performance)
  - Different mileage
  - Influence of additives for particle filter regeneration

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 21 FV/FLA

Folie 21

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Fleet Test Biodiesel - Partners

- Automotive Industry
  - Provision and operation of test fleet vehicles
  - Investigation and Evaluation of non-FIE components after fleet operation
- Biodiesel Industry
  - Supply of FAME (borderline to prEN 14214)
  - Fuel and motor oil analyses
  - Provision of additional test vehicles
- FIE supplier
  - Fleet test coordination
  - Investigation and evaluation of FIE components after fleet operation
  - Selective bench tests if operation problems are encountered at the FIE during fleet test.

16.09.2002 © Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties. 22 FV/FLA

Folie 22

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Fleet Test Fuel Quality - Borderline Biodiesel (1)

- Risk safeguarding by a fleet test has to be done with a bottom quality fuel. The fuel has to have the lowest quality that just fulfils the prEN 14214 criteria.
- With a better quality fleet test fuel (that is not borderline to prEN 14214) failures could possibly be overlooked that will emerge later on in the field.
- Production, distribution and dispersation of the fleet test fuel require the definition of fuel quality tolerances. In order not to get a better fuel than the lowest quality that is defined in prEN 14214, the quality deviations must be out of prEN 14214 specification range.

16.09.2002
© Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties.

Folie 23

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Fleet Test Fuel Quality - Borderline Biodiesel (2)

- Oxidation stability of 6 hrs.
  FAME is delivered to gas stations with an induction period of 6 hours maximum and should be dispensed quickly. The induction period should not fall below 4 hrs.
- Acid number of 0.5 to 0.6 mg KOH/g
- Triglyceride content of 0.20 to 0.25 %
- Free glycerol 0.020 to 0.025 %, total glycerol 0.25 to 0.28 %.
- Alkaline and alkaline-earth metals (Na+K+Ca+Mg) in sum of 10 to 12 mg/kg
- Water content of 500 to 550 mg/kg
- Defined portions of fatty acid methyl esters of vegetable and animal sources. Portions of frying oil/beef tallow methyl esters (up to 10 %) and of other vegetable methyl esters (up to 40 %) in RME, depending on seasonal conditions. Documentation requirements for percentages of non-RME.
- Without antioxidant additive, e.g. BHT

Process-related variations in FAME quality should be off prEN 14214 limits.

16.09.2002
© Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties.

Folie 24

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Fleet Test Biodiesel - Scope

- Duration: 1 year, covering summer and winter operation
- Fleet test start scheduled for Autumn 2002
- FIE to be tested:
  - Unit injectors
  - Common rail systems
  - High pressure distributor pumps

  Minimum: 10 test fleet vehicles each
- Full coverage of vehicle operation conditions
- Full coverage of prEN 14214 specification

16.09.2002
© Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties.

Folie 25

Fleet Test Biodiesel - Background and Concept BOSCH

Fleet Test Biodiesel - Summary

- FAME hitherto used for vehicle testing had been of different quality. Either the fuel was referenced to national standards that now are obsolete, or field fuel was used of ill-defined and changing composition.
- This fleet test, however, is the first comprehensive testing of European FAME, complying with prEN14214, in the full range of field conditions.
- Since borderline quality of FAME prEN 14214 is employed this test will provide substantial information about the function and lifetime of the fuel injection system. Data from this study will help to rate the real dimension of FAME related FIE-failures.
- Simultaneously, the Biodiesel industry and legislation have to guarantee that non-standardised Biodiesel fuel will disappear from the market.

16.09.2002
© Robert Bosch GmbH reserves all rights even in the event of industrial property rights. We reserve all rights of disposal such as copying and passing on to third parties.

Folie 26

Biodiesel (RME) aus Sicht des Umweltbundesamtes

Andreas Ostermeier[1]

Das Thema RME wird in diesem Beitrag unter Umweltschutzgesichtspunkten betrachtet. Die folgenden drei Aspekte erlauben dabei eine adäquate Strukturierung.

- Schadstoffemissionen bei der motorischen Verbrennung
- Umweltauswirkungen in der gesamten Produktionskette
- Ressourcenbindung durch RME und Alternativen unter Klimaschutzgesichtspunkten

Schadstoffemissionen bei der motorischen Verbrennung

Durch die Absenkung des Schwefel- und Aromatengehaltes im Dieselkraftstoff (DK) hat RME seine diesbezüglichen Vorteile im Wesentlichen verloren. In der heutigen Situation ist mit Ausnahme der sich tendenziell erhöhenden Stickoxid-Emissionen bei RME von geringfügig reduzierten Emissionen gegenüber DK auszugehen. Aus lufthygienischer Sicht sind insgesamt keine klaren Vor- oder Nachteile von RME gegenüber DK auszumachen.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass EURO-3 zertifizierte Fahrzeuge beim Betrieb mit RME in der Praxis teilweise nicht die Stickoxid-Grenzwerte einhalten.

Wegen ihres hohen humantoxischen Gefährdungspotenzials sind die Partikelemissionen der Dieselantriebe von besonderer Bedeutung. Dementsprechend wird der Vorteil, den RME in diesem Punkt tendenziell bietet, mitunter stark betont. Hierbei ist zu beachten, dass die Partikelemissionen stark vom Motortyp und Betriebspunkt abhängen, wobei im Einzelfall auch Erhöhungen gegenüber DK auftreten können. In jedem Fall sind die durch den Einsatz von RME erzielbaren Partikelreduktionen von ca. 10-50% gegenüber DK aus lufthygienischer Sicht bei weitem nicht ausreichend. Der Partikelfilter, wie er z.B. schon von Peugeot eingesetzt wird, erlaubt dagegen eine Reduktion um einen Faktor 10000.

Umweltauswirkungen in der gesamten Produktionskette

Hier stehen Umweltvorteile von RME in den Bereichen Ressourcen- und Klimaschutz den Nachteilen des intensiven landwirtschaftlichen Anbaus des zu produzierenden Raps gegenüber. Dies sind insbesondere Boden- und (Grund)wasserbelastung, Biotop- und Artenschutz.

RME reduziert gegenüber DK die Treibhausgas (THG)-Emissionen um etwa 50%. Der Verbrauch fossiler Energie wird um etwa 75% reduziert. Diese Zahlen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, die im Wesentlichen von der angenommenen Nutzung der Kuppelprodukte (insbesondere des Glyzerins) und den N_2O-Emissionen (Lachgas) des landwirtschaftlichen Rapsanbaus abhängen.

Die oben angegebenen Einsparungen von RME gegenüber DK sind nur erreichbar bei stofflicher Verwertung des Kuppelproduktes Glyzerin und bei Einhaltung guter landwirtschaftlicher Praxis beim Rapsanbau. Hierbei ist insbesondere eine korrekte Düngung wichtig. In der Praxis dürfte dies nicht immer zutreffen. Bei zu hohen oder zu falschen Zeitpunkten erfolgenden Dünger- bzw. Güllegaben kann die Klimagasbilanz von RME gegenüber DK durch die hieraus resultierenden N_2O-Emissionen sogar negativ werden. Für die weitere Bewertung von RME wird aber trotzdem von den oben angegebenen – optimistischen – Werten ausgegangen.

Insgesamt kann auch hier kein eindeutiges Umwelturteil abgegeben werden, da sich positive und negative Umweltauswirkungen in verschiedenen Wirkungskategorien gegenüberstehen, die nicht ohne weiteres gegeneinander aufgerechnet werden können.

Allerdings kann wegen der großen Bedeutung der Klimaschutzproblematik die Reduzierung der THG-Emissionen als entscheidend angesehen werden. Bei einer entsprechenden Werthaltung führt die Ökobilanz RME/DK dementsprechend zu einer positiven ökologischen Bewertung von RME gegenüber DK.

Gerade bei einer hohen Werthaltung der Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ muss es natürlich letztendlich darum gehen, einen mit den verfügbaren Ressourcen maximal möglichen Klimaschutzeffekt zu erzielen. Ökobilanzen bilden hierfür eine notwendige Entscheidungsgrundlage, müssen aber durch Effizienz- bzw. Kostenbetrachtungen ergänzt werden, um

[1] Umweltbundesamt, FG I 3.2 – Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin

zu insgesamt optimalen Lösungen zu gelangen. Hierauf wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Ressourcenbindung durch RME und Alternativen unter Klimaschutzgesichtspunkten

Die deutschen Klimaschutzziele sind mit einem THG-Einsparziel von 80% bis 2050 extrem ambitioniert. Dieses Ziel ist nur bei Einsatz optimierter effizienter Strategien erreichbar. Daher muss die Bewertung von RME auch unter derartigen Effizienzgesichtspunkten erfolgen.

Die Produktionskosten von RME betragen etwa 0,7 bis 1 Euro je Liter. Damit ergeben sich spezifische THG-Reduktionskosten von etwa 150-300 Euro je eingesparte Tonne CO_2-Äquivalente. Heute erscheinen spezifische THG-Reduktionskosten von 10-20 Euro akzeptabel. Entsprechende Optionen zur THG-Einsparung lassen sich an vielen Stellen z.B. im industriellen- und im Gebäudebereich identifizieren. Demgegenüber ist der Einsatz von RME um einen Faktor! 10-30 teurer. Das heißt, die staatlichen Mittel, die durch die Steuerbefreiung in den Bereich RME fließen, würden an anderer Stelle - z.B. zur Energieeffizienzsteigerung eingesetzt - einen etwa 10-30-fach größeren Klimaschutzeffekt erzielen.

Neben dem hier dargestellten Effizienzgesichtspunkt sind ebenfalls strategische Gesichtspunkte zu beachten. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Photovoltaik:

Auch die Photovoltaik wird heute stark gefördert. Die spezifischen THG-Reduktionskosten sind dabei noch deutlich höher als bei RME. Die investierten Mittel sind also unter dem Gesichtspunkt des aktuellen Klimaschutzes noch ungünstiger eingesetzt als bei RME. Die Photovoltaik bietet aber in zweifacher Hinsicht große strategische Potenziale:

- Die Photovoltaik bietet in der Lernkurve erhebliche Kostensenkungspotenziale.
- Das Mengenpotenzial der Photovoltaik ist praktisch unendlich.

Beide Punkte treffen auf RME nicht zu:

- RME bietet keine deutlichen Kostensenkungspotenziale (voll entwickelte Technologie).
- Das Mengenpotenzial von RME in Deutschland ist als Maximalabschätzung auf etwa 2,5% vom Kraftstoffmarkt beschränkt.

RME ist also unter Klimaschutzgesichtspunkten einerseits heute um mindestens einen Faktor 10 zu teuer, andererseits bietet es kaum eine strategische Perspektive für die Zukunft.

Effizienter Klimaschutz kann nur unter Einbeziehung des gesamten Energiesystems erfolgen. Ohne eine Überlastung der Volkswirtschaft erscheinen die ambitionierten Klimaschutzziele nur bei Beachtung der folgenden Strukturierung erreichbar:

- kurzfristig:
  Energieeinsparung im <u>mobilen & stationären</u> Bereich
- mittelfristig:
  Einsatz regenerativer Energien im <u>stationären</u> Bereich (gilt auch für Biomasseeinsatz)
  → im mobilen Bereich fossile Energieträger nutzen
- langfristig:
  <u>stationär</u> sind bereits hohe Anteile regenerativer Energien realisiert
  → <u>mobiler</u> Einsatz regenerativer Energie wird sinnvoll
  - Zu diesem Zeitpunkt sind voraussichtlich günstigere Biokraftstoff-Optionen als die der Pflanzenölschiene verfügbar. - z.B. thermochemische Ganzpflanzen-Vergasung (Wasserstoff, sun fuels)

Die langfristige Perspektive ist dabei auch bei einem forcierten Ausbau der regenerativen Energieträger nicht vor dem Jahr 2030 zu sehen.

Ökobilanz von RME im Vergleich zu Rapsöl

Sven O. Gärtner, Guido A. Reinhardt[1]

Zusammenfassung

Die steigende Verwendung von Rapskraftstoffen und die in letzter Zeit intensive Diskussion um kaltgepresstes Rapsöl zur Nutzung in Kraftfahrzeugen werfen die Frage nach den ökologischen Vor- und Nachteilen dieser Biokraftstoffe auf, und hier insbesondere, ob Rapsöl direkt in Dieselmotoren eingesetzt oder zuvor zu Rapsölmethylester (RME) weiterverarbeitet werden sollte. Auch der Unterschied zwischen zentraler und dezentraler Pressung des Rapsöls wird derzeit diskutiert. Diese und andere Variationen werden in der hier beschriebenen Untersuchung angelehnt an die Ökobilanz-Normen ISO DIN 14040 ff. analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen bei allen Varianten der Vergleiche von Rapsöl mit konventionellem Diesel die gleichen ökologischen Vor- und Nachteile, wie sie bereits beim Basisvergleich RME versus Dieselkraftstoff auftreten. RME zeigt gegenüber Rapsöl immer günstigere oder ähnliche Werte, außer wenn das Nebenprodukt Glyzerin zur Energiegewinnung verbrannt wird. Die zentrale Herstellung des Rapsöls ist gegenüber der dezentralen Pressung vorzuziehen, wenn man sich auf Grund seiner Werthaltung für Rapskraftstoffe statt fossilen Dieselkraftstoff entscheidet. Ein weiteres Ergebnis ist, dass veränderte Nutzungen der Kuppelprodukte Rapsschrot und Glyzerin die Ergebnisse zum Teil entscheidend verbessern können.

Schlüsselworte: Biodiesel, Ökobilanz, Rapsöl, kaltgepresstes Öl

Abstract

Increasing use of rapeseed fuels and the intense discussion on cold-pressed rapeseed oil for use as a transport fuel let the question on environmental advantages and disadvantages arise, especially whether rapeseed oil should be used directly in diesel engines or be processed to rapeseed oil methyl ester (RME) before. Also the difference between central and local pressing of the oil is being discussed. These and other variations are analysed and valuated in the study described here, oriented at the life cycle assessment (LCA) norm ISO 14040-43. The results show the same advantages and disadvantages for all variations of the rapeseed oil comparisons. The use of RME shows advantages over the use of rapeseed oil, except if the coproduct glycerine is used for energy recovery. Central pressing of rapeseed oil is preferable to local pressing if one for the own value system prefers rapeseed fuels to conventional diesel fuel. A further result is that changed utilisations of the coproducts rapeseed meal and glycerine can improve the results significantly.

Keywords: biodiesel, life cycle assessment, rapeseed oil, cold pressed oil

[1] ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Wilckensstr. 3, 69120 Heidelberg; sven.gaertner@ifeu.de; guido.reinhardt@ifeu.de

1 Einleitung

Die Diskussion um die Umweltwirkungen der beiden Bioenergieträger Rapsöl und Rapsölmethylester (RME) ist noch nicht abgeschlossen. Nachdem bis Ende der 90er Jahre Unstimmigkeiten in verschiedenen Analysen zum Vergleich zwischen RME und herkömmlichem Dieselkraftstoff von der Wissenschaftsgemeinde international weitgehend behoben wurden (u. a. Reinhardt u. Jungk, 2001, IFEU-EU, 2000), sind es nunmehr meist unterschiedliche Fragestellungen, die zu unterschiedlichen Bilanzergebnissen führen, und weniger Ungenauigkeiten in den Basisdaten oder Fehler in den Berechnungen. Im Hinblick auf den verstärkten direkten Einsatz von Rapsöl in Motoren stellt sich somit eine Reihe weiterer Fragen:

Eine der Kernfragen, die hier betrachtet werden, ist die Frage, ob das aus Raps gewonnene Öl direkt bzw. nach Raffination in Dieselmotoren (vorwiegend in Nutzfahrzeugen) eingesetzt oder ob es zu RME weiterverarbeitet werden sollte. Auch ergibt sich ein Unterschied, wenn Rapsöl nicht zentral, sondern dezentral abgepresst wird (geringere Transportwege, aber geringere Ausbeute).

Eine weitere Frage besteht darin, wie die bei der RME-Produktion anfallenden Nebenprodukte verwendet werden. Rapsextraktionsschrot und Glyzerin können jeweils unterschiedliche herkömmliche Produkte ersetzen, deren Herstellungsaufwand bei Ökobilanzen dem Hauptprodukt – hier also RME bzw. Rapsöl – gutgeschrieben wird. Das kann ebenfalls einen großen Einfluss auf das Endergebnis haben. Dabei ergeben sich für die verschiedenen Umweltwirkungen wie Treibhauseffekt oder Versauerung jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Diese Effekte für Rapsöl und RME zu analysieren ist Aufgabe einer Untersuchung, mit der die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. das IFEU im Sommer 2001 beauftragt hat und die aus Mitteln des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft gefördert wurde (Gärtner u. Reinhardt, 2001).

Ziel der Untersuchung ist ein ökologischer Vergleich für die beiden Bioenergieträger Rapsöl und RME. Dabei sollen unterschiedliche Verwendungen der anfallenden Nebenprodukte genauso berücksichtigt werden wie andere möglicherweise ergebnisbeeinflussende Rahmenbedingungen. Hierzu zählen insbesondere unterschiedliche Raffinationsgrade des Rapsöls, zentrale bzw. dezentrale Rapsölgewinnung sowie unterschiedliche Nutzungsvarianten (in Fahrzeugen oder in stationären Verbrennungsanlagen wie Heiz- oder Heizkraftwerken). Sowohl bei den Bioenergieträgern als auch bei dem damit zu vergleichenden fossilen Dieselkraftstoff bzw. Heizöl sollen dabei die vollständigen Lebenswege „von der Wiege bis zur Bahre“ berücksichtigt werden.

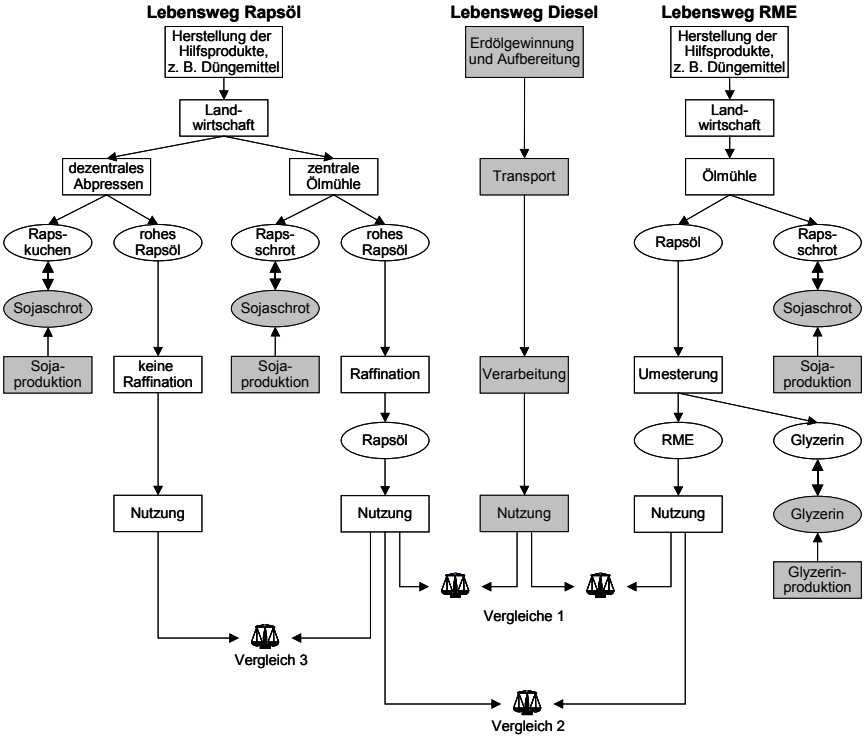


Abbildung 1:
Die untersuchten Basis-Lebenswegvergleiche von Rapsöl, RME und Dieselkraftstoff

2 Untersuchte Lebenswegvergleiche

Es werden die vollständigen Lebenswege von Rapsöl bzw. Rapsölmethylester (RME) denen von konventionellem Dieselkraftstoff bzw. Heizöl für unterschiedliche Randbedingungen gegenübergestellt. In den Vergleichen werden verschiedene Lebenswegvariationen betrachtet (s. Abbildung 1):

Vergleich 1: Vergleich zwischen den Rapskraftstoffen und Diesel

Es werden alle Lebenswegsvariationen der Rapskraftstoffe (RME, Rapsöl, zentral/dezentral, verschiedene Raffinationsgrade, verschiedene Nutzungsoptionen der Kuppelprodukte Rapsextraktionsschrot und Glyzerin) jeweils dem Lebensweg von konventionellem Dieselkraftstoff gegenüber gestellt.

Vergleich 2: Vergleich zwischen RME und Rapsöl

Der Vergleich erfolgt auf Basis der in den Vergleichen 1 ermittelten Ergebnisse, die in Relation zueinander gesetzt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist dies in Abbildung 1 nicht so dargestellt.

- Verfüttern des Nebenprodukts Rapsextraktionsschrot bzw. Rapskuchen an Vieh und Ersetzen von Sojaschrot aus den USA. Diese Verwendung wird dem RME- bzw. dem Rapsöl-Lebensweg gutgeschrieben.
- Ersetzen von herkömmlichem, petrochemisch hergestelltem Glyzerin durch das bei der Umesterung anfallende Glyzerin. Hier ergeben sich Gutschriften für RME.
- Zentrale Rapsölgewinnung in einer Ölmühle.
- Vollraffination des Rapsöls.

Vergleich 3: Vergleich zwischen zentralem und dezentralem Abpressen des Rapsöls

Die Rapsölgewinnung kann zentral in einer Ölmühle oder dezentral erfolgen, z. B. auf einem landwirtschaftlichen Hof, mit geringerer Ausbeute als bei zentralem Abpressen, aber auch geringerer Transportentfernung. Auch dieser Vergleich erfolgt auf Basis der in den Vergleichen 1 ermittelten Ergebnisse, die in Relation gesetzt werden.

- Verfüttern des Nebenprodukts Rapsextraktionsschrot bzw. Rapskuchen (bei dezentraler Pressung) an Vieh und Ersetzen von Sojaschrot aus den USA. Diese Verwendung wird beiden Lebenswegen gutgeschrieben.
- Zentrale und dezentrale Pressung des Rapsöls ohne anschließende Raffination.

Weitere Variationen

Weitere nicht in Abbildung 1 gezeigte Variationen wurden in der Untersuchung betrachtet und fließen in das Ergebnis der Vergleiche 1 ein:

- Für RME und Rapsöl: Nutzung des Nebenprodukts Rapsextraktionsschrot in Industrieheizwerken unter Ersetzung von Heizöl.
- Für RME: Nutzung des Nebenprodukts Glyzerin in Industrieheizwerken unter Ersetzung von Heizöl.
- Verschiedene Raffinationsgrade des Rapsöl beim zentralem Abpressen (keine, Teilraffination, Vollraffination).

3 Vorgehensweise und Festlegungen

3.1 Methodische Vorgehensweise

Die Erstellung der Bilanzen der hier betrachteten Lebenswegvergleiche wurde in Anlehnung an die Ökobilanznorm (DIN 14040 ff.) durchgeführt. Sämtliche Systemgrenzen, Randbedingungen und Vorgehensweisen sind in (Borken et al., 1999) sowie (Reinhardt et al., 1999) dokumentiert.

Einige der wichtigsten Kenngrößen und Systemgrenzen sind:

Bezugsraum für die Produktion und Verwendung von Raps, Rapsöl sowie RME ist die Bundesrepublik Deutschland, für alle Hilfsstoffe, Rohstoffe, Transporte etc. die jeweils für Deutschland realen Mixe einschließlich der realen Import- bzw. Exportmixe; Bezugszeitraum: Jahr 2000.

Alle notwendigen Erweiterungen für die neu durchzuführenden Berechnungen wurden an die Vorgehensweisen und Systemgrenzen der oben genannten Quellen angepasst.

3.2 Ergebnisdarstellung

Die meisten Basisdaten und Ökobilanzen entstammen (Borken et al., 1999) sowie (Reinhardt et al., 1999). Für die grafische Darstellung der Ergebnisse wurden folgende Daten verwendet:

Jährliche Einwohner-Durchschnittswerte (EDW) der in Deutschland verursachten Umweltwirkungen nach Kategorien bei 82,012 Mio. Einwohnern: Kumulierter Energieaufwand 178 GJ erschöpfliche Primärenergie, Treibhauspotenzial 13,2 t CO_2-Äquiv., Versauerungspotenzial 56 kg SO_2-Äquiv., Eutrophierungspotenzial 5,7 kg PO_4-Äquiv., Fotosmog 9 kg Ethen-Äquiv., stratosphärischer Ozonabbau 2,78 kg Distickstoffmonoxid (IFEU, 2001 nach UBA, 1998). Durchschnittlicher Verbrauch eines Diesel-Pkw: 7,1 l/100 km; durchschnittliche Fahrleistung: 16.300 km pro Jahr (TREMOD, 1993).

Bei der Beschreibung der Umweltwirkungen selbst wie auch der Ergebnisse wird einfach verständlichen Begriffen Vorrang gegenüber wissenschaftlich exakten Darstellungen eingeräumt wie beispielsweise "Versauerung" anstelle von „Versauerungspotenzial auf der Basis von SO_2-Äquivalenten“.

3.3 Analysierte Umweltwirkungen

Die in dieser Untersuchung bilanzierten Umweltwirkungen sind in Tab. 1 zusammengefasst. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis im Bereich der Verbrennung der Kraftstoffe können aussagekräftige, weitergehende Bilanzen zu human- und ökotoxischen Wirkungen unseres Erachtens derzeit nicht erstellt werden. Und für die beiden anderen Umweltwirkungskategorien des DIN-NAGUS "Lärm" und "Naturraumbeanspruchung" gibt es derzeit noch keine allgemein akzeptierte Bilanzierungsweise.

Tabelle 1:
Die untersuchten Umweltwirkungen der Lebenswegvergleiche von Rapsöl, RME und Dieselkraftstoff

Umweltwirkung	Indikator	Parameter	Äquivalenzfaktor
Energieeinsparung	Erschöpfliche Primärenergie	Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Uranerz	-
Treibhauseffekt	CO_2-Äquivalente	Kohlendioxid fossil	1
		Lachgas (Distickstoffoxid)	310
		Methan	21
Versauerung	SO_2-Äquivalente	Schwefeldioxid	1
		Stickoxide	0,7
		Ammoniak	1,88
		Chlorwasserstoff	0,88
Nährstoffeintrag	PO_4-Äquivalente	Stickoxide	0,13
		Ammoniak	0,346
Fotosmog (Sommersmog)	Ethen-Äquivalente	Methan	0,007
		NMVOC (av.)	0,416
Ozonabbau	N_2O	Lachgas	1

4 Ergebnisse

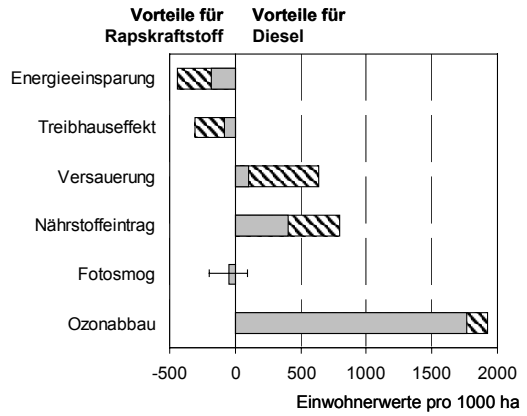
Die Ergebnisse für die beiden Hauptvergleiche (RME versus Diesel unter Verfütterung des Rapsschrots und stofflicher Nutzung des Glyzerins sowie Rapsöl versus Diesel unter Verfütterung des Rapsschrots bei zentraler Pressung) sind in Tab. 2 dargestellt. Gutschriften für Referenzsysteme wie die landwirtschaftliche Brachfläche, das ersetzte Sojaschrot aus den USA oder chemisch produziertes Glyzerin an Stelle des bei der Umesterung anfallenden Glyzerins sind negativ dargestellt bzw. von den Aufwendungen subtrahiert. Daher können sich in der Tabelle, insbesondere für die Bereitstellung, negative Werte ergeben. Ein negativer Saldo bedeutet einen Vorteil in der jeweiligen Wirkungskategorie für den biogenen Kraftstoff, während positive Werte nachteilig sind.

Im Ergebnis zeigt sich der Fotosmog als nicht eindeutig für oder gegen den Rapskraftstoff sprechend. Dies liegt an der systematischen Bandbreite, die durch die Emission des Extraktionsmittels n-Hexan bei der Gewinnung des Öls aus den Rapskörnern verursacht wird. Der Fotosmog spielt daher beim Vergleich der Rapskraftstoffe mit Diesel keine signifikante Rolle, sondern lediglich für die Quervergleiche, wie sie in Kap. 4.2 und 4.3 dargestellt sind.

Tabelle 2:
Bilanzergebnisse für RME und Rapsöl

	Indikator	Erschöpfl. Primär-energie	CO_2-Äquivalente	SO_2-Äquivalente	PO_4-Äquivalente	Ethen-Äquivalente	N_2O
	Einheit	GJ	kg	kg	Kg	kg	kg
RME	Produktion	10,4	2228	16,76	2,85	0,13	5,06
	Bereitstellung	-15,7	-920	-7,85	-0,41	0,14	-0,14
	Nutzung	0,0	214	7,24	1,32	0,72	0,69
Foss. Diesel-kraftstoff	Fossile Vorkette	5,7	435	2,24	0,13	0,27	0,02
	Nutzung	42,5	3358	8,12	1,32	0,72	0,69
Saldo	biogen minus fossil	-53,6	-2271	5,80	2,30	-0,001	4,90
Rapsöl (zentral)	Produktion	10,4	2228	16,76	2,85	0,13	5,05
	Bereitstellung	-0,6	-109	-2,17	-0,25	0,19	-0,10
	Nutzung	0,0	47	24,93	4,59	2,34	0,14
Diesel / Heizöl	Fossile Vorkette	5,3	400	2,06	0,12	0,25	0,01
	Nutzung	43,4	3254	25,70	4,59	2,34	0,14
Saldo	biogen minus fossil	-39,4	-1532	11,53	2,47	0,04	4,94

4.1 Vergleich zwischen den Rapskraftstoffen und Diesel



Lesebeispiel für den ersten Balken:
Dargestellt ist die Bandbreite aller Ergebnisse für alle untersuchten Varianten.
Wird der auf 1000 ha angebaute Raps als Biokraftstoff genutzt, dann entspricht die damit eingesparte Energie dem gesamten durchschnittlichen Jahresenergiebedarf von knapp 200 Bundesbürgern, im besten Fall dem von etwa 450 Bundesbürgern.

Abbildung 2:
Vergleich Rapskraftstoffe vs. Diesel

Die Nutzung von Rapskraftstoff hat ökologische Vor- und Nachteile gegenüber dem Einsatz von fossilem Dieselkraftstoff (Abbildung 2). Das ist so bereits seit Jahren aus der Literatur bekannt und von der Fachwelt akzeptiert.

Neu ist, dass die Ergebnisse sich über alle betrachteten Variationsmöglichkeiten absolut vorzeichenstabil verhalten. Das heißt, in allen Fällen finden sich immer die gleichen Vor- und Nachteile.

Eine objektive, wissenschaftlich begründete Entscheidung für den einen oder den anderen Treibstoff kann nicht erfolgen. Erst wenn zusätzliche Kriterien – basierend auf subjektiven Werthaltungen – herangezogen werden, lässt sich eine zusammenfassende Gesamtbewertung erlangen. Wenn man beispielsweise der Schonung fossiler Energieressourcen und dem Treibhauseffekt größere ökologische Bedeutung zumisst als den anderen Umweltwirkungen, so lässt sich eine Entscheidung für die Rapskraftstoffe rechtfertigen. Bei anderen Werthaltungen jedoch kann auch ein anderes Ergebnis erhalten werden.

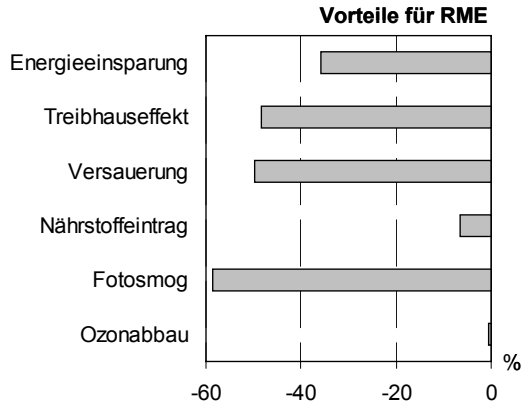
Es bleibt darauf hinzuweisen, dass die nicht in diese Untersuchung einbeziehbaren Umweltwirkungen, insbesondere im Bereich der Öko- und Humantoxizität, bei Vorliegen belastbarer Messergebnisse und Bilanzen die Entscheidung zugunsten des einen oder anderen Kraftstoffs beeinflussen können.

4.2 Vergleich zwischen RME und Rapsöl

RME zeigt gegenüber Rapsöl deutliche ökologische Vorteile, wenn das bei der RME-Produktion anfallende Glyzerin herkömmlich produziertes Glyzerin ersetzt (Abbildung 3).

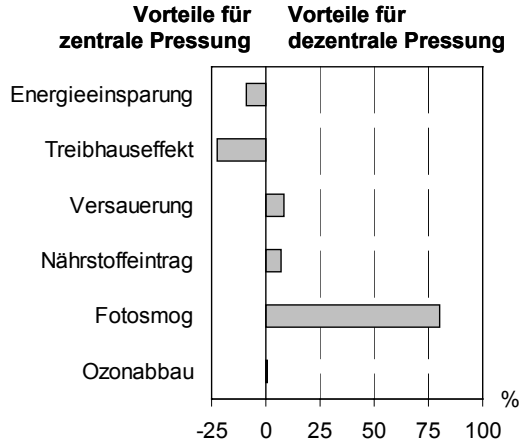
Wird das Glyzerin allerdings zur Energieerzeugung verbrannt, ergeben sich tendenziell Vorteile für das Rapsöl (in der Abbildung nicht dargestellt, Näheres s. Gärtner u. Reinhardt, 2001). Unter den derzeiti-

gen Verhältnissen ist dies jedoch nicht der Fall und für die nahe Zukunft auch nicht zu erwarten.



Lesebeispiel für den ersten Balken:
Dargestellt ist der Vergleich der Energiebilanzen zwischen RME und Rapsöl (RME: Rapsschrot als Futtermittel und Glyzerin als Chemiegrundstoff).
Die Nutzung von RME als Dieseltreibstoffersatz spart ca. 35 % mehr fossile Energieträger als die Nutzung von Rapsöl.

Abbildung 3:
Vergleich RME vs. Rapsöl



Lesebeispiel für den ersten Balken:
Dargestellt ist der Vergleich der gesamten Energiebilanzen zwischen dezentral und zentral abgepresstem Rapsöl.
Die Nutzung von Rapsöl als Dieseltreibstoffersatz spart bei zentraler Pressung ca. 10 % mehr fossile Energieträger ein als die Nutzung von Rapsöl bei dezentraler Pressung.

Abbildung 4:
Vergleich zentrale vs. dezentrale Pressung

4.3 Vergleich zwischen zentralem und dezentralem Abpressen des Rapsöls

Die Herstellung von Rapsöl, die dezentral im landwirtschaftlichen Betrieb durch Abpressen oder zentral in der Ölmühle durch Pressen und Extraktion mit ggf. anschließender Raffination erfolgen kann, wirkt sich unterschiedlich auf die Ergebnisse aus. Einerseits werden Transporte zur Ölmühle gespart, andererseits ist die Ausbeute an Rapsöl bei der zentralen Pressung aus Verfahrensgründen höher als bei dezentralem Abpressen.

Bemerkenswerterweise treten hier jeweils die gleichen ökologischen Vorteile und die gleichen Nachteile auf wie beim Vergleich der Rapskraftstoffe gegenüber Diesel (vgl. Kap. 4.1). Auch wenn eine objektive, wissenschaftlich begründbare Bewertung nicht vorgenommen werden kann, wenn gleichzeitig ökologische Vor- und Nachteile auftreten, so gilt in diesem Fall jedoch Folgendes:

Entscheidet man sich aufgrund seiner Werthaltung für den Einsatz von Rapskraftstoffen (Vorteile: Energieeinsparung und Treibhauseffekt) anstelle von Diesel (Vorteile: Versauerung, Nährstoffeintrag und Ozonabbau), dann folgt mit genau dieser Werthaltung, dass die zentrale Aufbereitung von Rapsöl der dezentralen Aufbereitung eindeutig vorzuziehen ist.

5 Zusammenfassung

Aus den in Kapitel 4 dargestellten Vergleichen der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten lassen sich folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen ableiten:

Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff und Heizöl

- Beide Rapskraftstoffe sind vorteilhaft bei der Einsparung fossiler Energien und beim Treibhauseffekt, nachteilig bei der Versauerung, dem Nährstoffeintrag und dem Ozonabbau. Eine objektive Entscheidung für oder gegen Rapskraftstoff kann daher nicht getroffen werden, lässt sich mit subjektiven Werthaltungen aber durchaus durchführen.

RME im Vergleich zu Rapsöl

- RME zeigt in allen Varianten günstigere oder ähnliche Werte gegenüber Rapsöl, außer wenn Glyzerin, ein Nebenprodukt bei der RME-Herstellung, zur Energiegewinnung verbrannt wird. Unter derzeitigen Verhältnissen ist dies jedoch nicht der Fall und für die nahe Zukunft auch nicht zu erwarten.

Rapsöl: zentral oder dezentral

- Es zeigen sich zwar ökologische Vor- wie auch Nachteile. Bei einer grundsätzlichen Werthaltung jedoch, die den Rapskraftstoffen Vorzüge gegenüber Diesel einräumt, folgt mit eben dieser Werthaltung, dass die zentrale Aufbereitung von Rapsöl der dezentralen Aufbereitung eindeutig vorzuziehen ist.

Einfluss weiterer Randbedingungen auf die Ergebnisse

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Ergebnisse in besonderem Maße abhängig sind von der Verwendung der Nebenprodukte, während die anderen Variationen zu keinen relevanten Ergebnisunterschieden führen. Im Einzelnen ergeben sich folgende Zusammenhänge:

- Schrot verfüttern oder verbrennen: Es zeigen sich zwar ökologische Vor- wie auch Nachteile. Bei einer grundsätzlichen Werthaltung jedoch, die den Rapskraftstoffen Vorzüge gegenüber Diesel einräumt, folgt mit eben dieser Werthaltung, dass die Verbrennung von Rapsschrot zur Energiegewinnung der Nutzung als Futtermittel eindeutig vorzuziehen ist.
- Die Verbrennung von Glyzerin zur Energiegewinnung hat deutliche Nachteile gegenüber dessen stofflicher Nutzung z. B. in der Chemie- oder Pharmaindustrie.
- In allen betrachteten Umweltwirkungen ist es unerheblich, ob die Bioenergieträger in Fahrzeugen oder in stationären Anlagen wie Heizwerken genutzt werden. Ebenso spielt der Aufbereitungsgrad des Rapsöls (keine, teilweise oder vollständige Raffination) eine nur untergeordnete Rolle.

Die hier ermittelten Ergebnisse besitzen eine hohe Genauigkeit und bilden somit eine belastbare Entscheidungsgrundlage. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, dass die nicht in diese Untersuchung einbeziehbaren Umweltwirkungen, insbesondere im Bereich der Öko- und Humantoxizität, bei Vorliegen belastbarer Messergebnisse und Bilanzen die Entscheidung zugunsten des einen oder anderen Kraftstoffs beeinflussen können.

Literatur

Borken, J, Patyk, A, Reinhardt, G A (1999) Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Braunschweig / Wiesbaden: Verlag Vieweg

DIN EN ISO 14040 bis 14043. Deutsches Institut für Normung (DIN) (eds). Deutsche Normen. Beuth Verlag, Berlin 1997 bis 2000

Gärtner S O, Reinhardt G A (2001) Ökologischer Vergleich von RME und Rapsöl. IFEU Heidelberg 2001

IFEU (2000) Bioenergy for Europe: Which Ones Fit Best? A Comparative Analysis for the Community (eds). IFEU (coordinator) with BLT (A), CLM (NL), CRES (GR), CTI (I) , FAT/FAL (CH), INRA (F), TUD (DK). Supported by the European Commisson, DG XII; 09/1998-08/2000. For details see www.ifeu.de

IFEU (2001) Eigene Abschätzungen bzw. Berechnungen

Reinhardt G A, Borken, J, Patyk, A, Vogt, R, Zemanek, G (1999) Ressourcen- und Emissionsbilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. In: Kraus K, Niklas G, Tappe, M. (eds) Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl / RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. UBA-Texte 97/99, Berlin 1999

Reinhardt G A, Jungk N C (2001) Pros and Cons of "RME versus ordinary diesel fuel". In: Proceedings of the 3rd International Colloquium of Fuels held in Ostfildern, Germany, January 2001; Bartz (Hrsg.), FUELS 2001, Technische Akademie Esslingen, S. 247-256, Ostfildern 2001

/TREMOD/ Berechnungen mit dem Daten- und Rechenmodell der Software TREMOD – Transport Emission Estimation Model. Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin (UFOPLAN-Nr. 105 06 057), seit 1993

Umweltbundesamt (1998) Umweltdaten, Berlin

Emissionsvergleich von Biodiesel mit schwedischem Dieselkraftstoff MK 1

Hendrik Stein[1], Jürgen Krahl[1, 2], Axel Munack[1], Olaf Schröder[1], Myriam Dutz[1]

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, Partikelanzahlver-teilungen, 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 Dieselkraftstoff 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 Dieselkraftstoff, herkömmlichem Dieselkraftstoff 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 cm³
Nenndrehzahl	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 ausgewählt. 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.

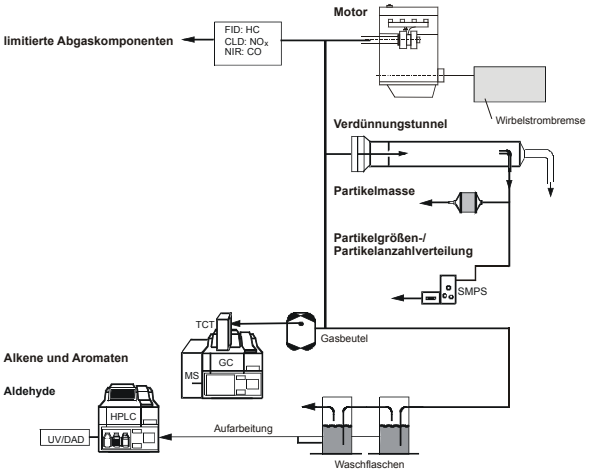


Abbildung 1:
Schematischer Aufbau des Emissionsprüfstandes am Institut für Technologie und Biosystemtechnik

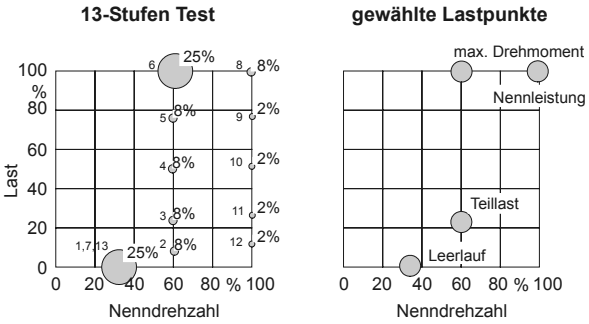


Abbildung 2:
13-Stufentest nach ECE R49 und die daraus ausgewählten Betriebspunkte

2.2 Analysemethoden und Kraftstoffeigenschaften

Die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile CO, HC und NO_x werden durch herkömmliche Gasanalysatoren 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. Dieselkraftstoff 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.

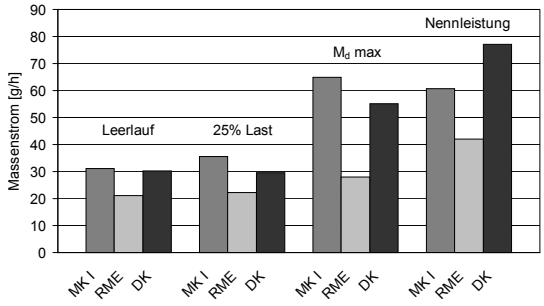


Abbildung 3:
CO-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

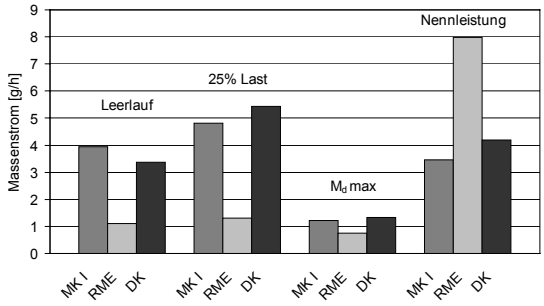


Abbildung 4:
HC-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

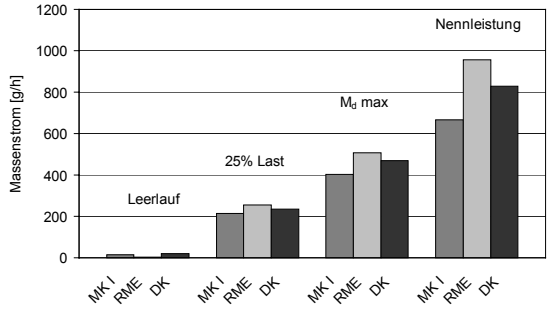


Abbildung 5:
NO_x-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

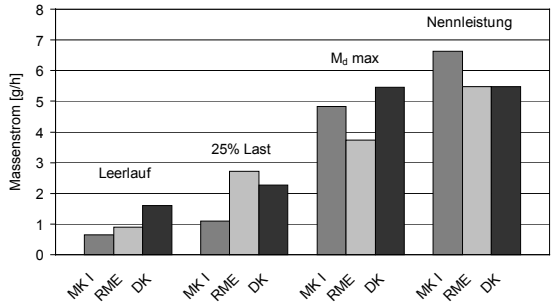


Abbildung 6:
PM-Emissionen für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

Obwohl diese Einzelergebnisse keinen Rückschluss auf das Gesamtergebnis des 13-Stufentests erlauben, wird dennoch deutlich, dass sich keine signifikanten Unterschiede zwischen konventionellem Dieselkraftstoff 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 Partikelmassesträmen 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.

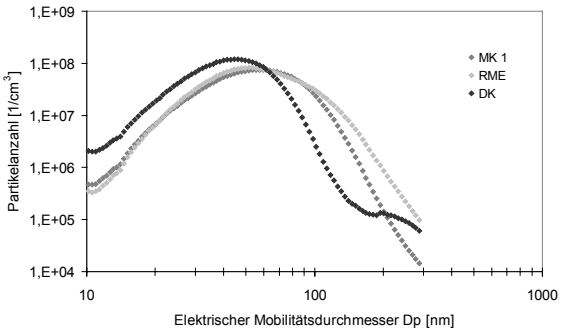


Abbildung 7:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei Leerlauf

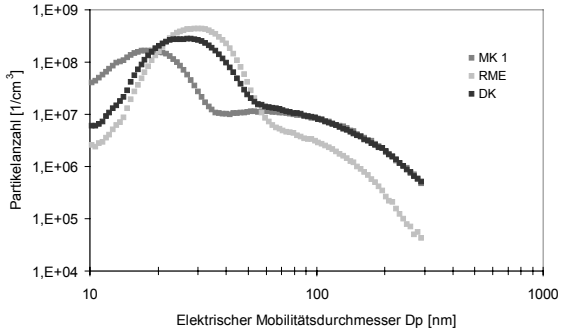


Abbildung 8:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei 25% Last

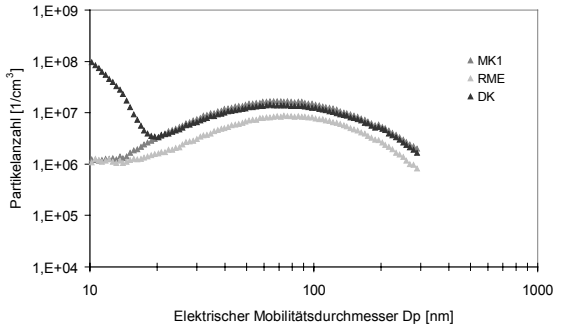


Abbildung 9:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei maximalem Drehmoment

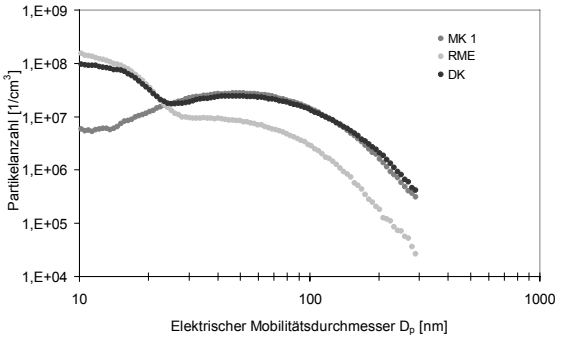


Abbildung 10:
Partikelanzahlverteilung für MK 1, RME und DK bei Nennleistung

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.

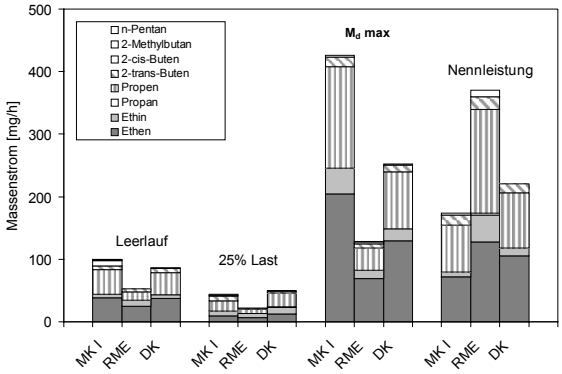


Abbildung 11:
Emissionen der Alkane, Alkene und Ethin für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

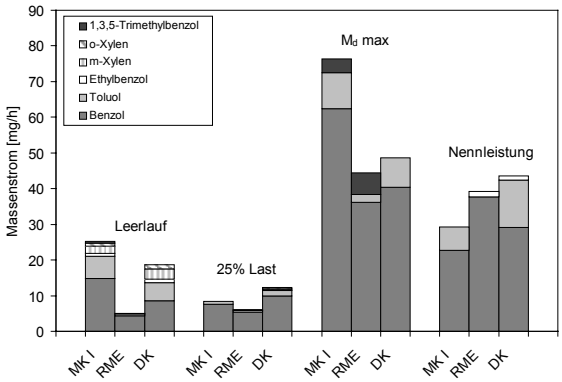


Abbildung 12:
Emissionen der aromatischen Kohlenwasserstoffe für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

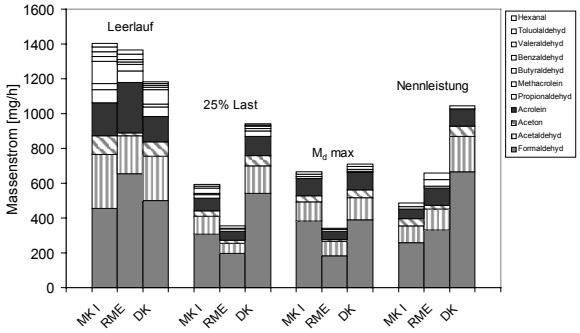


Abbildung 13:
Emissionen der Aldehyde und Ketone für MK 1, RME und DK in vier ausgewählten Betriebspunkten

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 Dieselkraftstoffen hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens an einem modernen Dieselmotor. Neben schwedischem Dieselkraftstoff (MK 1) und herkömmlichem Dieselkraftstoff (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 Biodieselbroschüre

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 Kraffahrtbundesamtes (2002) [online] unter http://www.kba.de

Anhang

Tabelle 2: Kraftstoffeigenschaften

Tabelle 2:
Kraftstoffeigenschaften

Biodiesel nach E DIN 51606		**conne-diesel**	**Diesel nach DIN EN 590**		**Diesel-kraft-stoff**	**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	Neutralisations-zahl [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

Partikelemissionen und Mutagenität von herkömmlichem Dieselkraftstoff, schwedischem Dieselkraftstoff MK 1 und Biodiesel

Jürgen Bünger[1], Jürgen Krahl[2, 3], Hendrik Stein[3], Michael Müller[1]

Zusammenfassung

Trotz nicht eindeutiger wissenschaftlicher Beweise sind Dieselmotoremissionen (DME) in Deutschland und anderen Staaten als krebserregend eingestuft, weil in epidemiologischen Studien eine leicht erhöhte Lungenkrebshäufigkeit bei beruflich durch Dieselabgas exponierten Personen beobachtet wurde und im Tierversuch Lungentumoren an Ratten auftraten. Die krebserregende Wirkung geht von den Partikelemissionen und den daran anhaftenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) aus. Die Höhe des kanzerogenen Potenzials lässt sich am effektivsten durch die Untersuchung der erbgutverändernden Wirkung (Mutagenität) an einzelnen Zellen untersuchen.

Wir haben daher die DME-Partikelphase von 3 verschiedenen Dieselkraftstoffen (herkömmlicher Dieselkraftstoff (DK), schwedischer Dieselkraftstoff (MK1) und Biodiesel (RME)) in ihre löslichen und unlöslichen Fraktionen aufgetrennt und die lösliche Fraktion im AMES-Test auf ihre mutagene Wirkung untersucht.

Im Vergleich zu DK waren sowohl die Gesamtmassen als auch die unlöslichen Fraktionen der emittierten Partikel bei der Verbrennung von MK1 und RME in den drei untersuchten Lastpunkten immer deutlich niedriger. Die Mutagenität der Partikelextrakte war bei Verwendung von RME als Kraftstoff in allen getesteten Betriebspunkten am niedrigsten. Dieser Unterschied ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch den sehr niedrigen Gehalt an Schwefel und PAK im Biodiesel bedingt. MK1 hatte im Vergleich zu herkömmlichem DK ebenfalls eine deutlich niedrigere mutagene Wirkung. Dies ist wahrscheinlich ebenfalls auf die Absenkung des Schwefelgehaltes zurückzuführen.

Nach den bislang vorliegenden Kenntnissen kann das auf inhalierte DME zurückzuführende Gesundheitsrisiko durch den Einsatz von RME als Kraftstoff absinken. Für fossile Dieselkraftstoffe kann ein ähnlicher Effekt sehr wahrscheinlich durch die Absenkung des Gehaltes an Schwefel und Aromaten erzielt werden.

Einleitung

Eine viel diskutierte chronische Auswirkung der inhalativen Exposition durch Dieselrußpartikeln ist die Kanzerogenese. Während die krebserzeugende Wirkung von partikulären Dieselmotoremissionen im Tierversuch durch die Auslösung von Lungentumoren im Langzeitinhalationsversuch an Ratten eindeutig belegt ist (Heinrich et al., 1986, Heinrich et al., 1995, Nikula et al., 1995), ist die Bedeutung der inhalativen Exposition durch partikuläre Verbrennungsemissionen aus Dieselmotoren für die Induktion von malignen Lungentumoren beim Menschen immer noch umstritten. Epidemiologisch haben eine große Zahl von arbeitsmedizinischen Studien erhöhte relative Risiken von 1,2 bis 1,6 für Lungenkrebs nach langjähriger beruflicher Exposition gegenüber hohen Konzentrationen von Dieselmotoremissionen erbracht, wobei aber die 95%-Konfidenzintervalle (95% KI) in vielen dieser Studien für eine Signifikanz der Ergebnisse zu groß waren (Übersichten bei: Mauderly, 1994, Health Effects Institute, 1995, Bhatia et al., 1998, Health Effects Institute, 1999, Nold und Bochmann, 1999). Neben diesem epidemiologisch nur gering erhöhten Risiko wurde die Kausalität des Zusammenhangs auch aus anderen Gründen angezweifelt (Stöber und Abel, 1996, Muscat, 1996, Crump, 1999). So wiesen die meisten der oben genannten Studien erhebliche Mängel bei der Expositionsabschätzung und der Berücksichtigung von Confoundern (Rauchen, Asbest) auf.

Dennoch wurden Dieselmotoremissionen 1987 von der *Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft* (MAK-Kommission) als wahrscheinlich für den Menschen krebserregend eingestuft. Diese Bewertung wurde auch durch den *Ausschuss für Gefahrstoffe* (AGS) des Bundesministeriums für Arbeit und Sozialordnung mit der Aufnahme in die TRGS 905 (Einstufung K2) in nationales Recht überführt. Neben epidemiologischen Studien an beruflich exponierten Kohorten beruhte diese Einschätzung auch auf tierexperimentellen Studien.

Erste Hinweise auf die Kanzerogenität von DME ergab eine Studie aus den 50-er Jahren des vorigen

[1] Zentrum Umwelt- und Arbeitsmedizin, Georg-August-Universität Göttingen, Waldweg 37, D-37073 Göttingen
[2] Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig
[3] Fachhochschule Coburg, Friedrich-Streib-Straße 2, D-96450 Coburg

Jahrhunderts, bei der Extrakte von Dieselrußpartikeln und Kondensate der Gasphase auf die Haut von Mäusen aufgebracht wurden (Kotin et al., 1955). Endgültige Gewissheit über die kanzerogene Wirkung der DME erbrachten Inhalationsstudien, bei denen verschiedene Spezies (Ratte, Maus, syrischer Goldhamster) über 2 Jahre bzw. lebenslang gegenüber DME exponiert wurden. Die Versuche an Ratten zeigten konsistent, dass die Exposition durch hohe Konzentrationen von DME zu einer dosisabhängigen Inzidenz von Lungentumoren führt (Heinrich et al., 1986, Ishinishi et al., 1986, Iwai et al., 1986, Mauderly et al., 1987). Im Gegensatz zu diesen eindeutigen Ergebnissen an Ratten waren die Untersuchungen am syrischen Hamster durchweg negativ. Die Inhalationsstudien an Mäusen ergaben uneinheitliche Ergebnisse. (Übersicht bei Busby und Newberne, 1995).

Die Relevanz dieser Daten für die Abschätzung des humanen Lungenkrebsrisikos durch Dieselmotoremissionen wird sehr kontrovers beurteilt. Auffällig ist beispielsweise, dass die Tumoren in der Rattenlunge meist im Alveolarbereich entstehen, beim Menschen jedoch im Bronchialbaum (Pott und Roller, 1997). Darüber hinaus entstehen Tumoren in der Rattenlunge in der Regel erst durch eine Partikelkonzentration, bei der die Reinigungsfunktion (Clearance) überlastet wird (Health Effect Institute, 1995). Unterhalb einer Dosis von 2 mg Dieselpartikeln/m^3 Luft traten in diesen Inhalationsstudien keine statistisch signifikanten Anstiege der Lungentumorraten bei Ratten auf (Heinrich et al., 1995, Nikula et al., 1995).

Mechanistisch scheint es sowohl einen nicht genotoxischen als auch einen genotoxischen Schädigungsweg durch die in den Atemwegen deponierten Partikel von DME zu geben. Während die unlöslichen Anteile der Partikel über eine Aktivierung von Makrophagen zur Bildung von reaktiven Sauerstoffradikalen und über die Ausschüttung von Zytokinen und anderen Mediatoren zu einer Inflammation mit Zellschädigung und Zellproliferation mit der Folge der Hyperplasie und der Fibrose führen, können die von den Partikeln desorbierten PAK zur Bildung von DNA-Addukten und Punktmutationen führen (Bond et al., 1988, Health Effects Institute, 1995).

Die hohe mutagene Potenz von Dieselpartikelextrakten wurde erstmals von Huisingh et al. (1978) beschrieben und wurde mittlerweile von vielen anderen Arbeitsgruppen bestätigt (Clark und Vigil, 1980, Claxton und Barnes, 1981, Lewtas, 1983). Weitere Untersuchungen zeigten, dass auch die Partikel selbst (Brooks et al., 1980, Siak et al., 1981, Belisario et al., 1984) und die Kondensate der Gasphase von DME im Ames-Test mutagen sind (Stump et al., 1982, Rannug et al., 1983, Matsushita et al., 1986).

Die direkte Mutagenität von Dieselrußpartikeln wird substituierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen zugeschrieben, vor allem den Nitro-PAK (Wang et al., 1978, Pedersen und Siak, 1981, Ohe, 1984). Die nativen PAK müssen in aktive Metabolite überführt werden, um mutagen zu wirken. Im Ames-Test wird diese metabolische Aktivierung durch Rattenlebermikrosomen, deren Enzyme durch eine Vorbehandlung der Ratten mit Arochlor oder anderen enzyminduzierenden Substanzen induziert wurden, erreicht (Clark und Vigil, 1980). In einer Reihe von Untersuchungen wurden Nitro-PAK als Hauptverursacher der *in vitro*-Gentoxizität organischer Extrakte aus Dieselmotorabgasen identifiziert (Übersicht in: Rosenkranz und Mermelstein, 1983).

Ziel der toxikologischen Untersuchungen

Neben der Weiterentwicklung der Motortechnologie und der Abgasnachbehandlung wurde in den letzten Jahren auch die Kraftstoffforschung intensiviert, um die neuen EU-Grenzwerte einhalten zu können. In diesem Zusammenhang wurde einerseits der Schwefelgehalt von Mineralöldiesel gesenkt, andererseits Kraftstoffen aus regenerativen Quellen (Pflanzenölmethylester, Biodiesel) verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet (Krahl et al., 1998).

Da nicht alle gesundheitsrelevanten Dieselmotorabgasbestandteile bekannt sind, und die bisher untersuchten wegen ihrer großen Anzahl nicht alle quantitativ erfasst werden können, war es das Ziel der toxikologischen Studien, die partikulären Dieselmotoremissionen als Gemisch bei Verbrennung von Biodiesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff mit einer *in vitro*-Methode (Ames-Test) auf ihre biologischen Wirkungen zu untersuchen und aus arbeits- und umweltmedizinischer Sicht zu bewerten.

Material und Methoden

Extraktion der filtergesammelten Partikel

Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft wurden mit Abgaspartikulat belegte Glasfaserfilter gekühlt zur Verfügung gestellt. Für jeden der 3 untersuchten Kraftstoffe (DK, MK1, RME) wurden je 5 Filterpaare und ein Referenzfilterpaar der Betriebspunkte 1, 3 und 6 des 13-Stufen-Tests (ECE R 49) untersucht. Die filtergesammelten Partikulate wurden einer Soxhlet-Extraktion mit Dichlormethan im Dunkeln unterzogen (Claxton, 1983). Dieses Verfahren ermöglicht die effektivste Gewinnung von Mutagenen aus Dieselabgaspartikulat (Siak et al., 1981). Das Filtergewicht wurde vor und nach der Extraktion

ermittelt und die lösliche Fraktion berechnet. Die gewonnenen Extrakte wurden im Rotationsverdampfer bis zur Trockne eingedampft. Für den Ames-Test wurde der eingetrocknete Extrakt in 4 ml DMSO gelöst.

Mutagenitätsuntersuchung (Ames-Test)

Der sogenannte Ames-Test (Ames et al., 1973 und 1975) deckt die mutagenen Eigenschaften eines weiten Spektrums von chemischen Substanzen und Gemischen durch Rückmutationen in einer Serie von verschiedenen Teststämmen auf. Diese tragen Mutationen im Histidin-Operon. Die Mutationen bedingen eine Histidin-Auxotrophie der Teststämme im Gegensatz zu den Wildtypen von *Salmonella typhimurium*, die Histidin-prototroph sind. Der Ames-Test ist das weltweit am häufigsten eingesetzte in-vitro-Testverfahren (OECD-Methode 471), um die Mutagenität komplexer Gemische, wie z.B. von Verbrennungsprodukten, zu untersuchen. Die hier vorliegende Studie benutzte das revidierte Standardtestprotokoll von Maron und Ames aus dem Jahr 1983 mit den Teststämmen TA 98 und TA 100. TA 98 deckt Rasterschub-Mutationen und TA 100 Basenpaar-Substitutionen auf. Die Teststämme wurden freundlicherweise von Prof. B.N. Ames zur Verfügung gestellt.

Die Tests wurden mit und ohne metabolische Aktivierung durch mikrosomale Monooxygenasen (S9-Fraktion) durchgeführt. Die Präparation der S9-Fraktion aus Lebern von jungen Sprague-Dawley-Ratten wurde entsprechend der Anleitung von Maron und Ames (1983) durchgeführt. Für die Induktion der Leberenzyme wurden Phenobarbital und β-Naphthoflavon anstatt des polychlorierten Biphenyls Arochlor-1254 benutzt (Matsushima et al. 1976). Die Mutagene Methylmethansulfonat (MMS), 2-Aminofluoren (2-AF) und 3-Nitrobenzanthron (3-NBA) wurden als Positivkontrollen verwandt.

Direkt vor der Testung wurden die Extrakte in 4 ml DMSO gelöst. Ebenfalls unter Verwendung von DMSO wurde eine absteigende Verdünnungsreihe hergestellt, die für die Tests eingesetzt wurde. 2-AF (100 µg/ml) und 3-NBA (1 ng/ml) wurden ebenfalls in DMSO gelöst. MMS wurde mit destilliertem Wasser (10 µg/ml) verdünnt. Flüssiger Top-Agar (2,5 ml) der 0,05 mmol Histidin und 0,05 mmol Biotin enthielt, wurde mit 100 µl einer Testkonzentration der Extrakte und 100 µl einer Übernachtkultur eines Teststammes gemischt. Nach kurzem Schütteln auf einem Vortex-Gerät wurde das Gemisch direkt auf eine Minimal-Agarplatte, die Vogel-Bonner-E-Medium enthielt, verteilt. Jede Testkonzentration wurde mit beiden Teststämmen und mit und ohne Zusatz von 4%-igem S9 untersucht. Jeder Extrakt wurde doppelt getestet. Die Tests wurden im Abstand von 1 bis 2 Wochen wiederholt.

Die Kolonienzahl der Rückmutanten auf den Petrischalen wurde nach 48 Stunden Inkubation bei 37 °C im Dunkeln gezählt. Das Hintergrundwachstum der Bakterien wurde regelmäßig mittels Lichtmikroskopie überprüft, da hohe Konzentrationen der Extrakte toxisch auf die Teststämme wirken und zu einer Ausdünnung des Hintergrundes sowie zu einem Rückgang der Mutationen führen können. Die Auszählung der Platten wurde mit Hilfe eines elektronischen Kolonienzählgerätes (Cardinal, Perceptive Instruments, Haverhill, Großbritannien) durchgeführt. Routinemäßig wurden zur Kontrolle 10 % der Platten handgezählt. Entsprechend der Kriterien von Ames et al. (1975) wurden die Ergebnisse als positiv gewertet, wenn die Kolonienzahl der Rückmutationen auf den Petrischalen eine Verdopplung der spontanen Mutationsrate und eine dosisabhängige, reproduzierbare Dosis-Wirkungs-Beziehung aufwiesen.

Ergebnisse und Diskussion

Je nach Lastpunkt zeigten die **Partikelmassen** ein unterschiedliches Verhalten. Im Vergleich zu DK war die Gesamtmasse der emittierten Partikel bei Verbrennung von MK1 und RME in den drei Lastpunkten aber immer deutlich niedriger (Abbildung 1).

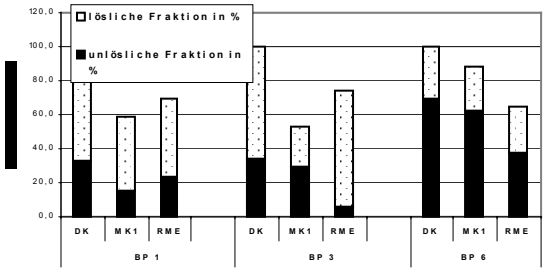


Abbildung 1:
Partikelmassen und lösliche Fraktionen der DME von DK, MK1 und RME im relativen Vergleich (DK = 100%).

Die löslichen Fraktionen verhielten sich insgesamt ähnlich wie die Gesamtmassen. Der sehr hohe prozentuale Anteil der löslichen Fraktionen bei niedriger Last spricht dafür, dass diese Fraktionen zu einem großen Anteil aus unverbranntem Kraftstoff bestehen.

Der Anteil unlöslicher Komponenten des Abgases, der näherungsweise dem Ruß entspricht, war insgesamt bei RME deutlich geringer als bei DK und MK1. Die in zahlreichen epidemiologischen Studien belegten Gesundheitsrisiken durch Partikelemissionen werden zu einem wesentlichen Teil auf den Rußausstoß von Dieselfahrzeugen zurückgeführt (Health Effects Institute, 1995). Daher ist die Reduktion der

unlöslichen Fraktion des Partikulates im RME-Betrieb aus arbeits- und umweltmedizinischer Sicht besonders positiv zu werten.

Die Mutagenität der Partikelextrakte auf den Teststamm TA98 war bei Verwendung von RME als Kraftstoff in allen getesteten Betriebspunkten am niedrigsten (Abbildung 2), wie dies auch in früheren Studien an anderen Motoren und Fahrzeugen nachgewiesen werden konnte (Bünger et al., 1998, Bagley et al., 1998, Bünger et al., 2000a, Bünger et al., 2000b). Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch den sehr niedrigen Gehalt an Schwefel (<10 ppm) und das Fehlen von polyzyklischen Aromaten im Biodiesel bedingt.

MK1 hatte im Vergleich zu herkömmlichem DK ebenfalls eine deutlich niedrigere mutagene Wirkung auf den Teststamm TA98. Dies ist vermutlich ebenfalls auf die Absenkung des Schwefelgehaltes im MK1 (2 ppm) im Vergleich zu DK (320 ppm) zurückzuführen. Je nach Schwefelgehalt des Kraftstoffs tragen Sulfationen, die aus dem im Abgas entstehenden Schwefeldioxid gebildet werden, zur Bildung der unlöslichen Partikelfraktion bei. Steigender DK-Schwefelgehalt bewirkt eine Zunahme der emittierten Partikelmasse bei verschiedenen Dieselmotoren (Rasmussen, 1990, Sjögren et al., 1996). Der Schwefelgehalt zeigt auch eine statistisch signifikante Assoziation zur Mutagenität von DK-Abgasextrakten (Sjögren et al., 1996).

Der mutagene Effekt auf den Teststamm TA100 war deutlich niedriger als im TA98, spiegelte aber insgesamt die gleichen Verhältnisse wider. Die Testung mit metabolischer Aktivierung durch mikrosomale Monooxygenasen ergab keine Verstärkung der Mutagenität. Die Revertantenzahlen waren durchweg niedriger als im Test ohne Aktivierung.

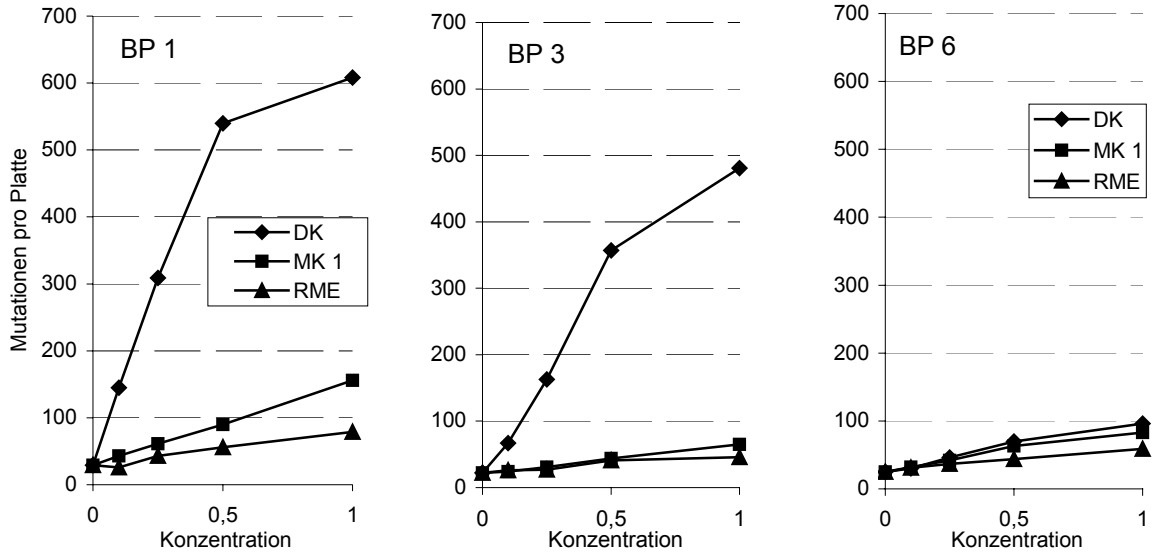


Abbildung 2:
Dosis-Wirkungs-Kurven der mutagenen Wirkung der Partikelextrakte auf den Teststamm TA98 in den Betriebspunkten 1, 3 und 6.

Auch der Gehalt des Kraftstoffs an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) hat offensichtlich einen Einfluss auf die Mutagenität der Abgase. Bei DK stieg die Mutagenität in mehreren Studien deutlich mit dem Aromatengehalt des Kraftstoffs an (Clark et al., 1982, Crebelli et al., 1995, Rasmussen, 1990, Sjögren et al., 1996). Den größten Einfluss auf die Mutagenität ermittelten Sjögren et al. (1996) für folgende PAK und substituierte PAK: Picen, Phenanthrene, 2-Methylanthracen, 3-Methylphenanthren und Fluoranthen. Für die Phenanthrene wurde auch schon von Clark et al. (1982) über eine starke Assoziation mit der Mutagenität von DK-Abgasextrakten berichtet. Der getestete DK enthielt 6,2 Gew.-% PAK, der MK1 weniger als 0,02 Gew.-%. Da RME normalerweise keine PAK enthält, ist hierin wahrscheinlich der Grund für die noch niedrigere Mutagenität im Vergleich zu MK1 zu sehen.

Wie die deutlich niedrigere Mutagenität der DME von MK1 und RME zeigt, lassen sich die krebserregenden Wirkungen von DME durch die Reduktion des PAK- und Schwefelgehaltes der Kraftstoffe effek-

tiv absenken. Biodiesel hat dabei den Vorteil, dass er von Natur aus praktisch schwefel- und PAK-frei ist.

Literatur

Ames B N, Lee F D, Durston W E (1973) An improved bacterial test system for the detection and classification of mutagens and carcinogens. Proc Natl Acad Sci USA 70, 782 - 786

Ames B N, McCann J, Yamasaki E (1975) Methods for detecting carcinogens and mutagens with the Salmonella/mammalian-microsome mutagenicity test. Mutat Res 31, 347 - 363

Bagley S T, Gratz L D, Johnson J H, McDonald J F (1998) Effects of an oxidation catalytic converter and a biodiesel fuel on the chemical, mutagenic, and particle size characteristics of emissions from a diesel engine. Environ Sci Technol 32, 1183 - 1191

Belisario M A, Buonocore V, De Marinis E, De Lorenzo F (1984) Biological availability of mutagenic compounds adsorbed onto diesel exhaust particulate. Mutat Res 135, 1 - 9

Bhatia R, Lopipero P, Smith A H (1998) Diesel exhaust exposure and lung cancer. Epidemiology 9, 84 - 91

Bond J A, Wolff R K, Harkema J R, Mauderly J L, Henderson R F, Griffith W C, Mc Clellan R O (1988) Distribution of DNA adducts in the respiratory tracts of rats exposed to diesel exhaust. Toxicol Appl Pharmacol 96, 336 - 346

Brooks A L, Wolff R K, Royer R E, Clark C R, Sanchez A, McClellan R O (1980) Biological availability of mutagenic chemicals associated with diesel exhaust particles; in: Health Effects of Diesel Engine Emissions. In: Pepelko W E, Danner R M, Clarke N A (eds); EPA/600/9-80/57a; U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA

Bünger J, Krahl J, Franke H U, Munack A, Hallier E (1998) Mutagenic and cytotoxic effects of exhaust particulate matter of biodiesel compared to fossil diesel fuel. Mutat. Res 415, 13 - 23

Bünger J, Müller M M, Krahl J, Baum K, Weigel A, Hallier E, Schulz T G (2000a) Mutagenicity of diesel engine particles from two fossil and two plant oil fuels. Mutagenesis 15, 391 - 397

Bünger J, Krahl J, Baum K, Schröder O, Müller M, Westphal G, Ruhnau P, Schulz T, Hallier E (2000b) Comparison of diesel engine emissions from biodiesel and petrol diesel fuel: Particle size and number analysis, cytotoxic and mutagenic effects. Arch Toxicol 74, 490 - 498

Busby W F Jr, Newberne P M (1995) Diesel emissions and other substances associated with animal carcinogenicity; in: Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure, and health effects; hrsg. v. Health Effects Institute, Cambridge, USA, 187 - 220

Clark C R, Vigil C L (1980) Influence of rat lung and liver homogenates on the mutagenicity of diesel exhaust particulate extracts. Toxicol Appl Pharmacol 56: 100 - 115

Clark C R, Henderson T R, Royer R E, Brooks A L, McClellan R O, Marshall W F, Naman T M (1982) Mutagenicity of diesel exhaust particle extracts: Influence of fuel composition in two diesel engines. Fundam Appl Toxicol 2, 38 - 43

Claxton L D (1983) Characterization of automotive emissions by bacterial mutagenesis bioassay: a review. Environ Mutagen 5, 609 - 631

Claxton L D, Barnes H M (1981) The mutagenicity of diesel-exhaust particle extracts collected under smoke-chamber conditions using the Salmonella typhimurium test system. Mutat Res 88, 255 - 272

Crebelli R, Conti L, Crochi B, Carere A, Bertoli C, Del Giacomo N (1995) The effect of fuel composition on the mutagenicity of diesel engine exhaust. Mutat Res 346, 167 - 172

Crump K S (1999) Lung cancer mortality and diesel exhaust: Reanalysis of a retrospective cohort study of U.S. Railroad workers. Inhal Toxicol 11, 1 - 17

Deutsche Forschungsgemeinschaft (1987) Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten: Dieselmotoremissionen. Wiley-VCH, Weinheim

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Senatskommission zur Prüfung gesundheits-schädlicher Arbeitsstoffe (2000) MAK- und BAT-Werte-Liste. Wiley-VCH, Weinheim

Health Effects Institute (1995) Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure, and health effects. A special report of the institute´s diesel working group, Cambridge, USA

Health Effects Institute (1999) Diesel exhaust and lung cancer: Epidemiology and quantitative risk assessment. A special report of the institute´s diesel epidemiology expert panel. Cambridge, USA

Heinrich U, Muhle H, Takenaka S, Ernst H, Fuhst R, Mohr U, Pott F, Stöber W (1986) Chronic effects on the respiratory tract of hamsters, mice and rat after long-term inhalation of high concentrations of filtered and unfiltered diesel engine emissions. J Appl Toxicol 6, 383 - 395

Heinrich U, Fuhst R, Rittinghausen S, Creutzenberg O, Bellmann B, Koch W, Levsen K (1995) Chronic inhalation exposure of Wistar rats and two different strains of mice to diesel engine exhaust, carbon black, and titanium dioxide. Inhal Toxicol, 7, 533 - 556

Huisingh J, Bradow R, Jungers R, Claxton L, Zweidinger R, Tejada S, Bumgarner J, Duffield F, Waters M (1978) Application of bioassay to the characterization of diesel particle emissions: In: Waters M D, Nesnow S, Huisingh J L, Sandhu S S, Claxton L D (eds) Application of short-term bioassay in the fractionation and analysis of complex environmental mixtures. New York Plenum Press, pp 382 - 418

Ishinishi N, Kuwabara N, Nagase S, Suzuki T, Ishiwata S, Kohno T (1986) Long-term inhalation studies on effects of exhaust from heavy and light duty diesel engines on F344 rats. In: Ishinishi N, Koizumi A, Mc Clellan RO, Stöber W (eds) Carcinogenic and Mutagenic Effects of Diesel Engine Exhaust. New York: Elsevier Science Publishing, pp 329 - 348

Iwai K, Udagawa T, Yamagishi M, Yanada H (1986) Long-term inhalation studies of diesel exhaust on 344 SPF rats. In: Ishinishi N, Koizumi A, Mc Clellan RO, Stöber W (eds) Carcinogenic and Mutagenic Effects of Diesel Engine Exhaust. New York: Elsevier Science Publishing, pp 349 - 360

Kotin P, Falk HL, Thomas M (1955): Aromatic hydrocarbons: III. Presence in the particulate phase of diesel-engine exhausts and the carcinogenicity of exhaust extracts. Arch Ind Health 11, 113 - 120

Krahl J, Bünger J, Munack A (1998) Biodiesel exhaust emissions and determination of their environmental and health effects. In: Martini N, Schell J (eds) Plant oils as fuels: present state of science and future developments. Berlin: Springer, pp 104 - 122

Lewtas J (1983) Evaluation of the mutagenicity and carcinogenicity of motor vehicle emissions in short-term bioassays. Environ Health Perspect 47, 141 - 152

Maron DM, Ames BN (1983) Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. Mutat Res 113, 173 - 215

Matsushima T, Sawamura M, Hara K, Sugimura T (1976) A safe substitute for polychlorinated biphenyls as an inducer of metabolic activation system.. In: Serres F J, Fouts J R, Bend J R, Philpot R M (eds) In vitro metabolic activation in mutagenesis testing. Amsterdam: Elsevier/North-Holland, ,pp 85 - 88

Matsushita H, Goto S, Endo O, Lee J, Kawai A (1986) Mutagenicity of diesel exhaust and related chemicals. In: Ishinishi N, Koizumi A, Mc Clellan RO, Stöber W (eds) Carcinogenic and Mutagenic Effects of Diesel Engine Exhaust. New York: Elsevier Science Publishing, pp 103 - 118

Mauderly J L (1994) Toxicological and epidemiological evidence for health risks from inhaled diesel engine emissions. Environ Health Perspect 102 Suppl 4, 165 - 171

Mauderly J L, Jones R K, Griffith W C, Henderson R F, McClellan R (1987) Diesel exhaust is a pulmonary carcinogen in rats exposed chronically by inhalation. Fundam Appl Toxicol 9, 208 - 221

Muscat J E (1996) Carcinogenic effects of diesel emissions and lung cancer: the epidemiologic evidence is not causal. J Clin Epidemiol 49, 891 - 892

Nikula K J, Snipes M B, Barr E B, Griffith W C, Henderson R F, Mauderly J L (1995) Comparative pulmonary toxicities and carcinogenicities of chronically inhaled diesel exhaust and carbon black in F344 rats. Fundam Appl Toxicol 25, 80 - 94

Nold A, Bochmann F (1999) Epidemiologische Ergebnisse zu Dieselmotoremis-sionen und Lungenkrebs: Eine Synopse. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 59, 289 - 298

Ohe T (1984) Mutagenicity of photochemical reaction products of polycyclic aromatic hydrocarbons with nitrite. Sci Total Environ 39, 161 - 175

Pederson T C, Siak J S (1981) The role of nitroaromatic compounds in the direct-acting mutagenicity of diesel particle extracts. J Appl Toxicol 1, 54 - 60

Pott F, Roller M (1997) Current data and questions of interest on the carcinogenicity of solid particles of diesel engine exhaust and other sources. Zentralbl Hyg Umweltmed 200, 223 - 280

Rannug U, Sundvall A, Westerholm R, Alsberg T, Stenberg U (1983) Some aspects of mutagenicity testing of the particulate phase and the gas phase of diluted and undiluted automobile exhaust. Environ Sci Res 27, 3 - 16

Rasmussen R E (1990) Effect of fuel properties on mutagenic activity in extracts of heavy-duty diesel exhaust particulate. J Air Waste Manage Assoc 40, 1391 - 1396

Rosenkranz H S, Mermelstein R (1983) Mutagenicity and genotoxicity of nitroarenes. All nitro-containing chemicals were not created equal. Mutat Res 114, 217 - 267

Siak J S, Chan J L, Lee P S (1981) Diesel particulate extracts in bacterial test systems. Environ Int 5, 243 - 248

Sjögren M, Li H, Banner C, Rafter J, Westerholm R, Rannug U (1996) Influence of physical and chemical characteristics of diesel fuels and exhaust emissions on biological effects of particle extracts: A multivariate statistical analysis of ten diesel fuels. Chem Res Toxicol 9, 197 - 207

Stöber W, Abel U R (1996) Lung cancer due to diesel soot particles in ambient air? A critical appraisal of epidemiological studies addressing this question. Int Arch Occup Environ Health 68 Suppl, 3 - 61

Stump F, Bradow R, Ray W, Dropkin D, Zwedinger R, Sigsby J, Snow R (1982) Trapping gaseous hydrocarbons for mutagenic testing; Paper No. 820776; Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA

Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 905 (1997) Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe. BArbBl., Nr. 6, 40 - 46, geändert durch BArbBl. 1997, Nr. 11, 27, geändert durch BArbBl. 1998, Nr. 5, 72 - 73, geändert durch BArbBl. 1998, Nr. 10, 76, geändert durch BArbBl. 1999, Nr. 4, 46

Wang, Y Y, Rappaport S M, Sawyer R F, Talcott R E, Wei E T (1978) Direct-acting mutagens in automobile exhaust. Cancer Lett 5, 39 - 47

Qualitätsmanagement Biodiesel - Maßnahmen zur Einhaltung der Kraftstoffgüte

Jürgen Fischer[1]

Die Schaffung der wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für den Einsatz von Biodiesel waren unabdingbar für die Einführung dieses innovativen Kraftstoffs, und ebenso verhält es sich auch mit der weiterführenden Forschung, die sich mit immer neuen Problemfeldern auseinandersetzen muss.

Als mindestens ebenso wichtig erwies sich allerdings nach einiger Zeit die Frage der Kraftstoffqualität und die zur Einhaltung dieser Qualität erforderlichen Maßnahmen. Nachdem es lange Zeit nur sehr wenige Produzenten und Anbieter gegeben hatte, erhöhte sich aufgrund verbesserter wirtschaftlicher Voraussetzungen diese Zahl rasch, und damit einhergehend auch die angebotene Menge, wobei die Herkunft dieser Ware oft nicht nachvollziehbar war.

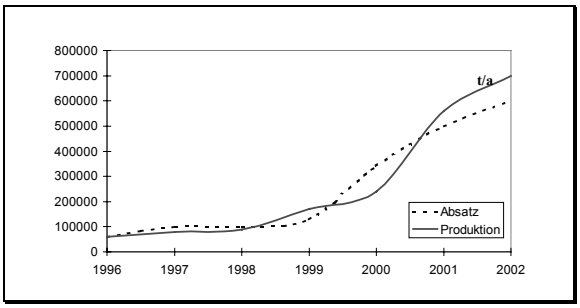


Abbildung 1:
Biodiesel-Produktion und –Absatz in Deutschland (1998-2002)

Eine zunehmende Zahl von Reklamationen aus dem Kundenkreis und Beschwerden der Automobilhersteller zeigte schließlich die Notwendigkeit der Schaffung eines Qualitätsmanagement-Systems, das durch Vorgaben für Herstellung und Vertrieb dafür sorgt, dass die Anforderungen, die ein störungsfreier Betrieb an den Kraftstoff stellt, eingehalten werden.

Wie kann ein solches Konzept aussehen? Basis jeder Qualitätssicherung sind zunächst natürlich festgeschriebene Anforderungen für ein Produkt. Nationale und internationale Normen legen diese Anforderungen fest; dies gilt für Otto- und Dieselkraftstoffe und ebenso auch für Biodiesel. Die deutsche Norm E DIN 51606 wird im Laufe diesen Jahres durch den Europäischen Standard EN 14214 ersetzt werden, der eine Vielzahl zusätzlicher und verschärfter Anforderungen enthält.

Selbstverständlich muss man das Rad nicht neu erfinden, um ein Qualitätsmanagement-System für Produktion, Transport und Vertrieb eines Kraftstoffs zu erstellen. Allerdings muss man auf einige Besonderheiten dieses Produktes eingehen, um die Versorgung der Verbraucher mit einem Biodiesel, der ihre Erwartungen erfüllt, zu gewährleisten. Im folgenden sollen die wichtigsten Maßnahmen für die jeweiligen „Lebensabschnitte“ des Biodiesels vorgestellt werden.

Produktion

Die Produktion beginnt bereits mit den eingesetzten Rohstoffen. Das Qualitätsmanagement beinhaltet dabei folgende Punkte:

a) Rohstoffe:

- Rohstoffauswahl
- Überwachung der Rohstoffqualität und -beschaffenheit
- Dokumentation

b) Produktion:

- Einstellung der Produktqualität
- Qualitätskontrolle
- Freigabe nach Analyse
- Dokumentation der Produktüberwachung (Protokolle, Datum, Chargennummer, Unterschrift)
- Rückstellmuster, Aufbewahrung mindestens 3 Monate
- Sperrung und Kennzeichnung von fehlerhaften Produkten, Dokumentation
- Rechtzeitige Produktion von Winter-Biodiesel (4 Wochen vor Beginn der Winterperiode)

c) Lagerung, Verladung

Vorschriften für Lagerung und Verladung betreffen sowohl Produktionsstätten als auch Zwischenlager des Mineralölhandels. Wichtig sind hier insbesondere:

- Behälterauswahl und Lagerbedingungen (keine Beeinträchtigung der Produktqualität)
- Technische Ausstattung der Lager- und Verladeeinrichtungen
- Kennzeichnungsmöglichkeit für fehlerhafte Produkte
- Schulung des Personals

[1] ADM Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co., Sägemühlenstraße 45, 26789 Leer, j_fischer@admworld.com

- Bei Zwischenlagerung: Dokumentation von Restmenge und –qualität vorhergehender Einlagerungen

d) Transport

Für den Transport von Biodiesel sind folgende Punkte zu beachten:

- Keine Vermischung von mineralischen Kraftstoffen und Biodiesel
- Reinigungszustand der Fahrzeuge, kein Wasser und keine festen Verunreinigungen
- Kein Wassereintrag während des Transports
- Keine Produktreste aus Vorladungen
- Keine AI – Produkte als Vorladung

Wie bei allen QM-Konzepten taucht auch hier immer wieder die Dokumentation auf. Dieses Werkzeug dient in erster Linie zur Rückverfolgung von Produkten und Ergebnissen und zur Ursachenforschung beim Auftreten von Produktmängeln.

Um ein solches Konzept zu schaffen und einzuführen wurde im Dezember 1999 die Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V., kurz AGQM genannt, gegründet.

Der AGQM sind Unternehmen aus Deutschland, Österreich und Frankreich angeschlossen, die weitreichende Maßnahmen zur Sicherung der Biodiesel-Qualität durchführen.

- Novaol Austria GmbH
- BIO-Diesel Wittenberge GmbH
- Ölmühle Leer Connemann GmbH & Co.
- Biodiesel Schwarzheide GmbH
- Hallertauer Hopfenveredelungsgesellschaft mbH
- CAMPA-Biodiesel GmbH & Co. KG
- Landwirtschaftliche Produkt-Verarbeitungs GmbH
- Novaol France
- Mitteldeutsche Umesterungswerke GmbH & Co. KG
- TME, Thüringer Methylester Werke
- Ölmühle Hamburg AG
- NEW Natural Energie West GmbH
- RBE - Rheinische Bio Ester GmbH & Co. KG
- Kartoffelverwertungsgesellschaft Cordes & Stoltenburg
- Bio-Ölwerk Magdeburg GmbH
- Biodiesel Bokel GmbH

Abbildung 2:
Biodiesel-Produzenten in der AGQM

Neben der Umsetzung der genannten Maßnahmen gehören die Überwachung der produzierenden Mitglieder und der Unternehmen mit eigenen Zwischenlagertanks durch unabhängige Kontrollen und die Qualitätskontrolle an Tankstellen dazu. Zusätzlich wurde die überwiegende Zahl der Biodiesel - Tankstellen in ein Kontrollzeichen – System eingebunden, das auch im letzten Glied der Verteilungskette durch Vorgabe strenger Qualitätskriterien, Dokumentation und Rückverfolgbarkeit der eingekauften Kraftstoffe, aber auch durch technische Beratung und Unterstützung von Tankstellenbetreibern und Endverbrauchern für Produktsicherheit sorgt.

Einfluss der Struktur von Fettsäurealkylestern auf die Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels

Gerhard Knothe[1]

Zusammenfassung

Der aus Pflanzenölen oder tierischen Fetten gewonnene Biodiesel hat sich zu einem etablierten "alternativen" Kraftstoff entwickelt. Dieser Kraftstoff wird gewerblich in zahlreichen Ländern rund um die Welt produziert und verwendet. In fast allen Fällen werden die Öle oder Fette mit Methanol umgeestert, die entsprechenden Methylester ergebend. In dieser Form werden dann die Pflanzenöle oder tierischen Fette als Biodiesel verwendet. Einer der die Kraftstoffeigenschaften beeinflussende Hauptfaktoren ist das Fettsäureprofil, genauer gesagt, die Struktur der Fettsäuren des Öls oder Fettes aus dem der Biodiesel hergestellt wird. Kettenlänge und Sättigungsgrad der Fettsäuren sind Strukturfaktoren, welche die Kraftstoffeigenschaften beeinflussen. Jedoch können prinzipiell auch andere Alkohole als Methanol für die Herstellung von Pflanzenöl- oder Tierfettestern verwendet werden. Deshalb kann die Art des Esters ebenfalls die Kraftstoffeigenschaften beeinflussen. Einige der wichtigsten Kraftstoffeigenschaften, die von der Struktur der Fettsäureester beeinflusst werden, sind die Cetanzahl als Ausdruck der Zündwilligkeit und letztendlich Einflussfaktor auf Emissionen, Tieftemperatureigenschaften, Oxidationsstabilität und Viskosität. Diese Arbeit untersucht und bewertet den Einfluss der verschiedenen Strukturkomponenten auf die Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels und weist auf mögliche Verbesserungen dieser Eigenschaften hin. Gleichungen aus denen sich die Cetanzahlen von Fettsäurealkylestern vorhersagen lassen, werden vorgestellt.

1 Einleitung

Biodiesel ist ein aus Pflanzenölen oder tierischen Fetten gewonnener "alternativer" Dieselkraftstoff (Dunn und Knothe, 2001; Knothe und Dunn, 2001). Um Biodiesel zu erhalten, werden die Öle oder Fette einer Umesterungsreaktion mit einem einwertigen Alkohol - in der Regel Methanol - unterzogen, bei der die entsprechenden Alkylester entstehen. Die erfolgreiche Einführung und Kommerzialisierung des Biodiesels in vielen Ländern hat zur Entwicklung von Normen geführt, um hohe Produktqualität und Verbrauchervertrauen zu sichern. Die Eigenschaften aller Kraftstoffe, einschließlich des Biodiesels, werden von möglichen Verunreinigungen beeinflusst, jedoch ist die Art der Kraftstoffkomponenten mindestens so wichtig. Einige Qualitätsparameter in den Normen können letztendlich auf die Struktur der Fettsäurealkylester, die den Biodiesel zusammensetzen, zurückgeführt werden. Dabei spielen nicht nur die Strukturen der Fettsäuren eine Rolle, sondern die der Alkohole können die Kraftstoffeigenschaften ebenfalls beeinflussen (Knothe und Dunn, 2001). Die Umesterungsreaktion eines Pflanzenöls (oder tierischen Fetts) ergibt als Biodieselkraftstoffe verwendbare Fettsäurealkylester, die mit den Fettsäureprofilen der Ausgangsstoffe übereinstimmen. Biodiesel ist also ein Gemisch aus Fettsäurealkylestern, wobei jede Komponente dieses Gemisches zu den Kraftstoffeigenschaften beiträgt. Mehrere Struktureigenschaften, wie etwa Sättigungsgrad, Kettenlänge und Verzweigungsgrad tragen zu den Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels bei. Diese Arbeit diskutiert die Einflüsse der verschiedenen Strukturkomponenten auf Kraftstoffeigenschaften wie Cetanzahl (CZ), Tieftemperatureigenschaften, Oxidationsstabilität und Viskosität und schlägt Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Parameter vor. Neue Ergebnisse zu Cetanzahlbestimmungen von Fettsäurealkylestern werden vorgestellt. Cetanzahlen und Tieftemperatureigenschaften werden hier etwas eingehender diskutiert. Oxidationsstabilität und Viskosität werden etwas kürzer behandelt. Die Eigenschaften und Einflüsse von Kraftstoffverunreinigungen, wie sie während der Biodieselproduktion entstehen können oder natürlich in Ölen oder Fetten vorkommen, werden hier nicht behandelt.

[1] National Center for Agricultural Utilization Research, 1815 North University Street, PEORIA, Illinois 61604-3999, USA

2 Experimentelle Hinweise

Cetanzahlen verzweigter und geradkettiger Ester wurden mit dem "Ignition Quality Tester" (IQT^{TM}; "Zündwilligkeitstester") bestimmt, wie in der Literatur beschrieben (Allard et al., 1996; 1997; 1999; 2001). Der IQT^{TM} wurde mit Hexadecan and 2,2,4,4,6,8,8-Heptamethylnonan (HMN) als Referenzkraftstoffe kalibriert. Gleichungen, die die Zündverzögerung mit Cetanzahlen verbinden, wurden unter Verwendung von TableCurve 2D Software (SPSS Science, Chicago, IL) bestimmt. Weitere Informationen zu den Eigenschaften der Fettsäurealkylester werden hier aus der Literatur zitiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

In der Regel wird, als billigster Alkohol, Methanol zur Biodieselherstellung verwendet. Deshalb kann Biodiesel in den meisten Fällen auch als Fettsäuremethylester (engl. "fatty acid methyl esters"; FAME) bezeichnet werden. Da jedoch, wie oben angedeutet, sowohl die Fettsäurekette als auch der Alkohol zu den Eigenschaften eines Fettsäureesters beitragen, ist es lohnend, auch die Eigenschaften, die durch andere Alkohole herbeigeführt werden, zu untersuchen. Deshalb werden beide Aspekte hier diskutiert.

Tabelle 1 führt kraftstoffrelevante Eigenschaften von Alkylestern der Pflanzenöle und tierischen Fette auf. Solche Eigenschaften für reine Ester können Tabelle 2 entnommen werden.

3.1 Cetanzahl und Emissionen

Die CZ ist ein wichtiger Indikator der Qualität eines Dieselkraftstoffs. Sie wird von der Zündwilligkeit, die ein Kraftstoff nach der Einspritzung in die Verbrennungskammern des Dieselmotors aufweist, abgeleitet. Dem K o n z e p t nach ähnelt sie der wohlbekannten Oktanzahl, die auf Ottokraftstoffe angewendet wird. Jedoch ist in der Regel ein guter Ottokraftstoff ein schlechter Dieselkraftstoff und umgekehrt. Dabei gilt allgemein, dass eine Verbindung, die eine hohe Oktanzahl besitzt, eine niedrige CZ aufweist und umgekehrt.

Die CZ wird durch die Zündverzögerung bestimmt, d.h. die Zeit die zwischen Einspritzen des Kraftstoffs in den Brennraum und Einsetzen der Zündung verstreicht. Je kürzer die Zündverzögerung, desto höher die CZ und umgekehrt. In den USA wird die Zündwilligkeit meist mit Hilfe der Norm ASTM (American Society for Testing and Materials) D613 bestimmt. Für die Cetanskala ist ein langkettiger Kohlenwasserstoff - Hexadecan ($C_{16}H_{34}$; Trivialname Cetan) - als Referenzverbindung mit hoher Zündwilligkeit und CZ = 100 eingeführt worden. Ein isomerer, stark verzweigter Kohlenwasserstoff - 2,2,4,4,6,8,8,-Heptamethylnonan (HMN; ebenfalls $C_{16}H_{34}$) - mit niedriger Zündwilligkeit und CZ = 15 ist die Referenzverbindung am unteren Ende der Cetanskala. Folglich beeinflussen Kettenlänge und Verzweigungsgrad die CZ, wobei die CZ mit abnehmender Kettenlänge und zunehmender Verzweigung abnimmt. Aromatische Verbindungen, die in konventionellem Dieselkraftstoff auftreten, weisen niedrige CZ auf. Allerdings nehmen ihre CZ mit zunehmender Länge von Alkylseitenketten zu (Puckett und Caudle, 1948; Clothier et al., 1993). Die Cetanskala ist willkürlich und es gibt Verbindungen mit CZ > 100 (obwohl die Cetanskala keine Verbindungen mit CZ > 100 vorsieht) oder CZ < 15. Die ASTM Norm für konventionellen Dieselkraftstoff (ASTM D975) schreibt ein Minimum von CZ = 40 vor, während die deutsche Norm DIN EN 590 eine Mindestcetanzahl von 51 vorsieht.

Höhere Cetanzahlen sind mit reduzierten Stickoxid (NO_x) Emissionen in Verbindung gebracht worden (Ladommatos et al., 1996). Dieser Zusammenhang hat zu Bemühungen geführt, die CZ von Biodieselkraftstoffen zu verbessern (Knothe und Dunn, 2001), meist durch Additive, die als Cetanzahlverbesserer bezeichnet werden. Die Bedeutung liegt darin, dass NO_x- Emissionen durch den Betrieb eines Motors mit Biodiesel in der Regel etwas erhöht werden (Knothe und Dunn, 2001; Krahl et al., 1996). Gesetzgebung und daraus resultierende Vorschriften erfordern jedoch eine Reduzierung der NO_x-Emissionen, da sie zur Bildung des Ozons, was eine wesentliche Komponente des Smogs ist, beitragen. Eine Arbeit (McCormick et al., 2001) untersucht den Zusammenhang zwischen Struktur und Emissionen, wobei auch die Emissionen angereichter individueller Fettsäurealkylester untersucht wurden. Dabei wurde berichtet, dass NO_x-Emissionen mit abnehmendem Sättigungsgrad und abnehmender Kettenlänge zunehmen, wodurch auch ein Zusammenhang mit den CZ dieser Substanzen hergestellt werden kann. Es wird berichtet, dass Partikelemissionen (PM) hingegen kaum von den vorgenannten Strukturfaktoren beeinflusst werden.

Jedoch wird der Zusammenhang zwischen CZ und Emissionen durch viele Faktoren kompliziert, wobei Motorentechnik einer dieser Faktoren ist. Ältere Motoren mit niedrigem Einspritzdruck reagieren empfindlich auf die CZ. Höhere CZ führen zu erheblichen Reduzierungen der NO_x-Emissionen aufgrund höherer Zündwilligkeit und den sich daraus ergebenden, im Schnitt reduzierten Verbrennungstemperaturen. Modernere Motoren, die mit Einspritzsystemen ausgerüstet sind, die die Einspritzrate kontrollieren,

reagieren wenig empfindlich auf die CZ, was in neuerer Literatur nachgewiesen wird (Mason et al., 2001; Matheaus et al., 2001; Sobotowski et al., 2001).

Die ersten Versuche zur CZ-Bestimmung von Biodiesel wurden mit Ethylestern des Palmöls durchgeführt (van den Abeele, 1942; Knothe, 2001), die eine hohe CZ aufwiesen. Dieses Ergebnis wurde in späteren Untersuchungen sowohl mit anderen Dieselkraftstoffen auf Pflanzenölbasis als auch einzelnen Fettverbindungen bestätigt. Der Struktureinfluss der Fettverbindungen auf die CZ ist unter den hier erwähnten Aspekten in der Literatur diskutiert worden (Harrington, 1986). Die dort gemachten Voraussagen wurden in praktischen Versuchen zur CZ-Bestimmung bestätigt (Klopfenstein, 1985; Freedman et al., 1990; Knothe et al., 1997, Knothe et al., 2002). Die CZ verschiedener Fettsäuren und deren Ester sind in Tabelle 2 aufgeführt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die CZ mit abnehmendem Sättigungsgrad und mit zunehmender Kettenlänge zunehmen, d.h. ununterbrochenen CH_2-Einheiten. Kürzlich ist jedoch gezeigt worden, dass verzweigte Ester, die mit Alkoholen wie *iso*-Propanol gewonnen werden, CZ aufweisen, die denen der Methylester oder anderer geradkettiger Alkylester vergleichbar sind (Zhang und Van Gerpen, 1996; Knothe et al., 2002). Deshalb genügt eine lange gerade Kette um eine hohe CZ zu bewirken, auch wenn die andere Einheit des Esters verzweigt ist. Diese Aussage müsste noch für die Ester verzweigter Säuren mit langkettigen, unverzweigten Alkoholen bestätigt werden. Verzweigte Ester sind deshalb interessant, weil sie verbesserte Tieftemperatureigenschaften im Vergleich zu den Methylestern aufweisen.

Wegen der hohen, in manchen Fällen die CZ-Skala übersteigenden CZ vieler Fettverbindungen (siehe beispielsweise Stearinsäuremethylester in Tabelle 2 sowie Abbildung 1), insbesondere der gesättigten Art, ist der Begriff "lipid combustion quality number" vorgeschlagen worden (Freedman et al., 1990).

Kürzlich wurden CZ-Bestimmungen unter Verwendung eines "Ignition Quality Tester™" (IQT™) durchgeführt (Knothe et al., 2002). Der IQT™ ist eine automatisierte Weiterentwicklung des "constant volume combustion apparatus" (CVCA) (Ryan und Stapper, 1987; Aradi und Ryan, 1995). Der CVCA wurde ursprünglich entwickelt um CZ schneller, mit verbesserter Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, geringerem experimentellem Aufwand, reduziertem Materialbedarf und deshalb kostengünstiger zu bestimmen als mit der Norm ASTM D613, die einen Cetanmotor verwendet. Die IQT™-Methode, die sich in den ersten Stufen der Kommerzialisierung befindet und in eine ASTM-Methode entwickelt wird, ist reproduzierbar und die Ergebnisse vergleichbar oder sogar zuverlässiger als die mit ASTM D613 erhaltenen. Einige Ergebnisse der CZ-Bestimmungen mit der IQT™-Methode (Knothe et al., 2002) sind in Tabelle 2 eingebaut.

Über eine kinetische Gleichung, die CZ und Zündwilligkeit verbindet, ist in der Literatur berichtet worden (Van Gerpen, 1999). Der Zusammenhang zwischen CZ und Zündverzug ("ignition delay" = ID) für den IQT™ ist gegeben durch die folgende Gleichung:

$$CZ = 83.99\ x\ (ID - 1.512)^{-0.658} + 3.547 \qquad (1)$$

Abbildung 1 (der Literatur Knothe 2002 entnommen) stellt die Abhängigkeit der CZ vom Zündverzug (Zündverzögerungszeiten) für Fettsäurester graphisch dar.

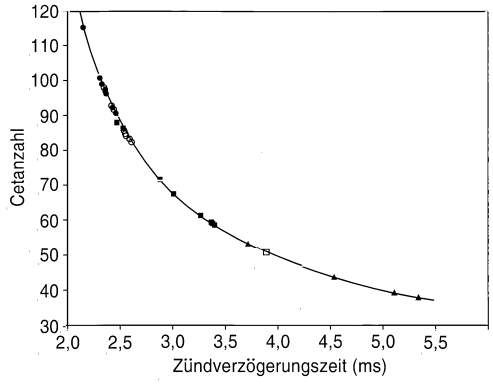


Abbildung 1:
Abhängigkeit der CZ vom Zündverzug (Zündverzögerungszeiten) von Fettsäurealkylestern

Allgemein weisen die Ergebnisse der CZ-Bestimmungen in verschiedenen Versuchsreihen bessere Übereinstimmung für die ungesättigten Fettverbindungen auf. Gleichung (1), die einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen CZ und Zündverzug aufzeigt, liefert die Begründung hierfür. Über das nichtlineare Verhältnis zwischen Zündwilligkeit und CZ wurde bereits berichtet (Allard et al., 1996). Demnach verursachen kleine Unterschiede bei kürzeren Zündverzögerungszeiten größere Unterschiede in der CZ als bei längeren Zündverzögerungszeiten. Dieser Zusammenhang könnte einen Abflachungseffekt bezüglich Emissionen wie NO_x andeuten, wenn ein bestimmter Zündverzögerungsbereich mit entsprechender CZ erreicht ist. Dieser Aspekt muss jedoch für neuere Motoren, wie oben diskutiert, modifiziert werden. Weitere Einzelheiten werden in der Literatur diskutiert (Allard et al., 1996, 1997, 1999, 2001).

3.2 Tieftemperatureigenschaften

Ein weiteres wichtiges Problem bei der Verwendung von Biodiesel ist das der Tieftemperatureigenschaften. Die verbesserungsbedürftigen Eigenschaften des Biodiesels bei tiefen Temperaturen finden ihren Ausdruck in relativ hohen Trübungs- und Fließpunkten (engl. "cloud point, CP, und "pour point", PP; siehe Tabelle 1). Die hohen CP- und PP-Werte rühren daher, dass Pflanzenöle und Tierfette sowie deren Alkylester Gemische verschiedener Fettverbindungen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften sind. Beispielsweise haben gesättigte Fettsäuren und ihre Alkylester wesentlich höhere Schmelzpunkte als ungesättigte Fettsäuren und -alkylester (Tabelle 2) und in einem Gemisch kristallisieren sie deshalb bei höherer Temperatur aus. Der CP, der gewöhnlicherweise bei einer höheren Temperatur als der PP auftritt, ist jene Temperatur bei der sich die Fettprobe trübt auf Grund der Bildung von Kristallen und der Verfestigung der gesättigten Verbindungen. Die festen Stoffe und Kristalle wachsen rasch, was zu einer Verstopfung der Kraftstoffzufuhr und -filter führt und somit schwere Betriebsstörungen verursacht. Bei weiter abnehmenden Temperaturen fallen immer mehr Feststoffe aus und das Material erreicht schließlich den PP, bei dem es dann nicht mehr fließfähig ist.

Tabelle 1:
Kraftstoffspezifische Eigenschaften der Ester von Pflanzenölen und Tierfetten.[a]

Ester	CZ	HG (kJ/kg)	Kinem. Viskosität (mm^2/s)	CP (°C)	PP (°C)
Methyl					
Baumwollsamen	51,2	-	6,8 (21°)	-	-4
Raps	54,4	40449	6,7 (40°)	-2	-9
Saflor	49,8	40060	-		-6
Soja	46,2	39800	4,08 (40°)	2	-1
Sonnenblume	46,6	39800	4,22 (40°)	0	-4
Rindertalg	-	39949	4,11 (40°)	12	9
Ethyl					
Palm	56,2	39070	4,5 (37,8°)	8	6
Soja	48,2	40000	4,41 (40°)	1	-4
Rindertalg				15	12
Propyl					
Rindertalg				17	12
Isopropyl					
Soja	52,6[j]			-9[k]	-12
Rindertalg				8	0
n-Butyl					
Soja	51,7	40700	5,24 (40°)	-3	-7
Rindertalg				13	9
2-Butyl					
Soja				-12	-15
Rindertalg				9	0

a) Daten in dieser Tabelle der Literatur entnommen (Knothe und Dunn, 2001; und darin angegebene Literatur). Abkürzungen: CZ = Cetanzahl; CP = cloud point (Trübungspunkt), PP = pour point (Fließpunkt).

Neben CP (ASTM D2500) und PP (ASTM D97) gibt es zwei Testmethoden, um die Tieftemperatureigenschaften herkömmlicher Dieselkraftstoffe zu untersuchen, nämlich den "low-temperature flow test" (LTFT; wird in Nordamerika angewendet; ASTM D4539) und "cold filter plugging point" (CFPP; wird außerhalb Nordamerikas angewandt). Diese Untersuchungsmethoden sind auch auf Biodiesel und dessen Gemische mit herkömmlichen Dieselkraftstoffen angewandt worden. Die Filtrierbarkeitstests sind notwendig, da sie mit Betriebsbedingungen besser übereinstimmen als CP und PP (Owen und Coley, 1995). Weitere Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass für Kraftstoffformulierungen, die mindestens 10% Fettsäuremethylester enthalten, sowohl LTFT als auch CFPP lineare Funktionen des CP sind (Dunn und Bagby, 1995). Zusätzliche statistische Auswertungen zeigten eine starke lineare (1:1) Korrelation zwischen LTFT und CP auf (Dunn und Bagby, 1995).

Mehrere Herangehensweisen an das Problem der Tieftemperatureigenschaften des Biodiesels sind untersucht worden, darunter Vermischen mit herkömmlichem Dieselkraftstoff, Winterisierung, Additive, verzweigte Ester und große Substituenten in der Kohlenwasserstoffkette. Die letzten beiden Herangehensweisen können auch als Variation der Additive angesehen werden, da die entsprechenden Verbindungen im Biodiesel auch als Additive untersucht worden sind. Das Vermischen von Estern mit herkömmlichem Dieselkraftstoff wird hier nicht weiter diskutiert.

Zahlreiche Additive, gewöhnlicherweise Polymere, sind hergestellt worden und hauptsächlich in der Patentliteratur berichtet worden. Diese Substanzen erniedrigen angeblich den PP und gelegentlich den CP. Ein kurze Übersicht über solche Polymere kann in der Literatur (Knothe und Dunn, 2001) gefunden werden. Unter Anwendung eines verwandten Konzepts wurden Verbindungen mit großen Einheiten in

der Kette als Additive untersucht (Knothe und Dunn, 2000). Das Konzept ist, dass die großen Einheiten die Harmonie der auskristallisierenden Feststoffe zerstören würde. Der nützliche Effekt mancher Additive erscheint jedoch begrenzt, da sie den PP stärker beeinflussen als den CP oder sie hatten nur wenig Einfluss auf den CP. Der CP ist jedoch wichtiger als der PP wenn die Verbesserung der Tieftemperatureigenschaften angestrebt wird (Dunn et al., 1996).

Die Verwendung verzweigter Ester, beispielsweise der *iso*-Propyl-, *iso*-Butyl- oder 2-Butylester, ist ein vielversprechendes Konzept (Lee et al., 1995; Foglia et al., 1997). Solche Ester haben niedrigere Schmelzpunkte als die Methylester (Tabelle 2). Die verzweigten Ester weisen einen erniedrigten Kristallisationsbeginn (engl. "crystallization onset temperature"; T_{co}) auf, der bei den *iso*-Propylestern des Sojas um 7 bis 11 °C und bei den 2-Butylestern des Sojas um 12 bis 14 °C unter dem der Methylester lag, wie durch "Differential Scanning Calorimetry" (DSC) nachgewiesen wurde (Lee et al., 1995). Sowohl CP als auch PP wurden durch die verzweigten Ester erniedrigt. Beispielsweise wurde als CP des *iso*-Propylesters des Soja –9 °C angegeben (Zhang und Van Gerpen, 1996], während der des 2-Butylesters als –12 °C ermittelt wurde (Lee et al., 1995). Der CP des Sojamethylesters zum Vergleich ist 0 °C (Dunn und Bagby, 1995). Unter ökonomischen Gesichtspunkten erscheinen jedoch nur die *iso*-Propylester attraktiv, obwohl auch diese teurer sind als Methylester. Die Verzweigung des Esters hat keinen negativen Einfluss auf die CZ dieser Verbindungen, wie bereits oben diskutiert wurde.

Tabelle 2:
Ausgewählte Eigenschaften einiger Fettsäuren und Ester.[a)]

Trivial- (Systematischer) name; Abkürzung[b)]	MG	Smp. (°C)	Sdp. (°C)	Viskosität (mPa s = cP)	Cetanzahl	Verbrennungswärme[d] (kg-cal/mol)
Säuren						
Capryl- (Octan-); 8:0	144,22	16,5	239,3			
Caprin- (Decan-); 10:0	172,27	31,5	270		47,6 (98,0)[d]	1453,07 (25°)
Laurin- (Dodecan-); 12:0	200,32	44	131[1]			1763,25 (25°)
Myristin- (Tetradecan-); 14:0	228,38	58	250,5[100]			2073,91 (25°)
Palmitin- (Hexadecan-); 16:0	256,43	63	350			2384,76 (25°)
Stearin- (Octadecan-); 18:0	284,48	71	360d		61,7[f]	2696,12 (25°)
Öl- (9(Z)-Octadecen-); 18:1	282,47	16	286[100]		46,1[f]	2657,4 (25°)
Linol- (9Z,12Z-Octadecadien-); 18:2	280,45	-5	229-30[16]		31,4[f]	
Linolen- (9Z,12Z,15Z-Octadecatrien-); 18:3	278,44	-11	230-2[17]		20,4[f]	
Eruca- (13Z-Docosen-); 22:1	338,58	33-4	265[15]			
Methylester						
8:0	158,24	...	193	1,01	33,6 (98,6)[d]	1313
10:0	186,30	...	224	1,47	47,7 (98,0)[d]	1625
12:0	214,35	5	266[766]	1,98	61,4 (99,1)[d]	1940
14:0	242,41	18,5	295[751]	2,81	66,2 (96,.5)[d]	2254
16:0	270,46	30,5	415-8[747]	3,76	74,5 (93,6)[d]; 85,9[g]	2550

Trivial- (Systematischer) name; Abkürzung[b)]	MG	Smp. (°C)	Sdp. (°C)	Viskosität (mPa s = cP)	Cetanzahl	Verbrennungs-wärme[d] (kg-cal/mol)
18:0	298,51	39,1	442-3[747]	4,88	86,9 (92,1)[d]; 101[g]	2859
18:1 Δ9*Z*	296,49	-20	218.5[20]	3,87	55[f]; 59,3[g]	2828
18:2 Δ9*Z*, Δ12*Z*	294,48	-35	215[20]	3,17	42,2[f]; 38,2[g]	2794
18:3 Δ9*Z*, Δ12*Z*, Δ15*Z*	292,46	-57	109[0.018]	2,84	20,6[e]; 22,7[f]	2750
22:1 Δ13*Z*	352,60	-52 ...	221-2[5]	6,27	76,0	3454
Ethylester						
8:0	172,27	-43,1	208.5; 104[80]			
10:0	200,32	-20	243-5; 122-4[13]		51,2 (99,4)[d]	
12:0	228,37	-1,8fr	163[25]			
14:0	256,43	12,3	295; 139[4]		66,9 (99,3)[d]	
16:0	284,48	19,3 (β)-24 (α)	191[10]		93,1[g]	
18:0	312,535	31-33,4	199[10]		76,8[f]; 97,7[g]	
18:1Δ9*Z*	310,52		216-7[151]		53,9[f]; 67,8[g]	
18:2 Δ9*Z*, Δ12*Z*	308,50		270-5[180]		37,1[f]; 39,6[g]	
18:3 Δ9*Z*, Δ12*Z*, Δ15*Z*	306,49		175[2.5] 174[2.5]		26,7	
22:1Δ13*Z*			229-30[5]			
Propyl						
16:0		20,4	190[12]		85,0[g]	
18:0					69,9; 90,9[g]	
Δ9*Z*					55,7; 58,8[g]	
Δ9*Z*, Δ12*Z*					40,6; 44,0[g]	
Δ9*Z*, Δ12*Z*, Δ15*Z*					26,8[f]	
Iso-Propyl						
16:0		13-4	160[2]		82,6[g]	
18:0					96,5[g]	
18:1 Δ9*Z*					86,6[g]	

Butyl						
16:0		16,9			91,9[g]	
18:0		27,5	343, 223[15]		80,1; 92,5[g]	
18:1 Δ9*Z*					59,8; 61,6[g]	
18:2 Δ9*Z*, Δ12*Z*					41,6; 53,5[g]	
18:3 Δ9*Z*, Δ12*Z*, Δ15*Z*					28,6[f]	
2-Butyl						
16:0					84,8[g]	
18:0					97,5[g]	
18:1 Δ9*Z*					71,9[g]	
Iso-Butyl						
16:0		22,5; 28,9	199[5]		83,6[g]	
18:0					99,3[g]	
18:1 Δ9*Z*					59,6[g]	

a) Daten in dieser Tabelle der Literatur entnommen (Knothe und Dunn, 2001; und darin angegebene Literatur). Abkürzungen: CP = Trübungspunkt (cloud point); CZ = Cetanzahl; MG = Molekulargewicht; PP = Fließpunkt (pour point), Sdp. = Siedepunkt; Smp. = Schmelzpunkt,. Weitere Daten aus Allen et al. (1999) und Knothe et al. (2002). b) Die Zahlen geben die Anzahl Kohlenstoffatome und Doppelbindungen an. Beispielsweise, für Ölsäure kann C18:1 geschrieben werden (18 = Anzahl C-Atome; 1 = Anzahl Doppelbindungen). c) Druck (mm Hg) bei dem der Siedepunkt bestimmt wurde. d) Zahlen in Klammern geben die Reinheit der für die CZ-Bestimmungen verwendeten Ester an (Angaben des Autors; Klopfenstein,1985). e) CZ aus Harrington (1986). f) CZ aus Knothe (1997). g) CZ aus Knothe (2002).

Die Winterisierungsmethode (Dunn et al., 1996; Dunn et al., 1997; Lee et al., 1996) basiert auf der Tatsache, dass ungesättigte Fettverbindungen niedrigere Schmelzpunkte besitzen als gesättigte Verbindungen. (Tabelle 2). In diesem Verfahren werden durch Abkühlung der Pflanzenölester gebildete Feststoffe abfiltriert, dabei zurücklassend ein Gemisch mit höherem Anteil an ungesättigten Fettsäureestern und somit abgesenktem CP und PP. Dieses Verfahren kann solange wiederholt werden, bis die gewünschten CP-Werte erreicht werden. Gesättigte Fettverbindungen, die höhere CZ aufweisen, sind die durch Winterisierung am meisten entfernten Komponenten. Folglich wird die CZ des Biodiesels durch Winterisierung reduziert. Winterisierung wurde auch in Gegenwart von Additiven oder Lösungsmitteln wie Hexan oder *iso*-Propanol durchgeführt, was den Materialverlust während des Winterisierungsvorgangs reduziert (Dunn et al. 1997).

Eine andere Arbeit (Stournas et al., 1995) berichtet, dass tertiäre fettige Amine und Amide die Zündwilligkeit des Biodiesels verbessern, ohne die Tieftemperatureigenschaften negativ zu beeinflussen. Gesättigte Fettalkohole mit Kettenlängen ≥ C_{12} führten zu eines starken Erhöhung des PP. Ethyllaurat senkte den PP geringfügig.

3.3 Oxidationsstabilität

Die Oxidationsstabilität des Biodiesels ist Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen (Bondioli et al., 1995; Bondioli und Folegatti, 1996; Canakci et al., 1999; Du Plessis 1982, Du Plessis, 1985 et al.; Simkovsky und Ecker, 1998; Simkovsky und Ecker, 1999; Thompson et al., 1998). Biodiesel ist von diesem Problem hauptsächlich während der Lagerung betroffen. Ohne hier auf weitere Einzelheiten einzugehen, wird in der obengenannten Literatur der Einfluss solcher Faktoren wie Gegenwart von Luft, Metallspuren, Antioxidantien, und Peroxide als auch Temperatur und Art des Behälters untersucht.

Der Grund für die Autoxidation ist die Gegenwart von Doppelbindungen in vielen Fettverbindungen. Die Autoxidation ungesättigter Fettverbindungen verläuft mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Anzahl und Position der Doppelbin-

dungen (Frankel, 1998). Besonders die Positionen neben den Doppelbindungen - die allylischen Positionen - neigen zur Autoxidation. Jedoch sind die *bis*-allylischen Stellungen in häufig vorkommenden Fettsäuren wie Linolsäure (Doppelbindungen bei C-9 und C-12, eine *bis*-allylischen Position bei C-11 ergebend) und Linolensäure (Doppelbindungen bei C-9, C-12 und C-15, zwei *bis*-allylische Positionen bei C-11 und C-14 ergebend) noch autoxidationsanfälliger. In der Literatur (Frankel, 1998) angegebene relative Oxidationsraten sind 1 für Ölsäureester (Methyl-, Ethylester), 41 für Linolsäureester und 98 für Linolensäureester. Dies ist wichtig, da die meisten Biodieselkraftstoffe erhebliche Mengen an Estern der Öl-, Linol- und/oder der Linolensäure enthalten, die die Oxidationsstabilität beeinflussen.

3.4 Viskosität

Die Viskositäten von Biodiesel bzw. Gemischen von Fettsäureestern sind aus den Viskositätsdaten der einzelnen Verbindungen mittels einer logarithmischen Gleichung vorhergesagt worden (Allen et al., 1999). Die Viskosität nimmt mit zunehmendem Unsättigungsgrad ab und nimmt mit zunehmender Kettenlänge zu. Dies trifft auch auf die Alkoholeinheit in Fettsäureestern zu, denn die Viskosität der Ethylester ist etwas höher als die der Methylester. Beispielsweise ist die Viskosität des Decansäuremethylesters als 1.47, die des Palmitinsäuremethylesters als 3.76, die des Stearinsäuremethylesters als 4.88 und die des Ölsäuremethylesters als 3.87 mPa s angegeben (Dabei gilt mPa s = 1 cP; die literaturentnommenen Viskositätswerte in Tabelle 2 sind demgemäß angegeben. In Tabelle 1 sind literaturentnommene Viskositätswerte in mm^2/s angegeben. Die absolute Viskositäten in Tabelle 2 und kinematischen Viskositäten in Tabelle 1 sind über die Dichte miteinander verbunden. Die Dichte von Fettsäurealkylestern liegt in der Regel bei ca. 0,85 bis 0,90).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die obigen Ergebnisse und die Diskussion zeigen, dass die Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels stark von den Eigenschaften der einzelnen Fettester im Biodiesel beeinflusst werden. Beide Struktureinheiten, die der Fettsäuren und die der Alkohole, beeinflussen in erheblichem Maße Kraftstoffeigenschaften wie Cetanzahl und damit verbundener Kraftstoffverbrennung sowie Emissionen, Kälteverhalten, Oxidationsstabilität und Viskosität. Es erscheint daher sinnvoll, einen (oder mehrere) Fettester mit günstigen Eigenschaften im Biodiesel anzureichern um die Eigenschaften des ganzen Kraftstoffs zu verbessern. Beispielsweise scheinen *iso*-Propylester bessere Kraftstoffeigenschaften aufzuweisen als Methylester. Der Hauptnachteil ist der höhere Preis des dafür benötigten *iso*-Propanols im Vergleich zu Methanol, neben eventueller Modifikationen für das Umesterungsverfahren. Ähnliche Betrachtungen sind auch für die Fettsäureeinheit möglich, obwohl in diesem Falle die beste Möglichkeit weniger offensichtlich ist. Es erscheint dennoch möglich, dass in der Zukunft die Kraftstoffeigenschaften des Biodiesels verbessert werden können durch genetische Veränderung der zugrundeliegenden Pflanzenöle, die mit einer oder mehreren Fettsäuren mit günstigen Kraftstoffeigenschaften angereichert sind.

Literatur

Allard L N, Webster G D, Hole N J, Ryan T W III, Ott D, Fairbridge C W (1996) Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT). SAE Techn Pap Ser 961182.

Allard L N, Hole N J, Webster G D, Ryan T W III, Ott D, Beregszazy A, Fairbridge C W, Cooley J, Mitchell K, Richardson E K, Elliott N G, Rickeard D J (1997) Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT) - Part II. SAE Techn Pap Ser 971636 (in SAE Spec Publ SP-1277: Fuel Additives and Performance)

Allard L N, Webster G D, Ryan T W III, Baker G, Beregszaszy A, Fairbridge C W, Ecker A, Rath J, (1999) Analysis of the Ignition Behaviour of the ASTM D-613 Primary Reference Fuels and Full Boiling Range Diesel Fuels in the Ignition Quality Tester (IQT™) - Part III. SAE Techn Pap Ser 1999-01-3591 (in SAE Spec Publ SP-1479: Gasoline and Diesel Fuel: Performance and Additives)

Allard L N, Webster G D, Ryan T W III, Matheaus A C, Baker G, Beregszaszy A, Read H, Mortimer K, Jones G. (2001) Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester - Part IV. SAE Techn Pap Ser 2000-01-3527

Allen C A W, Watts K C, Ackman R G, Pegg M J (1999) Predicting the Viscosity of Biodiesel Fuels from Their Fatty Acid Ester Composition. Fuel 78, 1319-1326

Aradi A A, Ryan T W III (1995) Cetane Effect on Diesel Ignition Delay Times Measured in a Constant Volume Combustion Apparatus. SAE Techn Pap Ser 952352 (in SAE Spec Publ SP-1119: Emission Processes and Control Technologies in Diesel Engines, S. 43-56)

Bondioli P, Gasparoli A, Lanzani A, Fedeli E, Veronese S, Sala M (1995) Storage Stability of Biodiesel. J Am Oil Chem Soc 72, 699-702

Bondioli P, Folegatti L (1996) Evaluating the Oxidation Stability of Biodiesel. Riv Ital Sostanze Grasse 73, 349-353

Canakci M, Monyem A, Van Gerpen J (1999) Accelerated Oxidation Processes in Biodiesel. Trans. ASAE 42, 1565-1572

Clothier P Q E, Aguda B D, Moise A, Pritchard H (1993) How Do Diesel-fuel Ignition Improvers Work? Chem Soc Rev 22, 101-108

Dunn R O, Bagby M O (1995) Low-Temperature Properties of Triglyceride-Based Diesel Fuels: Transesterified Methyl Esters and Petroleum Middle Distillate / Ester Blends. J Am Oil Chem Soc 72, 895-904

Dunn R O, Shockley M W, Bagby M O (1996) Improving the Low-Temperature Properties of Alternative Diesel Fuels:

Vegetable Oil-Derived Methyl Esters. J Am. Oil Chem Soc 73, 1719-1728

Dunn R O, Shockley M W, Bagby M O (1997) Winterized Methyl Esters from Soybean Oil: An Alternative Diesel Fuel with Improved Low-Temperature Flow Properties. SAE Techn Pap Ser 971682 (in SAE Spec Publ SP-1274 Alternative Fuel Technologies: State of Alternative Fuel Technologies, S. 133-142

Dunn R O, Knothe G (2001) Alternative Diesel Fuels from Vegetable Oils and Animal Fats. J Oleo Sci 50(5): 415-426

Du Plessis L M (1982) Plant Oils as Diesel Fuel Extenders: Stability Tests and Specifications on Different Grades of Sunflower Seed and Soyabean Oils. CHEMSA 8, 150-154

Du Plessis L M, de Villiers J B M, van der Walt W H (1985) Stability Studies on Methyl and Ethyl Fatty Acid Esters of Sunflowerseed Oil. J Am Oil Chem Soc 62, 748-752

Foglia T A, Nelson L A, Dunn R O, Marmer W (1997) Low-Temperature Properties of Alkyl Esters of Tallow and Grease. J Am Oil Chem Soc 74(8): 951-955

Frankel E N (1998) "Lipid Oxidation", The Oily Press, Dundee, Scotland

Freedman B, Bagby M O, Callahan T J, Ryan T W III (1990) Cetane Numbers of Fatty Esters, Fatty Alcohols and Triglycerides Determined in a Constant Volume Combustion Bomb. SAE Technical Pap. Ser. 900343

Harrington K J (1986) Chemical and Physical Properties of Vegetable Oil Esters and Their Effect on Diesel Fuel Performance. Biomass 9(1): 1-17

Klopfenstein W E (1985) Effect of Molecular Weights of Fatty Acid Esters on Cetane Numbers as Diesel Fuels. J Am. Oil Chem Soc 62, 1029-1031

Knothe G, Bagby M O, Ryan T W III (1997) Cetane Numbers of Fatty Compounds: Influence of Compound Structure and of Various Potential Cetane Improvers. SAE Techn Pap Ser 971681 (in SAE Spec. Publ. SP-1274: State of Alternative Fuel Technologies, S. 127-132

Knothe G, Dunn, R O, Shockley M W, Bagby M O (2000) Synthesis and Characterization of Some Long-Chain Diesters with Branched or Bulky Moieties. J Am Oil Chem Soc 77, 865-871

Knothe G, Dunn R O (2001) Biofuels Derived from Vegetable Oils and Fats. In: Gunstone FD, Hamilton RJ (Hrsgb.), Oleochemical Manufacture and Applications, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, S. 106-163

Knothe G (2001) Historical Perspectives on Vegetable Oil-Based Diesel Fuels. INFORM 12(11):1103-1107

Knothe G, Matheaus A C, Ryan T W III (2002) Cetane Numbers of Branched and Straight-Chain Fatty Esters Determined in an Ignition Quality Tester. Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht

Krahl J, Munack A, Bahadir M, Schumacher L, Elser N (1996) Review: Utilization of Rapeseed Oil, Rapeseed Oil Methyl Ester or Diesel Fuel: Exhaust Gas Emissions and Estimation of Environmental Effects. *SAE Techn. Pap. Ser.* 962096

Ladommatos N, Parsi M, Knowles A (1996) The Effect of Fuel Cetane Improver on Diesel Pollutant Emissions. Fuel 75(1): 8-14

Lee I, Johnson L A, Hammond E G (1995) Use of Branched-Chain Esters to Reduce the Crystallization Temperature of Biodiesel. J Am Oil Chem Soc 72(10): 1155-1160

Lee I, Johnson L A, Hammond E G (1996) Reducing the Crystallization Temperature of Biodiesel by Winterizing Methyl Soyate. J Am Oil Chem Soc 73, 631-636

Mason R L, Matheaus A C, Ryan T W III, Sobotowski, R A, Wall J C, Hobbs C H, Passavant G W, Bond T J (2001) EPA HDEWG Program - Statistical Analysis, SAE Techn Pap Ser 2001-01-1859 (in SAE Spec. Publ. SP-1551: Diesel and Gasoline Performance and Additives)

Matheaus A C, Neely G D, Ryan T W III, Sobotowski R A, Wall J C, Hobbs C H, Passavant G W, Bond T J (2001) EPA HDEWG Program - Engine Test Results, SAE Paper 2001-01-1858, also published in Diesel and Gasoline Performance and Additives (SAE Special Publication SP-1551)

McCormick R L, Graboski M S, Alleman T L, Herring A M (2001) Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emissions of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine. Environ. Sci. Technol. 35, 1742-1747

Owen K, Coley T (1995) Automotive Fuels Reference Book, 2. Ausgabe, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA

Puckett A D, Caudle B H (1948) Ignition Qualities of Hydrocarbons in the Diesel Fuel Boiling Range. U S Bur Mines, Inform Circ. No. 7474

Ryan TW III, Stapper B (1987) Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in a Constant Volume Combustion Bomb. SAE Techn Pap Ser 870586

Simkovsky N M, Ecker A (1998) Influence of Light and Tocopherol Content on the Oxidative Stability of Fatty Acid Methyl Esters. Fett/Lipid, 100, 534-538

Simkovsky N M, Ecker A (1999) Effect of Antioxidants on the Oxidative Stability of Rapeseed Oil Methyl Esters. Erdoel, Erdgas, Kohle, 115, 317-318

Sobotowski R A, Wall J C, Hobbs C H, Matheaus A C, Mason R L, Ryan T W III, Passavant G W, Bond T J (2001) EPA HDEWG Program - Test Fuel Development, SAE Techn Pap Ser 2001-01-1857 (in SAE Spec Publ SP-1551: Diesel and Gasoline Performance and Additives)

Stournas S, Lois E, Serdari A (1995) Effects of Fatty Acid Derivatives on the Ignition Quality and Cold Flow of Diesel Fuel. J Am Oil Chem Soc 72, 433-437

Thompson J C, Peterson C L, Reece D L, Beck S M (1998) Two-Year Storage Study with Methyl and Ethyl Esters of Rapeseed. Trans. ASAE, 41, 931-939

van den Abeele M (1942) L'Huile de Palme. Matière première pour la préparation d'un carburant lourd utilisable dans les moteurs à combustion interne. Bull Agr Congo Belge 33(1): 3-90

Van Gerpen J (1999) Diesel Combustion and Fuels. In: Diesel Engine Reference Book, Challen B, Baranescu R, Hrsgb., Society of Automotive Engineers, 1999, S. 91-92

Zhang Y, Van Gerpen J H (1996) Combustion Analysis of Esters of Soybean Oil in a Diesel Engine. SAE Techn. Pap. Ser. 960765 (in SAE Spec. Publ. SP-1160: Performance of Alternative Fuels for SI and CI Engines, S. 1-15)

Stabilität von Biodiesel - biostab

Heinrich Prankl[1]

Zusammenfassung

Normierung und Qualitätsmanagement sind einer der Schlüsselfaktoren um Biodiesel als neuen Kraftstoff für Dieselmotoren und als Heizöl erfolgreich am Markt zu etablieren. Im Jahr 1997 hat die Europäische Kommission dem Europäischen Normungsinstitut CEN den Auftrag erteilt, Mindestanforderungen und die entsprechenden Bestimmungsnormen für die Verwendung von Biodiesel zu erarbeiten. Im Jahr 2001 wurden 2 Entwürfe präsentiert. Es wurde jedoch festgestellt, dass in einem Parameter, nämlich der Kraftstoffstabilität, noch zu wenig Wissen vorliegt und deshalb detaillierte Forschungsarbeit notwendig ist. Im vorliegenden Projekt werden alle relevanten Fragen der Stabilität von Biodiesel behandelt. Es werden geeignete Untersuchungsmethoden für die Bestimmung der Oxidations-, der thermischen und der Lagerungsstabilität überprüft bzw. entwickelt. Der Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Qualitätseigenschaften von Biodiesel sowie die Wirkung von natürlichen und von synthetischen Antioxidantien werden untersucht. In einem umfangreichen Testprogramm, das Prüfstandsläufe und Praxistests umfasst, werden die Auswirkungen der Stabilität auf Einspritzsysteme und Heizungssysteme untersucht.

Das Projekt "Stability of Biodiesel" (BIOSTAB) wird von der Europäischen Kommission im Rahmen des "Quality-of-Life-Programms" gefördert (Projektsnummer: QLK5-2000-00533). Die Laufzeit beträgt März 2001 bis August 2003.

Schlüsselwörter: Biodiesel, Normierung, Oxidation, Stabilität

1 Hintergrund

Biodiesel kann sehr wesentlich zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen beitragen und damit die Sicherheit der Energieversorgung erhöhen. Flüssige Biokraftstoffe sind die einzige Alternative im Transportkraftstoffbereich, die innerhalb einer kurzen Zeit und in entsprechenden Mengen umgesetzt werden kann. Nachwachsende Rohstoffe stellen einen wichtigen Absatzmarkt für die Landwirtschaft dar. Biodiesel wurde in der letzten Dekade bereits in industriellem Maßstab produziert und zwar hauptsächlich in Deutschland, Frankreich, Italien und Österreich. Die gesamte Produktionsmenge wird in Europa demnächst 1 Million Tonnen überschreiten. Dafür wird eine Fläche von 1 Million Hektar benötigt. Der Biodieselmarkt bietet eine enorme Aufnahmefähigkeit für die zusätzlichen Flächen, die durch die neuen Mitgliedsstaaten verfügbar werden.

Die Europäische Kommission hat sich selbst das ehrgeizige Ziel gesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energie bis zum Jahr 2010 auf 12% zu erhöhen. Mittel und Wege, wie z.B. die Schaffung entsprechend günstiger Rahmenbedingungen für erneuerbare Energiequellen, sind im Weißbuch der Erneuerbaren Energie zusammengefasst [1].

In der "Kampagne für den Durchbruch" [2] 1999-2003 werden Maßnahmen zur gezielten Förderung verschiedener Schlüsselbereiche vorgeschlagen, wie z.B. "5 Millionen Tonnen flüssige Biokraftstoffe". Weiters wird vorgeschlagen, innerhalb des Binnenmarktes europäische Normen zu technischen Anlagen für erneuerbare Energieträger zu entwickeln. Dadurch sollen einheitliche, EU-weite Rahmenbedingungen für den Ausbau der EU-Industrie für erneuerbare Energieträger geschaffen werden.

Im Jahr 1997 hat die Europäische Kommission dem CEN (Europäisches Komitee für Normung) den Auftrag erteilt, Mindestanforderungen einschließlich Prüfmethoden für Biodiesel als Kraftstoff für Dieselmotoren und zur Raumheizung zu erarbeiten [3]. Die vorgeschlagenen Normen unterstützen die Ziele der Europäischen Gemeinschaft zum freien Handel von Biodiesel und sind Basis für die Gewährung von Garantieleistungen der Fahrzeug- und Heizungshersteller. 2001 wurden zwei Entwürfe präsentiert und in einem öffentlichen Begutachtungsverfahren behandelt:

[1] BLT – Bundesanstalt für Landtechnik, Rottenhauser Strasse 1, A 3250 Wieselburg, AUSTRIA; E-mail: heinrich.prankl@blt.bmlf.gv.at

- prEN14213: Heizöle – Fettsäure-Methylester (FAME) – Anforderungen und Prüfverfahren.
- prEN14214: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren – Anforderungen und Prüfverfahren.

Im Entwurfsverfahren wurde dem Parameter "Stabilität" eine große Bedeutung zugemessen, jedoch festgestellt, dass dafür noch unzureichendes Wissen vorliegt. Entsprechende Forschungsarbeiten seien notwendig, um verbindliche Grenzwerte für die Bereiche "Lagerungsstabilität" und "thermische Stabilität" festlegen zu können.

2 Projektziele

Ziel des Projekts ist die Erarbeitung klarer Kriterien und entsprechender analytischer Methoden zur Bestimmung der Stabilität von Biodiesel. Die Ziele im Detail:

1. Entwicklung und Überprüfung von Labormethoden zur Untersuchung der Stabilität
2. Klärung der Auswirkung von Lagerungsbedingungen auf die Qualität von Biodiesel
3. Empfehlungen für die Verwendung von natürlichen und/oder synthetischen Antioxidantien
4. Untersuchung der Auswirkungen der Kraftstoffstabilität auf Einspritzsysteme und auf Heizölbrenner.

3 Projektpartner

Im Projekt sind neun Partner aus Industrie und Forschung involviert. Das Team besitzt umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Analytik, Forschung und Anwendung von Biodiesel und verleiht dem Projekt die notwendige europaweite Dimension:

- BLT – Bundesanstalt für Landtechnik, Österreich (Projektkoordinator; Kontakt: DI Heinrich PRANKL)
- ITERG - Institut des Corps Gras, Pessac, Frankreich (Kontakt: Dr. Florence LACOSTE)
- SSOG – Stazione Sperimentale Oli e Grassi - Technology Department, Milan, Italien (Kontakt: Dr. Paolo BONDIOLI)
- IFC Graz – Institut für Chemie, Karl-Franzens-Universität Graz, Österreich (Kontakt: Prof. Dr. Martin MITTELBACH)
- TUG – Technische Universität Graz, Österreich (Kontakt: DI Jürgen BLASSNEGGER)
- OMV AG, Wien, Österreich (Kontakt: Dr. Thomas BREHMER)
- TEAGASC, Oak Park Research Centre, Carlow, Irland (Kontakt: Dr. Andreas FRÖHLICH)
- NOVAOL, Paris, France / NOVAOL Österreich (Kontakt: Bertrand DUFRENOY / Martin DUSEK)
- OLC - Ölmühle Leer Connemann, Deutschland (Kontakt: Dr. Jürgen FISCHER)

Sieben der neun Partner (BLT, ITERG, SSOG, Uni Graz, OMV, Novaol and OLC) sind Mitglieder der entsprechenden Arbeitsgruppen bei der Normierung von Biodiesel im CEN.

4 Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in 4 thematische Arbeitspakete (work packages – WP) unterteilt. Für jedes WP ist ein Leiter für die wissenschaftliche Koordinierung unter den einzelnen Partnern verantwortlich. Die Teilnahme an unterschiedlichen Arbeitspaketen gewährleistet einen intensiven Informationsaustausch im Konsortium.

4.1 Work package 1: Bestimmungsmethoden (Leitung: F. Lacoste, Iterg, Frankreich)

Obwohl eine Vielfalt von Stabilitäts-Untersuchungsmethoden aus der Lebensmittelindustrie bekannt sind, ist das Wissen über die Auswirkungen der Stabilität bei technischen Anwendungen sehr beschränkt. Bei der Kraftstoffstabilität muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen:

- Oxidationsstabilität: Einfluss von Sauerstoff und Umgebungsluft
- Thermische Stabilität: Einfluss von Temperatur
- Lagerungsstabilität: Einfluss von Zeit und Lagerungsbedingungen

Abbildung 1:
Rancimat zur Untersuchung der Oxidationsstabilität

Oxidationsstabilität: Im Verlauf des Normierungsprozesses von Biodiesel im CEN wurde der Rancimat-Test (Abbildung 1) für die Bestimmung der Oxidationsstabilität ausgewählt. Im Projekt wird der Zusammenhang zwischen der damit bestimmten "Induktionsperiode" und anderen Qualitätsparametern untersucht.

Thermische Stabilität und Lagerungsstabilität: Auf Grund der fehlenden Erfahrung konnten für diese Parameter keine geeigneten Untersuchungsmethoden ausgewählt werden. Im Projekt werden entsprechende Methoden nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht, wie z.B. die Wiedergabe realer Bedingungen, Korrelation mit anderen Qualitätsparametern, Präzision, Kosten,...

4.2 Work package 2: Lagerungsversuche
(Leitung: P. Bondioli, SSOG, Italien)

In diesem Arbeitspaket wird der Einfluss verschiedener Lagerungsbedingungen auf die Kraftstoffqualität untersucht. Frühere Arbeiten haben gezeigt, dass die Umgebungsbedingungen einen starken Einfluss auf die Kraftstoffqualität haben. Der Verlauf der Qualitätseigenschaften wird auch wesentlich vom verwendeten Rohstoff mitbestimmt.

4.3 Work package 3: Antioxidantien
(Leitung: M. Mittelbach, Uni Graz, Österreich)

Der Gehalt an natürlichen Antioxidantien in Pflanzenölen, wie Tocopherol und Carotin, verhindern Oxidationsreaktionen. Allerdings variiert der Gehalt abhängig vom Biodiesel-Produktionsprozess und vom verwendeten Rohstoff. So beinhaltet z.B. destillierter Biodiesel, der vom chemischen Standpunkt die höchste Reinheit besitzt, keine natürlichen Antioxidantien, da diese durch die Destillation abgetrennt werden. In diesem Arbeitspaket soll daher die Wirkung von synthetischen und/oder natürlichen Antioxidantien untersucht werden, um die Oxidationsstabilität zu erhöhen. Auch soll untersucht werden, wie sich die Additivierung auf andere Qualitätsparameter auswirkt.

4.4 Verwendung von Biodiesel

Biodiesel wird sowohl als Kraftstoff für Dieselmotoren, als auch als Heizöl verwendet. In diesem Arbeitspaket werden Untersuchungen an Einspritzsystemen, Motoren und Fahrzeugen, wie auch an Heizungsanlagen durchgeführt. Auf Grund der Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen ist das Testprogramm sehr umfangreich:

4.4.1 Biodiesel als Kraftstoff für Dieselmotoren
(Leitung: J. Blassnegger, TU Graz, Österreich)

Das Versuchsprogramm umfasst:

- Prüfstandsläufe mit verschiedenen Einspritzsystemen und Kraftstoffen mit unterschiedlicher Stabilität
- Dauerläufe mit zwei Motoren
- Flottenversuch mit reinem Biodiesel mit einer niedrigen Oxidationsstabilität
- Flottenversuch mit einer Mischung aus fossilem Dieselkraftstoff und Biodiesel mit einer niedrigen Stabilität.

4.4.2 Biodiesel als Heizöl
(Leitung: T. Brehmer, OMV, Österreich)

Das Versuchsprogramm umfasst:

- Prüfstandsläufe mit Heizungssystemen (Emissionsuntersuchungen, Funktionstests, Dauererprobung)
- Feldtests mit Heizungsanlagen.

5 Bisherige Ergebnisse

5.1 Work package 1: Bestimmungsmethoden

Es wurden Daten über Lagerungs- und Einsatzbedingungen von Biodiesel erhoben, um Kriterien für Bestimmungsmethoden im Labor festlegen zu können. Bei der Methode zur Untersuchung der Oxidationsstabilität (Rancimat-Test, prEN 14112) konnte eine gute Korrelation zu anderen Qualitätsparametern gefunden werden. Methoden zur Untersuchung der thermischen Stabilität und Lagerungsstabilität wurden vorgeschlagen und werden derzeit ausgewertet bzw. weiter entwickelt.

5.2 Work package 2: Lagerungsversuche

Im Juli 2001 wurde mit einem Lagerungsversuch begonnen, der insgesamt 11 Biodiesel-Proben zu je 200 l umfasst. Dabei wird Biodiesel aus verschiedenen Rohstoffen (Rapsöl, Sonnenblumenöl, Altspeiseöl und Rindertalg) bei unterschiedlichen Bedingungen gelagert. In regelmäßigen Abständen werden Proben gezogen und analysiert. Die Daten werden für die Entwicklung der Untersuchungsmethode zur Lagerungsstabilität verwendet. Nach einem vollen Jahr Lagerungszeit werden einige Proben für Untersuchungen am Prüfstand an der TU Graz bereitgestellt.

5.3 Work package 3: Antioxidantien

Nach einer intensiven Literaturrecherche wurden 20 kommerziell verfügbare, synthetische Antioxidantien ausgesucht. Die Wirkung der Additive wurde an insgesamt 8 verschiedenen Proben analysiert: Biodiesel aus Rapsöl, Sonnenblumenöl, Altspei-

seöl und Rindertalg, jeweils undestilliert und destilliert. Die Wirkung wurde an Hand der Induktionsperiode im Rancimat beurteilt. Bei Antioxidantien mit einer guten Wirkung wurde versucht, die optimale Konzentration zu finden. Neben synthetischen werden auch natürliche Antioxidantien untersucht.

5.4 Work package 4: Verwendung von Biodiesel

5.4.1 Biodiesel als Kraftstoff für Dieselmotoren

Am Prüfstand wurden Dauerläufe mit 3 verschiedenen Einspritzsystemen durchgeführt: Common-rail-System für schwere Nutzfahrzeuge, direkteinspritzendes System für PKW und Common-rail-System für PKW. Dabei wurde Biodiesel mit einer niedrigen, einer mittleren und einer hohen Stabilität verwendet.

Bei einem Flottenversuch mit 4 PKWs (2 Direkteinspritzer, 2 Pumpe-Düse) wird Rapsölmethylester mit einer niedrigen Oxidationsstabilität verwendet. Der Kraftstoff wurde vor der Verwendung mit Luft und Temperatur künstlich gealtert. Der Fahrzeugbetrieb wie auch die Kraftstoffqualität wird laufend dokumentiert. Zu Beginn und am Ende werden Emissionsmessungen und Leistungsmessungen am Rollenprüfstand durchgeführt. Nach dem Versuch wird das Einspritzsystem untersucht.

Ein weiterer Flottenversuch wurde mit 3 Fahrzeugen begonnen. Als Versuchskraftstoff wird fossiler Dieselkraftstoff mit 5% Altspeiseölmethylester verwendet. Es wird der Einfluss der Stabilität auf die gesamte Kette der Kraftstoffversorgung (vom Lagertank bis zum Einspritzsystem) untersucht. Zu Beginn wurden Emissionsmessungen und Leistungsmessungen am Prüfstand durchgeführt. Bisher konnten keine Probleme festgestellt werden.

5.4.2 Biodiesel als Heizöl

Prüfstandsuntersuchungen: Es wurden Funktionstests in der Startphase sowie Emissionsmessungen an verschiedenen Heizölbrennern durchgeführt. Mit drei Anlagen, die mit konventioneller Brennertechnologie ausgestattet sind, wurden 1000h-Dauerläufe durchgeführt. Als Brennstoff werden Mischungen von (fossilem) Heizöl extra leicht und Biodiesel (5% und 20%) verwendet. Begleitend dazu werden die Systeme regelmäßig überprüft, Emissionsmessungen und Kraftstoffanalysen durchgeführt.

Feldtests: Acht Heizungssysteme wurden im Herbst 2001 in Niederösterreich in typischen Einfamilienhaushalten installiert. Als Brennstoff werden Mischungen von Heizöl extra leicht und 5% Biodiesel (Rapsölmethylester bzw. Altspeiseölmethylester) verwendet. In vier Fällen wurde Biodiesel mit einem Antioxidant additiviert. Die Qualität des Brennstoffes wird regelmäßig analysiert. Die wichtigsten Betriebsparameter werden automatisch aufgezeichnet und ausgewertet.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Im gegenständlichen Projekt "Stabilität von Biodiesel" konnte die Methode zur Bestimmung der Oxidationsstabilität (Rancimat-Test) überprüft sowie weitere Methoden zur Bestimmung der thermischen und der Lagerungsstabilität vorgeschlagen werden. Die Ergebnisse eines Lagerungsversuches mit 11 Biodieselproben aus unterschiedlichen Rohstoffen liefern ein besseres Verständnis über den Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Umgebungsbedingungen auf den Verlauf der Qualität. Es wurde eine Vielzahl von kommerziell verfügbaren Antioxidantien untersucht und deren Wirksamkeit überprüft. Die Auswirkung der Stabilität von Biodiesel bei der Anwendung wird in einem breit angelegten Versuchsprogramm am Prüfstand und im Feld untersucht. Wesentliche Ergebnisse werden nach erfolgter Abschlussuntersuchung der Einspritzsysteme vorliegen.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt tragen zum besseren Verständnis der Auswirkungen einer niedrigen Kraftstoffstabilität von Biodiesel bei und liefern eine Basis für die Festlegung von Mindestanforderungen. Ein stabiles Produkt erhöht das Vertrauen in den erneuerbaren Kraftstoff und liefert die Voraussetzung für eine Erhöhung des Marktanteiles. Damit liefert das Projekt einen Beitrag zur Erreichung der Ziele der Europäischen Kommission im Hinblick auf Biokraftstoffe.

Literatur

KOM (97) 599 vom 26.11.1997 Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger – Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan.

Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger (Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan). Kampagne für den Durchbruch. DGXVII.

M/245 Auftrag an das Europäische Komitee für Normung (CEN), über die Ausarbeitung und Verabschiedung von Normen betreffend Mindestanforderungen einschließlich Prüfmethoden für Fettsäure-Methylester als Kraftstoff für Dieselmotoren und zur Raumheizung.

Anhang

Adressen der Referenten:

Dipl.-Ing. Jürgen Blaßnegger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Kopernikusgasse 24/2
A – 8010 GRAZ

Dipl.-Ing. agr. Dieter Bockey
AGQM
Reinhardtstr. 18
10117 Berlin

Dr. med. Jürgen Bünger
Zentrum Umwelt- und Arbeitsmedizin
Waldweg 37
37073 Göttingen

Richard Dorenkamp
Volkswagen AG
Brieffach 1769 /EAV
38436 Wolfsburg

Dr. Jürgen Fischer
Oelmühle Leer Connemann GmbH
Sägemühlenstr. 45
26789 Leer

Prof. Dr. Jon Van Gerpen
Mechanical Engineering
2025 H.M. Black Engineering Building
Iowa State University
AMES, Iowa 50011-2161
USA

Prof. Dr. Peter Kehrer
Bundesanstalt für Geowissenschaften
Stilleweg 2
30655 Hannover

Dr. Gerhard Knothe
National Center for Agricultural Utilization Research
1815 North University Street
PEORIA, Illinois 61604-3999
USA

Prof. Dr. Jürgen Krahl
FH Coburg
Fiedrich-Streib-Str. 2
96406 Coburg

Dr. Winfried Degen
DaimlerChrysler AG
Research and Technology 1
HPC G207
70546 Stuttgart

Univ.-Prof. Dr. Martin Mittelbach
Karl-Franzens-Universität
Institut für Chemie
Heinrichstr. 28
A – 8010 GRAZ

Prof. Dr.-Ing. Axel Munack
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Institut für Technologie und Biosystemtechnik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Rolf Neiß
Stadtwerke Neuwied
Hafenstr. 90
56564 Neuwied

Dr. Jürgen Ohlhoff
Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
Referat 535
Postfach 14 02 70
53107 Bonn

Dr. Andreas Ostermeier
UBA
Fachgebiet I 3.4
Bismarckplatz 1
14193 Berlin

Dipl.-Ing. Heinrich Prankl
Bundesanstalt für Landtechnik
Rottenhauserstr. 1
A – 3250 WIESELBURG

Dr. Guido Reinhardt
Institut für Energie- und Umweltforschung
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Manfred Schöpe
ifo Institut für Wirtschaftsforschung
Poschingerstr. 5
81679 München

Prof. Dr.-Ing. Klaus Schreiner
Fachhochschule Konstanz
Fachbereich Maschinenbau / MK
Brauneggerstr. 55
78462 Konstanz

Dipl.-Chem. Hendrik Stein
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Institut für Technologie und Biosystemtechnik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Prof. Helmut Tschöke
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenmesstechnik und
Kolbenmaschinen
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Dr. Jörg Ullmann
Robert Bosch GmbH
FV/FLA
Postfach 106050
70049 Stuttgart

Lieferbare Sonderhefte / Following special issues are available:

	Jahr 2000	€
208	Ingo Hagel Differenzierung und Charakterisierung von Weizen verschiedener Anbausysteme und Sorten durch Proteinfraktionierung	7,00
210	Ursula Pultke Freilanduntersuchungen zum Schwefelhaushalt eines Agrarökosystems mittels Analyse stabiler S-Isotope	7,00
212	Franz Ellendorff und Hartmut Stützel (Herausgeber) Workshop "Nachhaltige Landwirtschaft" vom 31.05. – 02.06.1999	10,00
213	Ulrich Dämmgen (Herausgeber) Versauernde und eutrophierende Luftverschmutzung in Nordost-Brandenburg	7,00
214	Ulf Prüße Entwicklung, Charakterisierung und Einsatz von Edelmetallkatalysatoren zur Nitratreduktion mit Wasserstoff und Ameisensäure sowie des Stahlschneideverfahrens zur Herstellung Polivinylalkohol-verkapselter Katalysatoren	10,00
215	Torsten Hemme Ein Konzept zur international vergleichenden Analyse von Politik- und Technikfolgen in der Landwirtschaft	15,00
216	Sven Dänicke und Elisabeth Oldenburg (Herausgeber) Risikofaktoren für die Fusariumtoxinbildung in Futtermitteln und Vermeidungsstrategien bei der Futtermittelerzeugung und Fütterung	7,00
218	Luit J. de Kok, Dieter Grill, Malcom J. Hawkesford, Ewald Schnug and Ineke Stulen (Editors) Plant Sulfur Research in Europe, Cost Action 829 Fundamental, Agronomical and Environmental Aspects of Sulfur Nutrition and Assimilation in Plants	7,00
219	Carsten in der Wiesche Untersuchungen zur Sanierung PAK-kontaminierter Böden mit Weißfäulepilzen	7,00
220	Ingo Hagel Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf Ertrag und Qualität von Weizen schwefelmangel-gefährdeter Standorte des Ökologischen Landbaus	7,00
221	Franz-Josef Bockisch (Herausgeber) Beurteilung der raumklimatischen Wirkungen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	7,00
	Jahr 2001	
222	Margret Lahmann Prognose der Nachfrage nach Milch und Milcherzeugnissen in Deutschland und Frankreich bis zum Jahre 2005	12,00
223	Josef Kamphues und Gerhard Flachowsky (Herausgeber) Tierernährung – Ressourcen und neue Aufgaben	17,00
226	Jörg Hartung and Christopher M. Wathes (Editors) Livestock Farming and the Environment	7,00
229	Volker Moennig and Alex B. Thiermann (Editors) Safeguarding Animal Health in Global Trade	7,00
230	Nežika Petrič Pränatale Regulation der sexuellen Differenzierung von Luteinisierungshormon und Wachstumshormon, Genexpression und Sekretion beim Schwein	7,00
231	Bernhard Osterburg und Hiltrud Nieberg (Herausgeber) Agrarumweltprogramme – Konzepte, Entwicklungen, künftige Ausgestaltung	7,00

	Jahr 2002	€
225	Hans-Wilhelm Windhorst and Aalt A. Dijkhuizen (Editors) Product Safety and Quality Assurance	7,00
227	Franz Ellendorff, Volker Moennig, Jan Ladewig and Lorne Babiuk (Editors) Animal Welfare and Animal Health	7,00
228	Eildert Groeneveld and Peter Glodek (Editors) Animal Breeding and Animal Genetic Resources	7,00
232	Kerstin Panten Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen	7,00
233	Jürgen Krahl Rapsölmethylester in dieselmotorischer Verbrennung – Emissionen, Umwelteffekte, Optimierungspotenziale -	10,00
234	Roger J. Wilkins and Christian Paul (Editors) Legume Silages for Animal Production - LEGSIL	7,00
235	Torsten Hinz, Birgit Rönnpagel and Stefan Linke (Editors) Particulate Matter in and from Agriculture	7,00
236	Mohamed A. Yaseen A Molecular Biological Study of the Preimplantation Expression of Insulin-Like Growth Factor Genes and their Receptors in *In Vitro* Produced Bovine Embryos to Improve *In Vitro* Culture Systems and Embryo Quality	8,00
237	Mohamed Ali Mahmoud Hussein Kandil The effect of fertilizers for conventional and organic farming on yield and oil quality of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) in Egypt	7,00
238	Mohamed Abd El-Rehim Abd El-Aziz Hassan Environmental studies on coastal zone soils of the north Sinai peninsula (Egypt) using remote sensing techniques	7,00
239	Axel Munack und Jürgen Krahl (Herausgeber) Biodiesel – Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen -	7,00
240	Sylvia Kratz Nährstoffbilanzen konventioneller und ökologischer Broilerproduktion unter besonderer Berücksichtigung der Belastung von Böden in Grünausläufen	7,00
241	Ulf Prüße and Klaus-Dieter Vorlop (Editors) Practical Aspects of Encapsulation Technologies	9,00
242	Folkhard Isermeyer (Editor) Milchproduktion 2025	9,00