

Rapsmethylester als Treibstoff für Dieselmotoren

Einführung technisch möglich

Ulrich Wolfensberger, Edwin Stadler und Isidor Schiess, Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG

Freiwerdende landwirtschaftliche Produktionsflächen sollten unter anderem mit nachwachsenden Rohstoffen für den Energiebereich sinnvoll genutzt werden, um damit zu vermindertem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beizutragen. Umgeestertes Rapsöl, sogenannter Rapsmethylester (RME), kann als Treibstoff in unveränderten

Dieselmotoren eingesetzt werden. Finanziell sieht dies allerdings wenig ermutigend aus. Als technische Entscheidungsgrundlagen wurden an Traktor- und Nutzfahrzeugmotoren umfangreiche Prüfstandsmessungen durchgeführt. Über fast drei Jahre standen zwei Traktoren und während eines Jahres fünf Busse des öffentlichen Verkehrs im prakti-

schon Einsatz. Ohne Leistungseinbusse, jedoch mit ca. 10% Mehrverbrauch, erreichten die Motoren emissionsmässig günstige Werte. Hauptsächlich der Schwarzrauch wurde sehr stark reduziert. Der Partikelaustritt verringerte sich erst nachhaltig, als ein Katalysator eingesetzt wurde, was dank der Schwefelfreiheit des RME keine Probleme bietet. Stickoxide gibt es allerdings mehr mit RME und werden auch durch den Katalysator nicht reduziert.

Unbefriedigende Kaltstarteigenschaften gilt es noch zu lösen, wogegen resistente Materialien für Treibstoffschläuche, Lackierung und Tankinnenbeschichtung bekannt sind. Der stark beanstandete Abgas-Geruch wird auch durch den Katalysator beseitigt.



Abb. 1: Taucht am Horizont eine neue Verwendungsmöglichkeit von Raps auf?

Inhalt:	Seite
Problemstellung	2
Versuchsanlage	2
Der Treibstoff Rapsöl	3
Resultate	5
Prüfstandsmessungen	5
Praxisversuche	7
Energiebilanz und CO ₂ -Kreislauf	10
Kosten	11
Literatur	11

Problemstellung

Rudolf Diesel, den Erfinder des Dieselmotors, veranlasste um 1900 hauptsächlich die schlechte Verfügbarkeit von fossilem Treibstoff, für seine Motorenversuche Pflanzenöl zu benutzen. Heute gibt es gleich mehrere gute Gründe, über die Verwendung von einheimischen nachwachsenden Rohstoffen als Energieträger nachzudenken.

- In der Landwirtschaft sind bei stagnierendem Verbrauch die Erträge so angestiegen, dass in den nächsten Jahren in der Schweiz nach Schätzung der Experten etwa 80000 ha Produktionsflächen frei werden. Neben der Einführung extensiver Produktionsformen und der Ausscheidung ökologischer Ausgleichsflächen könnten auf einem Teil dieser freiwerdenden Wiesen und Äcker nachwachsende Rohstoffe produziert werden.

- Es ist hinlänglich bekannt, dass die Erdölvorräte zwar noch riesig, aber doch nicht unerschöpflich sind. Es müssen daher alle Möglichkeiten erneuerbarer Energien untersucht werden.

- Die politische Abhängigkeit von erdölfördernden Ländern ist nicht immer unproblematisch. Jede Verringerung dieser Abhängigkeit ist erwünscht.

- Die Umweltsituation gibt zur Sorge Anlass. Speziell beunruhigt der Treibhauseffekt, der vermutlich zu über 50% durch den Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre verschuldet wird. Alternative Energieträger müssen besonders bezüglich Emissionen kritisch betrachtet werden.

Dieses Projekt soll zeigen, ob es technisch einwandfrei möglich ist, RME als Motorbetriebsstoff einzusetzen, welche Schwierigkeiten auftreten und wie diese gelöst werden können. Dabei war es sehr wichtig, eigene Erfahrungen zu sammeln. Der RME-Einsatz in städtischen Bussen sollte unter anderem die Frage der Akzeptanz in städtischer Umgebung klären. Schliesslich bilden die Projektergebnisse die Grundlage für eine politische Entscheidung über die Förderung des Rapsanbaus, die möglicherweise für die Entwicklung des ganzen Bereichs der nachwachsenden Rohstoffe bestimmend sein kann.

Versuchsanlage

Die motortechnischen Versuche erfolgten an folgenden Fahrzeugen:

Traktor SAME Explorer 65 mit einem luftgekühlten 4-Zylinder-Saugmotor mit 3,6 Liter Hubvolumen, direkteingespritzt, Nennleistung 48 kW bei 2350 min^{-1} .

Traktor STEYR 8055 mit einem wassergekühlten 3-Zylinder-Saugmotor mit 2,6 Liter Hubvolumen, direkteingespritzt, Nennleistung 35 kW bei 2400 min^{-1} .

Traktor JOHN DEERE 2250 mit einem wassergekühlten 4-Zylinder-Saugmotor mit 3,9 Liter Hubvolumen, direkt-

eingespritzt, Nennleistung 46 kW bei 2300 min^{-1} .

Zweischs-Niederflurbus

MERCEDES-BENZ O 405 N mit einem liegenden wassergekühlten 6-Zylinder-Saugmotor mit 12 Liter Hubvolumen, direkteingespritzt, Nennleistung 177 kW bei 2200 min^{-1} (OM 447 h-II).

Proben von jeder RME-Lieferung aus Österreich und aus Italien wurden im Betriebsstofflabor der EMPA analysiert. Das Institut für Biochemie der Universität Bern bestimmte gaschromatographisch die Fettsäurezusammensetzung von je einer Probe RME aus Österreich und Italien. Die Bestimmung der Bioabbaubarkeit nach CEC L-33-T-82 erfolgte im Betriebsstofflabor der EMPA.

Fachausdrücke:

RME

Rapsmethylester, wird Biodiesel genannt.

Elsbett-Motor

Spezielle Dieselmotor-Konstruktion von Herrn Elsbett für den Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl als Treibstoff.

Umesterung

Chemischer Prozess zur Aufspaltung von grossen Fettsäure-Molekülverbänden in kleine, unter Verwendung von einwertigem Alkohol.

FAV 2

Verordnung über die Abgasemissionen schwerer Motorwagen.

BAV

Verordnung über Bau und Ausrüstung der Strassenfahrzeuge.

CO

Kohlenmonoxid, giftiges, geruchloses Gas.

CO_2

Kohlendioxid, ungiftiges Gas, aber einer der Verursacher des Treibhauseffektes.

HC

Sammelbegriff für die gasförmigen, unverbrannten Kohlenwasserstoff-Verbindungen im Abgas.

NO_x

Stickoxide: Stickstoffmonoxid (NO) und hauptsächlich Stickstoffdioxid (NO_2), ein stechend riechendes, giftiges Gas.

Partikel

Alle Stoffe im Abgas, die bei 52°C mittels definiertem Filter gesammelt und gewogen werden (also auch Flüssigkeitströpfchen). Unlösliche Anteile: hauptsächlich graphitischer Kohlenstoff (= Russ), Sulfate, Nitrate, Wasser. Lösliche Anteile: unverbrannte höhere Kohlenwasserstoffe aus Kraftstoff und Schmieröl.

VBZ

Verkehrsbetriebe Zürich.

Problemstellung / Versuchsanlage / Treibstoff Rapsöl

Durchgeführte Versuche	Versuchseinrichtungen
Prüfstandsmessungen am SAME, STEYR und JOHN DEERE mit Diesel und RME: Vollastkurve (Leistung, Verbrauch), Rauch nach BAV Emissionsmessungen (CO, HC, NOx) am SAME, STEYR und JOHN DEERE mit Diesel und RME im 13-Stufentest nach FAV 2 (ECE R 49) und in zwei 5-Stufen-Traktortests nach Logos/Welschhof Praktischer Einsatz des STEYR und JOHN DEERE mit RME auf dem Haldenhof bei Frauenfeld (Fam. Weber) während fast drei Jahren Abschluss-Prüfstandsmessungen am STEYR und JOHN DEERE mit RME: Vollastkurve (Leistung, Verbrauch), Rauch nach BAV	Zapfwellenmessung mit Schenck-Leistungsbremse an der FAT Zapfwellenmessung mit mobiler Leistungsbremse an der EMPA (alte Emissionsmessgeräte) Schmierölanalysen im Betriebsstofflabor der EMPA Zapfwellenmessung mit Schenck-Leistungsbremse an der FAT
Prüfstandsmessungen am ELSBETT-Motor mit naturbelassenem Rapsöl und Diesel: Leistung, Verbrauch, Rauch bei Vollast und Emissionen (CO, HC, NOx) im 13-Stufentest nach FAV 2	Motormessung auf altem Prüfstand an der EMPA
Prüfstandsmessungen am MERCEDES-Busmotor mit Diesel und RME [4]: Vollastkurve (Leistung, Verbrauch), Rauch nach BAV, sowie Emissionen (CO, HC, NOx) und Partikel im 13-Stufentest nach FAV 2. Praktischer Einsatz von fünf MERCEDES-Bussen der VBZ mit RME im normalen Linienverkehr während eines Jahres, drei Busse davon zirka sechs Monate lang mit Abgaskatalysator	Motormessung auf neuem Prüfstand an der EMPA, Partikelmessung mit Smart Sampler AVL Schmierölanalysen im Betriebsstofflabor der EMPA
Laborversuche an der FAT bezüglich Beständigkeit von vier verschiedenen Lacksystemen der Firma Trilacolor AG Laborversuche bezüglich Beständigkeit an verschiedenen Tankinnenbeschichtungen durch Firma Adisa Service AG Laborversuche an der FAT bezüglich Beständigkeit verschiedener Polymere-Schläuche	Musterplatten mit getränktem Wattebausch 1000 h beaufschlagt 1 Jahr lang Musterstücke 400 h im RME-Bad bei 20 °C und 70 °C (im Wärmeschrank)

für die typisch ölige Zähflüssigkeit von naturbelassenem Rapsöl (Viskosität ungefähr 70 bis 100 mm²/s). Derart dickflüssiges Öl eignet sich nicht ohne weiteres als Treibstoff in Dieselmotoren. Nur Kammermotoren mit grossen Zylindereinheiten [1] oder der speziell konstruierte Elsbett-Motor mit duothermischem Brennverfahren [2] sind für den Betrieb mit reinem Rapsöl geeignet. Eigene Messungen an einem aufgeladenen 1,5-Liter-Elsbett-Motor ergaben bemerkenswerte Resultate, vergleichbar mit einem guten modernen Dieselmotor, mit Ausnahme der weit über der Toleranz liegenden Rauchwerte [3].

Rapsmethylester (RME) = Biodiesel

Um Rapsöl als Treibstoff in allen Dieselmotoren einsetzen zu können, muss dieses durch einen chemischen Prozess angepasst werden. Bei der sogenannten Umesterung wird dem Rapsöl Methanol zugegeben. Mit Hilfe eines Katalysatormittels – in der Regel Natronlauge – und Wärme (50–80 °C) werden die grossen Triglyzeridmoleküle chemisch aufgespalten. An jede Fettsäurekette setzt sich ein Methanolmolekül unter Abtrennung seiner Alkoholgruppe, die sich ihrerseits ans Glycerin anlagert. Aus einem grossen Rapsölmolekül und drei Methanolmolekülen entstehen somit drei Rapsmethylester-Moleküle und ein Glycerinmolekül. Durch diese Umesterung kann die Viskosität wesentlich gesenkt werden, gleichzeitig steigt die Cetan-

Der Treibstoff Rapsöl

Naturbelassenes Pflanzenöl nur für spezielle Motoren

Raffiniertes Rapsöl, so wie es auch für Speisezwecke gebraucht wird, besteht aus grossen Fettsäure-Triglyzerid-Molekülen. Jeweils drei Fettsäureketten mit 16 bis 18 C-Atomen – Palmitin-, Stearin-, Öl-, Linolsäure usw. – sind durch einen dreiwertigen Alkohol, nämlich Glycerin, verbunden (Abb. 2). Diese grossen Moleküle sind mit ein Grund

Rapsöl		A, B, C = Fettsäuren	Anzahl C-Atome und Doppelbin- dungen	Proz. Anteil
Fettsäure- Triglyzerid		Palmitinsäure	16 : 0	5.5 %
		Stearinsäure	18 : 0	1,5 %
		Oelsäure	18 : 1	61 %
		Linolsäure	18 : 2	22 %
		α -Linolensäure	18 : 3	9 %
D = dreiwertiger Alkohol (Glycerin)				

Abb. 2: Chemischer Aufbau von Rapsöl

Tabelle 1: Treibstoff-Kenndaten (nach EMPA-Analysen)

		Diesel	RME	Rapsöl
Dichte bei 15°C	kg/l	0.827	0.884	0.921
Viskosität bei 20°C	mm ² /s	3.3	8.8	ca. 100.0
Heizwert	MJ/kg	42.8	37.3	36.9
Cetanzahl		48.7	49.3	39.7

zahl – das ist ein Mass für die Zündwilligkeit des Treibstoffs – auf die Werte des Dieselöls. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten einander gegenübergestellt. Dieser Rapsmethylester (RME) – allgemein Biodiesel genannt – kann rein oder in beliebiger Mischung mit Dieseltreibstoff in unveränderten Dieselmotoren verwendet werden.

Produktionsmenge

Zur Zeit beträgt die Rapsanbaufläche für Speiseöl in der Schweiz 17 000 ha. Bei Einhaltung der Fruchtfolgeeregeln lässt sich diese Fläche höchstens verdoppeln. Es könnten also für eine schweizerische Biodieselproduktion die zusätzlichen 17 000 ha Raps zur Verfügung stehen. Geht man von einem

Ertrag von 3000 kg pro ha aus, ergibt das eine Ölmenge von 1300 Liter, oder umgeestert 1375 Liter/ha Biodiesel (Abb. 3). Gesamthaft könnten also gut 23 Mio Liter, entsprechend 20 000 t RME produziert werden, was ungefähr 1,8% des Dieselölkonsums von 1990 entspricht. (Zum Vergleich: Die Landwirtschaft verbrauchte ungefähr 130 Mio l, die PTT 15 Mio l, die VBZ 4,3 Mio l).

Als Nebenprodukt fallen pro Hektar rund 1800 kg Rapskuchen an, die dem Vieh verfüttert werden. Das zweite Nebenprodukt Glycerin kann – allerdings nur in sehr reiner Form – ein Ausgangsstoff für die pharmazeutische und kosmetische Industrie sein.

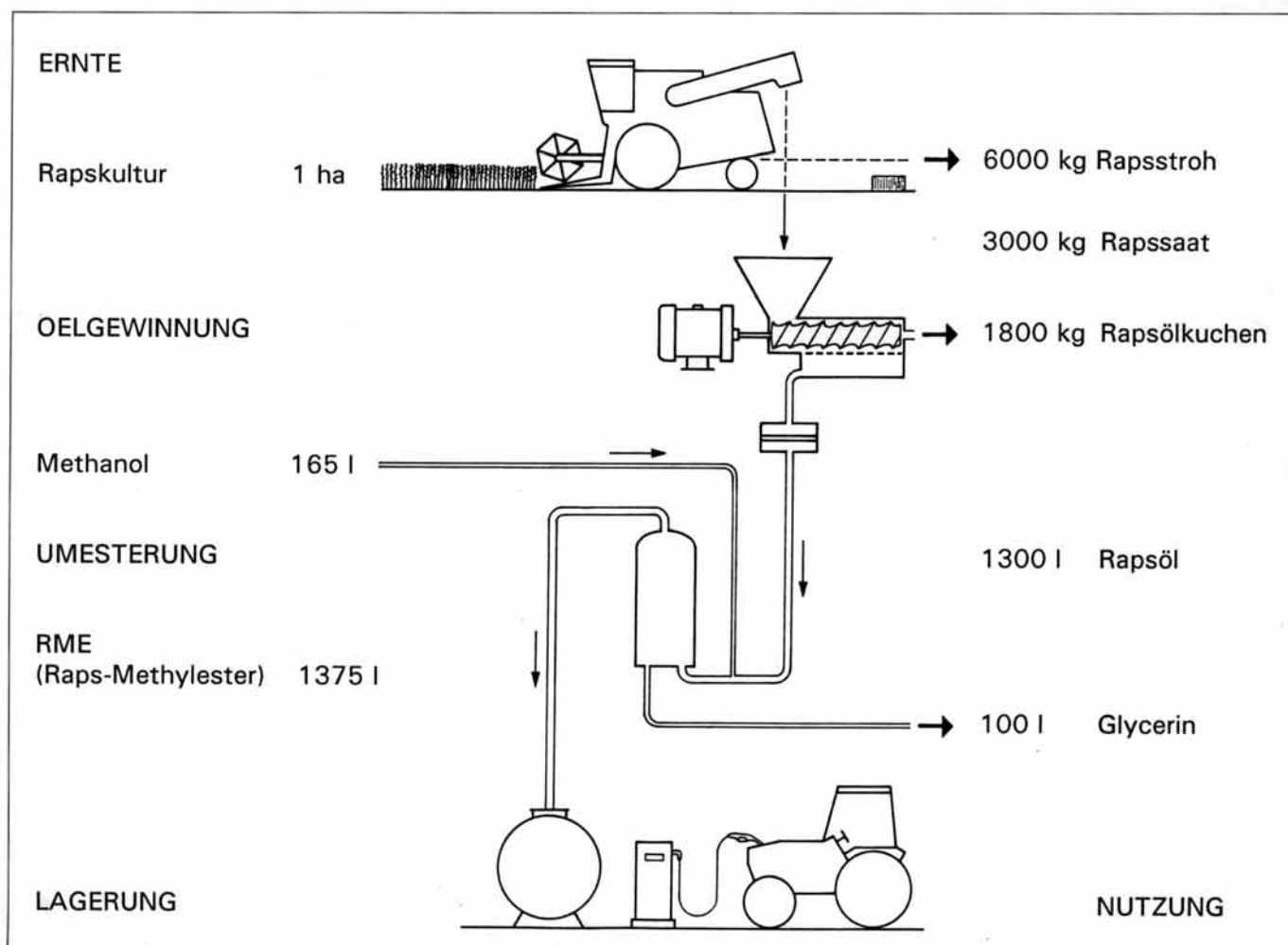


Abb. 3: Schematische Darstellung des Prozessablaufs zur Herstellung von Biodiesel und Mengenfluss pro Hektare Rapskultur

Resultate

Prüfstandmessungen

Gleiche Leistung, höherer Verbrauch

Auf dem Prüfstand wurde mit jedem Motor in unveränderter Einstellung je mit Dieseltreibstoff und mit RME die Vollastkurve gefahren. Diese Messungen wurden beim STEYR und JOHN DEERE bei Versuchsende nach fast dreijährigem Betrieb mit RME wiederholt. Abbildung 4 enthält die unbedeutenden Leistungsänderungen. So beträgt beim Busmotor die Minderleistung mit RME gegenüber Diesel bei Nenndrehzahl 3%. Die Verbrauchskurven in Abbildung 5 zeigen einheitlich den gravimetrischen Mehrverbrauch mit RME von 12%, was ziemlich genau dem 12,9% geringeren Heizwert des RME entspricht. Wie kommt aber dieser Mehrverbrauch ohne Verstellung der Einspritzpumpe zustande? Die Einspritzmenge wird ja in der Pumpe volumetrisch bestimmt. Der aufs Volumen bezogene Heizwert ist aber dank der höheren Dichte des Biodiesels nur 6,8% geringer als der des Dieselöls. Das zur Kompensation dieses Energieinhaltsmankos notwendige Mehrvolumen wird schliesslich noch durch die höhere Viskosität bewirkt, indem in der Einspritzpumpe die Spaltverluste kleiner und der Vordruck höher werden.

Halbierter Schwarzrauch

Der Rauchausschlag bei Dieselmotoren ist in der Verordnung über Bau und Ausrüstung von Strassenfahrzeugen (BAV) limitiert und die Messmethode vorgeschrieben. Bei drei festgelegten Drehzahlen muss im Vollastbetrieb der Schwarzrauch mit der Filtermethode gemessen werden. Aus Abbildung 6 ist die eindruckliche Verbesserung des Rauchverhaltens von RME gegenüber Dieseltreibstoff ersichtlich. Zwischen 14% und 65%, durchschnittlich etwa 50% weniger Rauch wird ausgestossen; die gesetzlich zulässigen Grenzwerte werden weit unterschritten.

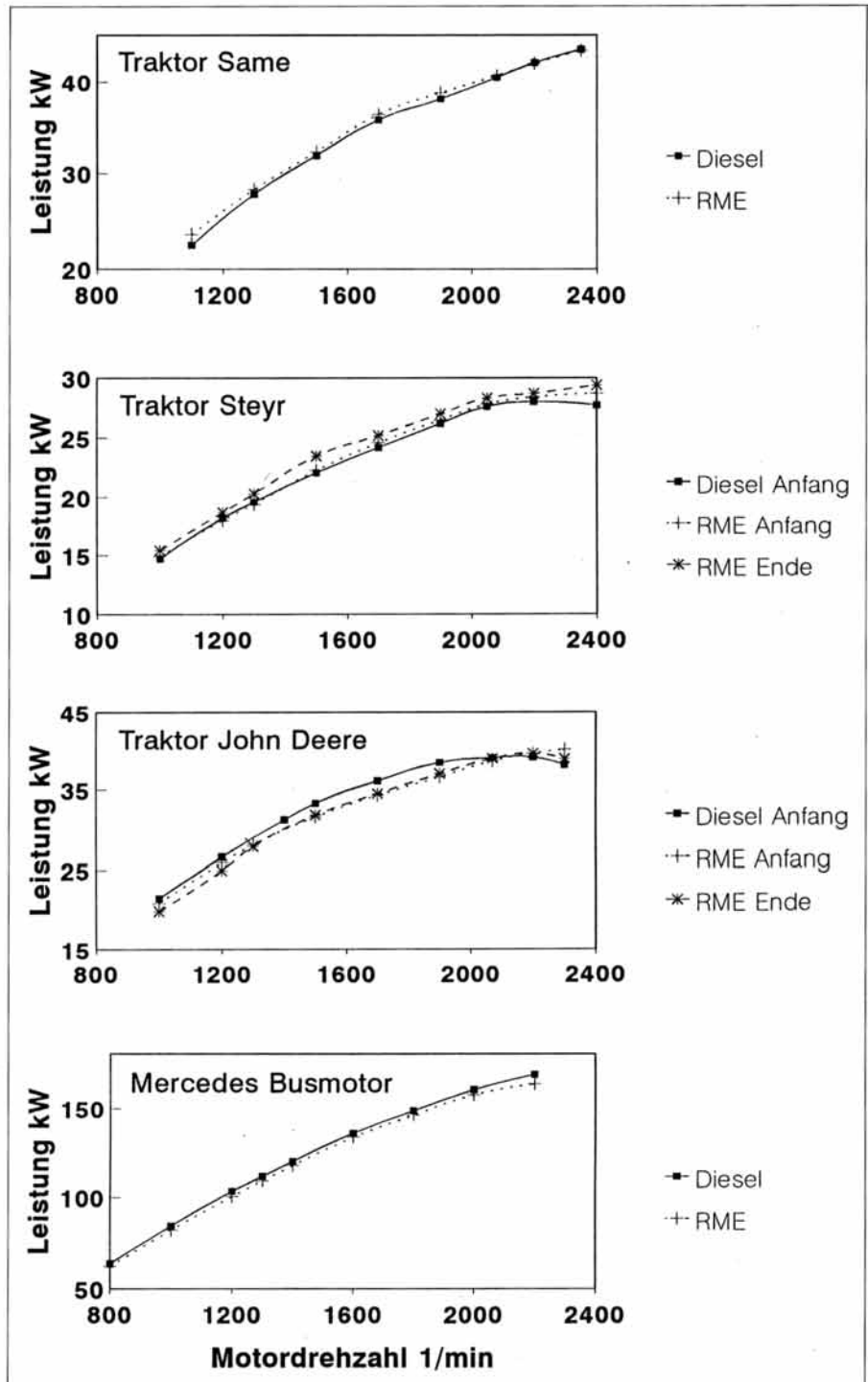


Abb. 4: Motorleistung mit Diesel und RME

Kleine Differenzen bei den gasförmigen Emissionen

Zu Vergleichszwecken wurden die gasförmigen Emissionen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) bei allen Motoren gemäss der Verordnung über die Abgasemissionen schwerer Motorwagen (FAV 2) gemessen, obwohl die Traktoren

nicht unter diese Verordnung fallen und die Messvorschrift auch nicht ihrem praktischen Lastkollektiv entspricht. Die Verordnung schreibt den 13-Stufen-Test nach dem internationalen Reglement ECE R 49 vor. Die relativen Veränderungen der drei Abgaskomponenten des RME-Betriebs, bezogen auf den Dieselbetrieb, sind in Abbildung 7 dargestellt. Offen-

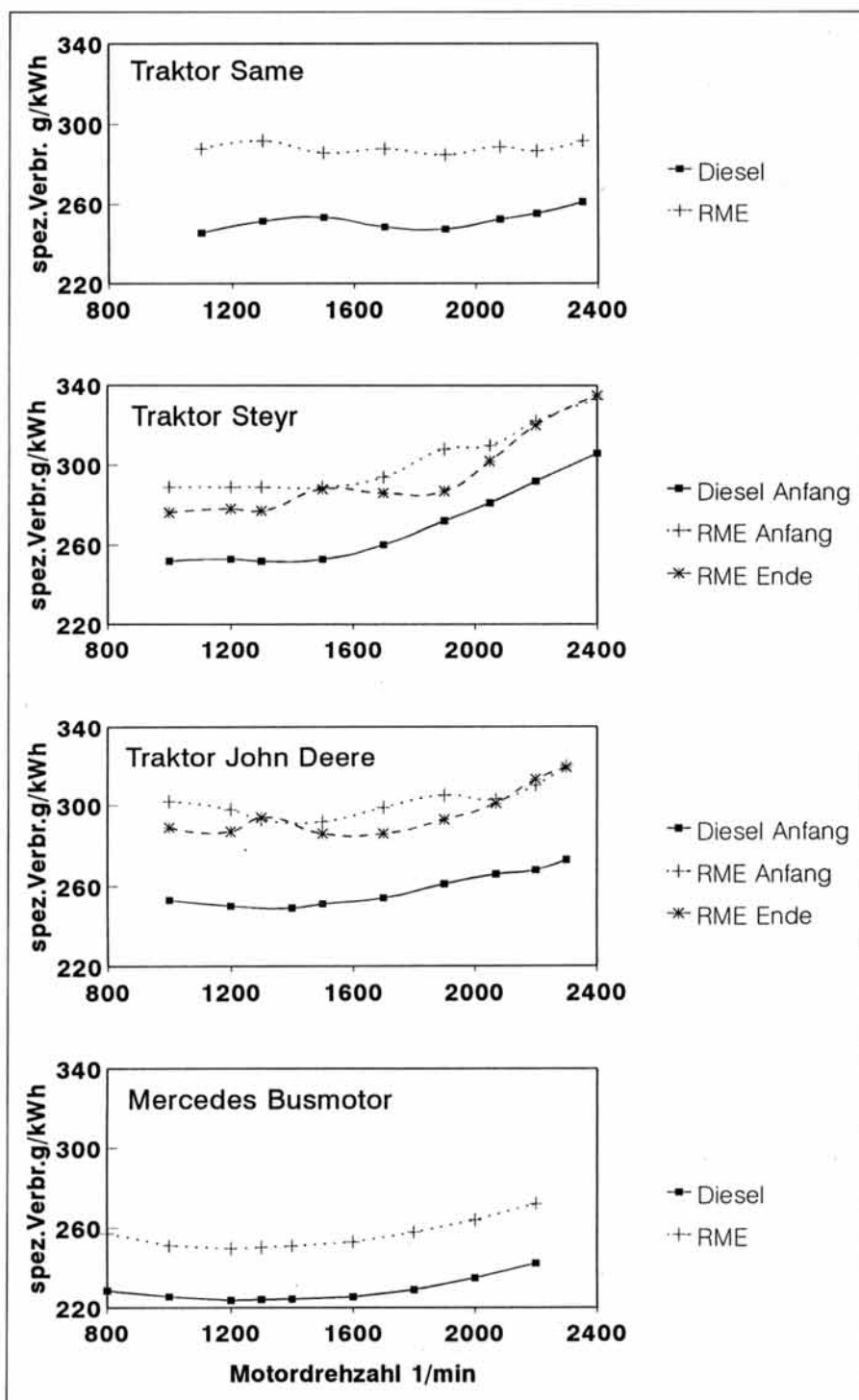


Abb. 5: Verbrauchskurven bei Vollast mit Diesel und RME

sichtlich ist der Einfluss der Motorkonstruktion und -einstellung auf die Abgase grösser als der des Treibstoffs. Tendenzmässig emittieren die Motoren mit RME – mit Ausnahmen – weniger CO und HC, aber – ohne Ausnahme – mehr NO_x. Diese könnten durch Verstellen des Förderbeginns wesentlich gesenkt werden, was allerdings die HC- und Partikelemissionen sowie den

Verbrauch anhebt, sowohl im Diesel- als auch im RME-Betrieb. Der Mercedes-Busmotor reagierte beispielsweise im Biodieselsbetrieb auf eine 3°-Verstellung des Förderbeginns mit 27% weniger NO_x, 11% mehr HC und 1,7% höherem Verbrauch.

Andere Partikelzusammensetzung

Seit dem 1. Oktober 1991 gilt in der FAV 2 auch ein Grenzwert für die Partikelemission. Obwohl dieser Grenzwert erst nach den Messungen in Kraft trat und der Mercedes-Motor schon lange typengeprüft war, interessierten diese neuartigen Partikelmessungen besonders, sowohl hinsichtlich der Messmethode wie natürlich auch hinsichtlich des Verhaltens mit RME gegenüber Diesel.

Als Partikel gelten laut Definition alle Stoffe im Abgas, die bei 52 °C mittels definiertem Filter gesammelt und gewogen werden. Im wesentlichen unterscheidet man unlösliche Anteile – sehr feiner graphitischer Kohlenstoffstaub (Russ) – und – zum Teil daran angelagert – lösliche Anteile (unverbrannte Kohlenwasserstoffe aus Schmier- und Treibstoff).

Aufgrund der sehr guten Rauchwerte erwartete man auch bessere Partikelwerte mit RME und war höchst überrascht, als dies nicht zutraf: Die Partikelemissionen im RME-Betrieb entsprechen in etwa denen im Dieselsbetrieb. Eine Partikelanalyse bestätigte aber die Vermutung, dass das Verhältnis zwischen löslichen und unlöslichen Partikeln völlig unterschiedlich ist. Waren bei Dieselpartikel etwa 10 bis 15% lösliche Bestandteile zu finden, betrug dieser Anteil bei RME-Partikel etwa 60 bis 70%. Das Verhältnis der restlichen, unlöslichen Bestandteile entspricht ungefähr dem bekannten Resultat der Rauchmessung.

Der «Katalysatortreibstoff»

Die löslichen Partikelanteile, also die unverbrannten Kohlenwasserstoffe, sind durch Oxidation in einem Katalysator leicht abbaubar sowie natürlich auch die gasförmigen Kohlenwasserstoffe HC und das Kohlenmonoxid CO. Der Einsatz eines Oxidationskatalysators im Dieselmotor scheitert jedoch an der Tatsache, dass der im Treibstoff enthaltene Schwefel (zurzeit noch bis 0,2%) auch aufoxidiert wird und mit Wasserdampf unerwünschte Schwefelsäure bildet. Nicht so beim Biodiesel, denn dieser enthält keinen Schwefel! Dass damit der Biodiesel ein eigentlicher «Katalysatortreibstoff» ist, belegen die Messwerte in Abbildung 8: Die CO- und HC-Emissionen werden

durch den Katalysator dermassen reduziert, dass sie nur gerade noch 10% des zulässigen Grenzwertes erreichen. Dies wäre auch beim Dieseltreibstoff der Fall, kann aber nicht ausgenützt werden, weil gleichzeitig der Partikelaustritt auf mehr als das Dreifache ansteigt. Im Biodieseltreibstoff wird durch den Katalysator auch die Partikelemission halbiert. Bezüglich der NO_x-Werte bleibt der Oxidationskatalysator unwirksam.

Die Bereitstellung und Verbreitung von schwefelarmem Dieseltreibstoff (S < 0,05%) ist 1992 unerwartet schnell vor sich gegangen und erleichtert damit die Verwendung von Katalysatoren. Der Partikelaustritt wäre mit diesem Treibstoff nicht mehr dermassen überhöht. Die Entschwefelung erfordert allerdings relativ aufwendige und energieintensive Anlagen, die den Dieseltreibstoff um 3 bis 5 Rp/l verteuern.

Praxisversuche

Problemloser Betrieb

Der praktische Einsatz der Traktoren JOHN DEERE und STEYR auf dem Haldenhof verlief während der fast drei Jahre ohne grössere Probleme, die tägliche Arbeit konnte immer unbeeinträchtigt verrichtet werden.

Am Ende der Einsatzzeit wurden bei beiden Traktoren die Zylinderköpfe, die Ölwanne sowie die Einspritzdüsen demontiert. Beim JOHN DEERE hatte sich stellenweise auf den Kolbenböden und an den Zylinderköpfen eine dünne, weiss-bräunliche Schicht abgelagert, die bei Dieseltreibstoff nicht vorkommt. In einer ausländischen Untersuchung [1] ist diese ebenfalls festgestellte Ablagerung beschrieben. Demnach handelt es sich um anorganische Verbrennungsrückstände, die bisher keine bekannten Auswirkungen auf den Motorbetrieb hatten. Im übrigen waren weder abnormale Verschmutzung noch Verschleiss festzustellen.

Bei den Verkehrsbetrieben der Stadt Zürich (VBZ) gingen im August 1991 vorerst vier Busse mit Biodiesel in Betrieb, vom fünften befand sich der Motor noch auf dem Prüfstand. Anfänglich erfolgte ein konzentrierter Einsatz auf einer relativ kurzen Linie mit häufigen Haltestellen. Sehr bald gingen Reklamationen wegen des Geruchs

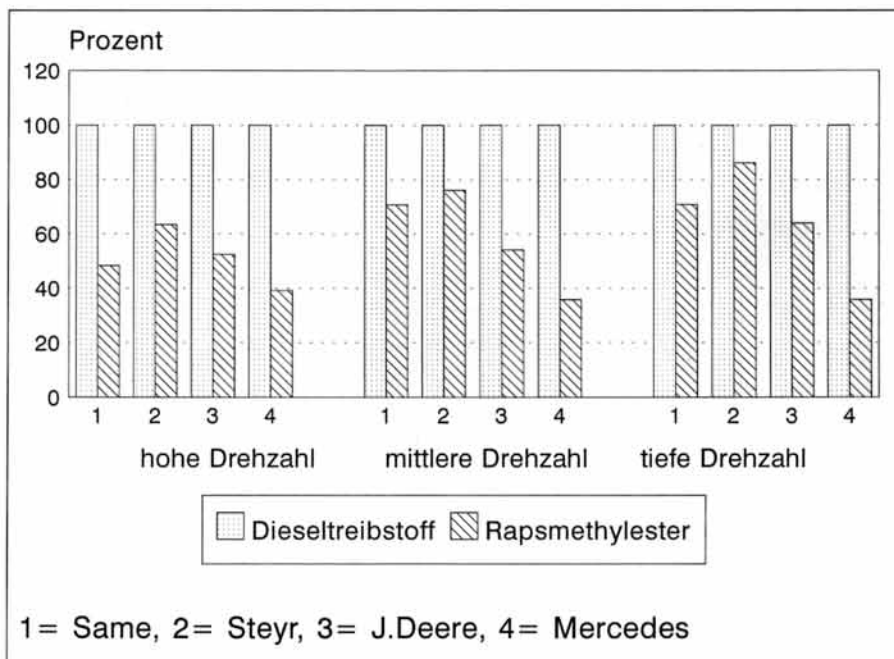


Abb. 6: Vollast-Rauchmessungen nach BAV mit Diesel und RME

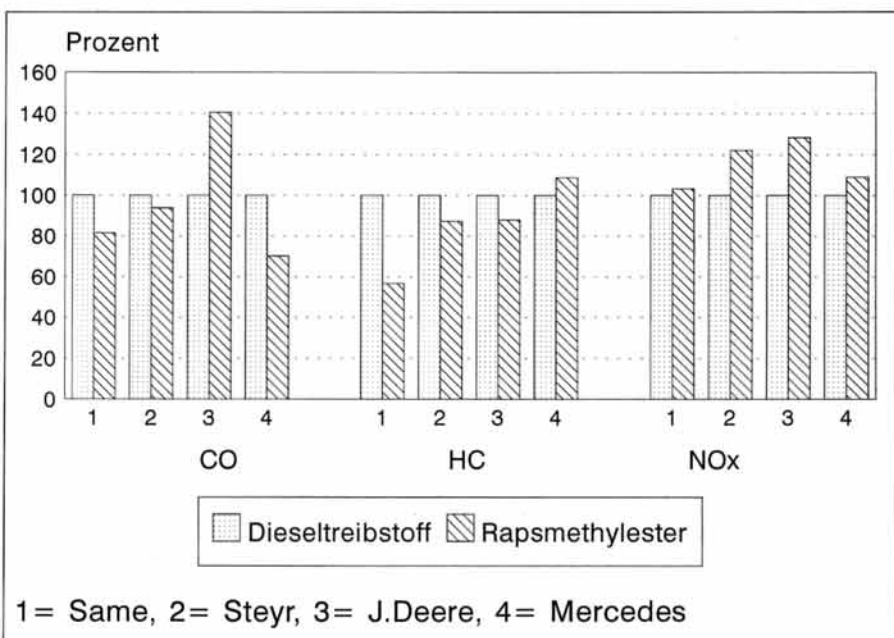


Abb. 7: Gasförmige Emissionen im 13-Stufentest mit Diesel und RME

Tabelle 2: Praxiseinsatz von Traktoren mit RME

Traktor	Betriebsstunden	RME-Verbrauch	Liter/Stunde
JOHN DEERE	1344 Stunden	5561 Liter	4.14
STEYR	820 Stunden	1932 Liter	2.36
Total	2164 Stunden	7493 Liter	

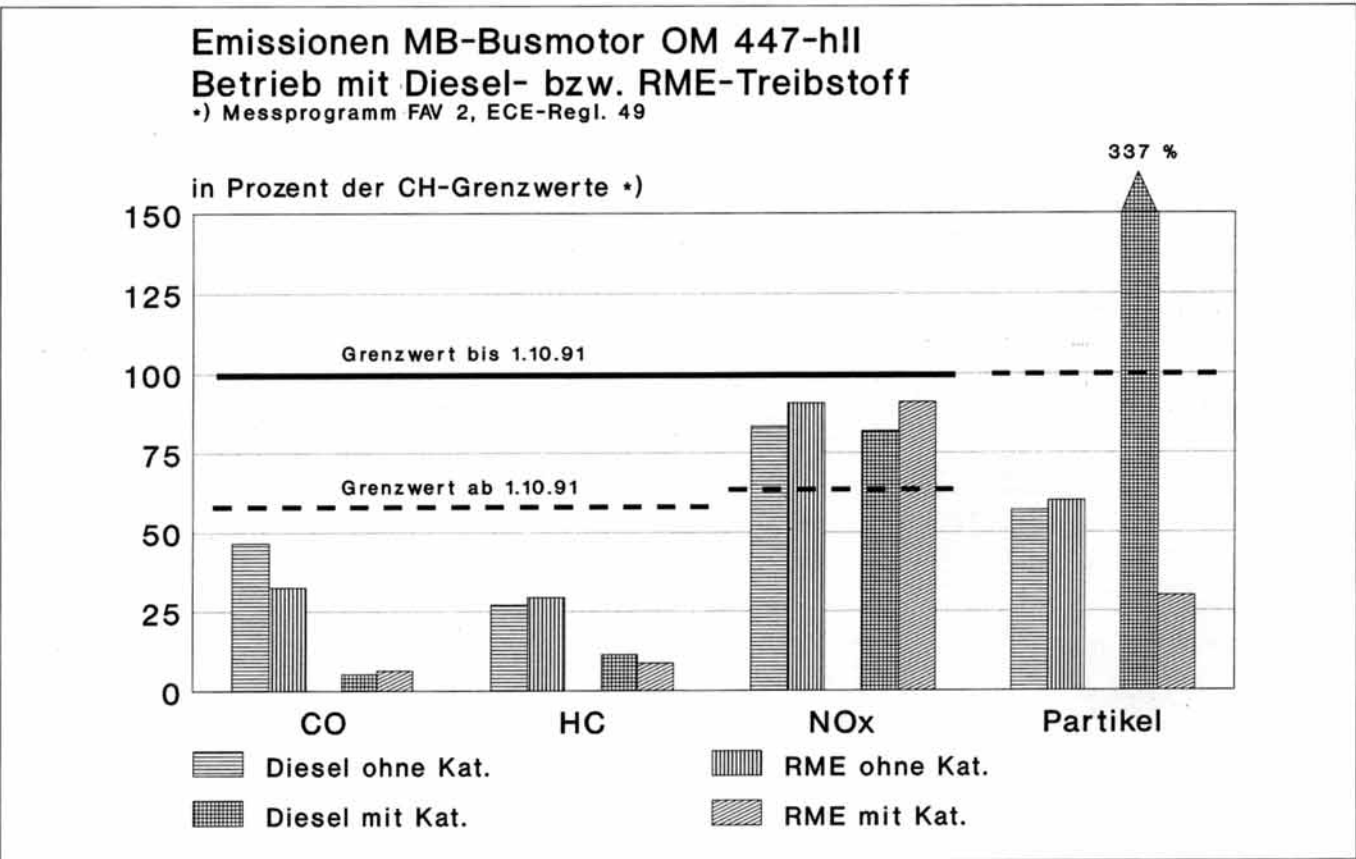


Abb. 8: Emissionen des Busmotors im 13-Stufentest mit und ohne Katalysator mit Diesel und RME

ein, weshalb der Einsatz auf das ganze Niederflurbusnetz ausgedehnt wurde. Zum Vergleich diente eine Gruppe von sieben identischen Bussen mit Dieseltreibstoff. Vom November 1991 bis Mai 1992 lief auch ein Gelenkbus mit aufgeladenem Motor mit Biodiesel, weil damals nur für diesen Typ ein Katalysator zur Verfügung stand. Im März 1992 konnte dann auch der fünfte Versuchsbus in Biodieselsbetrieb gehen. Nach der Demontage eines Motors (Bus Nr. 240) konnte nichts Aussergewöhnliches festgestellt werden. Zylinderbüchsen, Kolben, Zylinderköpfe, Ventile, Einspritzdüsen usw. waren sehr sauber. Auch die weiss-bräunlichen Ablagerungen, wie sie beim JOHN DEERE auftraten, waren nicht vorhanden.

Geringe Schmierölverdünnung

Sehr kleine Mengen Treibstoff gelangen beim Motorbetrieb jeweils ins Schmieröl. Bei den konventionellen Treibstoffen verdampfen die niedrig siedenden Anteile bei Betriebstemperatur, so dass die sogenannte Schmierölverdünnung problemlos beherrscht wird. Da das Siedeverhalten von RME anders – bei höheren Temperaturen –

Tabelle 3: Praxiseinsatz von Bussen mit RME

	Bus 238	Bus 239	Bus 240	Bus 241	Bus 242	Bus 573
15.8.91	Start (28472km) Linie 768	Start (31094km) Linie 75	Start (31349km) Linie 75	Start (27747km) Linie 75		
Okt. 91	Treibstoffschläuche ersetzt					
Okt. 91	Streckeneinsatz nach Bedarf					
20.11.91						Start mit Kat. (181724)
22.1.92			Kaltstart- versuch im Freien			
29.1.92				Kat.einbau		
24.3.92					Start mit Kat. (1986km)	
5.5.92			Kat.einbau			Versuchs- ende
Sept.92	Versuchsende					
Strecke km	46'695	58'939	58'985	58'456	24'364	27'740
Biodiesel Liter	20'871	27'632	27'688	26'961	11'504	16'104
Verbr. l/100km	44,70	46,88	46,94	46,12	47,22	58,05
Total ohne Bus 573	247'439 km 114'658 l 46,34 l/100 km					

als bei Diesel ist, wurden Schwierigkeiten wegen dieser Schmierölverdünnung befürchtet.

Im Praxisversuch mit den zwei Traktoren erwartete man Aufschluss aus den Ölanalysen, die ungefähr alle 50 Betriebsstunden durchgeführt wurden. Der Verlauf der Viskosität und der TBN (Total Base Number) während drei bzw. vier Ölwechselintervallen sind in Abbildung 9 dargestellt. Der dramatische Abfall der beiden Kenngrößen im dritten Intervall beim JOHN DEERE war auf eine gebrochene Membran der Treibstoffförderpumpe zurückzuführen, wodurch Treibstoff auf dem direkten Weg ins Motorenöl gelangen konnte. Nach der Behebung des Schadens stellte sich wieder das normale, unproblematische Verhalten ein.

Bei den VBZ-Bussen erfolgte die Probenahme alle 7500 km, nach 30 000 km wurde das Öl gewechselt. Abbildung 10 zeigt, dass der RME-Gehalt nie mehr als harmlose 5% erreichte und die Viskosität des Motorenöls sich bei etwa 11,5 mm²/s stabilisierte. Dieses Verhalten ist teilweise durch die Ölnachfüllmenge zu erklären, die bei einem Verbrauch von 0,7 l/1000 km während eines Ölwechselintervalls etwa einer ganzen Neufüllung entspricht.

Kaltstarteigenschaften bislang unbefriedigend

Wegen der milden Temperaturen in der Versuchszeit traten wenig Einschränkungen infolge der bekannten, schlechten Wintertauglichkeit des RME auf. Immerhin bestätigte sich sowohl im Traktor- als auch im Buseinsatz, dass bei Temperaturen von -6 bis -8 °C die Motoren, falls sie überhaupt gestartet werden können, kein Gas annehmen und bald «verhungern», weil der Treibstofffilter verstopft. Die Filtrierbarkeitsgrenze ist diesbezüglich wohl die wichtigste Grösse, die im Labor analytisch bestimmt wird. Diese betrug bei allen Proben zwischen -7 und -15 °C und konnte bislang durch kein Additiv weiter gesenkt werden.

Aggressivität von Biodiesel

Im praktischen Umgang mit Biodiesel bestätigte sich bereits an den Treibstoffkanistern der FAT und später auch an den Traktoren und an der provisorischen

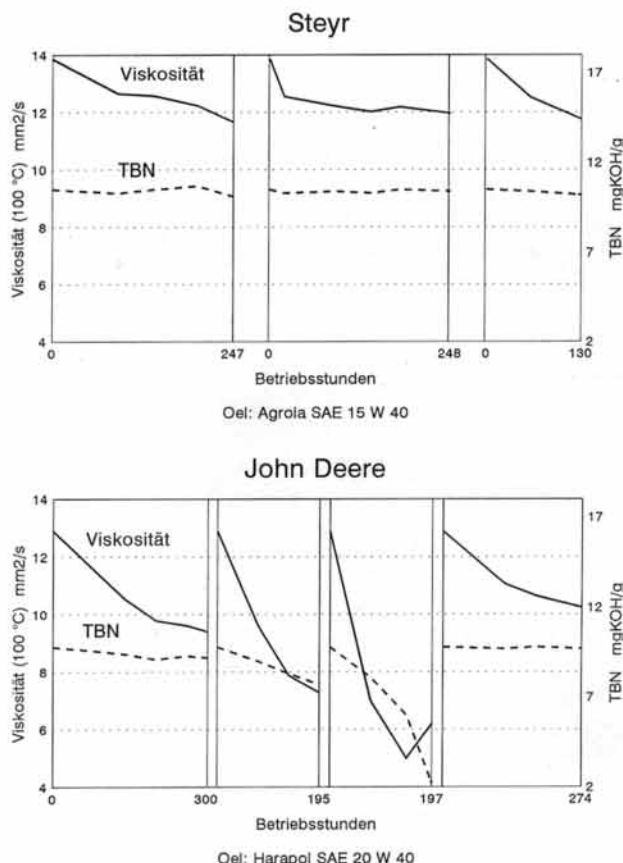


Abb. 9: Ölverdünnung bei den Traktormotoren während drei bzw. vier Ölwechselintervallen

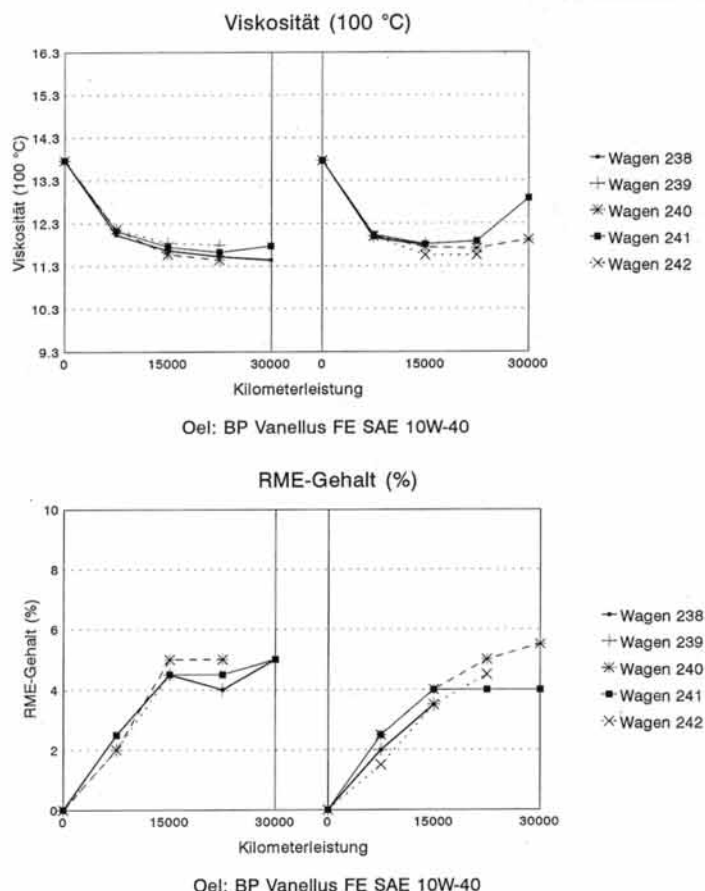


Abb. 10: Ölverdünnung bei fünf Busmotoren während zwei Ölwechselintervallen

schen Betankungsanlage der VBZ, dass übliche Farblackierungen gegen RME nicht resistent sind. Versuche an vier verschiedenen Lacksystemen zeigten offensichtlich die Unbeständigkeit von Einkomponentenlacken, wogegen sich Zweikomponentenlacke, besonders der 2-K PUR-Lack, als biodiesel-fest erwiesen. Auch normale Innenanstriche für Diesellagertanks, die während eines Jahres geprüft wurden, hielten dem Angriff nicht stand und lösten sich ab. Gewisse Polyesterbeschichtungen erweichten und wurden klebrig, dagegen zeigten Epoxybeschichtungen, wie sie auch in Tanks für bleifreies Benzin verwendet werden müssen, keine Mediumseinwirkungen. Nachdem erst nach längerer Zeit an einem Traktor ein Treibstoffschlauch gewechselt werden musste, zeigte sich die Unverträglichkeit von Polymerwerkstoffen bei den Bussen sehr schnell. Alle Treibstoffschläuche, bedingt wohl durch die hohe Temperatur (100 °C) in der Kapselung des Unter-

flurmotors, mussten bereits nach fünf Wochen ersetzt werden. In der Folge erwiesen sich sowohl die (sehr teuren) gepanzerten Teflonschläuche als auch Fluorkautschukschläuche (Viton) als resistent. Gemäss Laborversuchen bei erhöhter Temperatur widerstehen auch Polyamide (PA), bedingt auch Polyethylen (PE) dem RME, nicht aber Nitrilkautschuk (NBR).

Geruchsprobleme lösbar

Sehr bald nach Versuchsbeginn mit den Bussen in Zürich häuften sich die Klagen über den Geruch der Abgase, hauptsächlich seitens des Fahr- und Werkstattpersonals. Die Lage verschärfte sich rasch, Busse mussten auf Verlangen während des Einsatzes ausgetauscht werden, einzelne Fahrer beklagten sich über Kopfschmerzen und Übelkeit, hervorgerufen durch den Abgasgeruch. Abhilfe war dringend gefordert und möglich: mit dem Oxidationskatalysator. Als Hauptverursacher

des unangenehmen Ölgeruchs wird eine bestimmte Komponente von unverbrannten Kohlenwasserstoffen – das Acrolein – vermutet, die durch den Katalysator abgebaut wird. Das Ergebnis des Katalysatoreinbaus war eindeutig: Die Fahrer äusserten sich sehr positiv über diese Lösung und konnten nicht mehr feststellen, ob sie einen Diesel- oder Biodieselbus fahren. Allerdings bleibt nach wie vor der Geruch in der Einstellhalle nach der morgendlichen Ausfahrt der Wagen, denn bei kaltem Motor ist der Katalysator für kurze Zeit noch nicht wirksam.

Energiebilanz und CO₂-Kreislauf

Verschiedenenorts wurde die Energiebilanz des Treibstoffs RME gerechnet. Eine detaillierte Übersicht enthält die Arbeit von R. Studer und U. Wolfensberger [5]. In Abbildung 11 ist die Energiebilanz nach FAT-Rechnung darge-

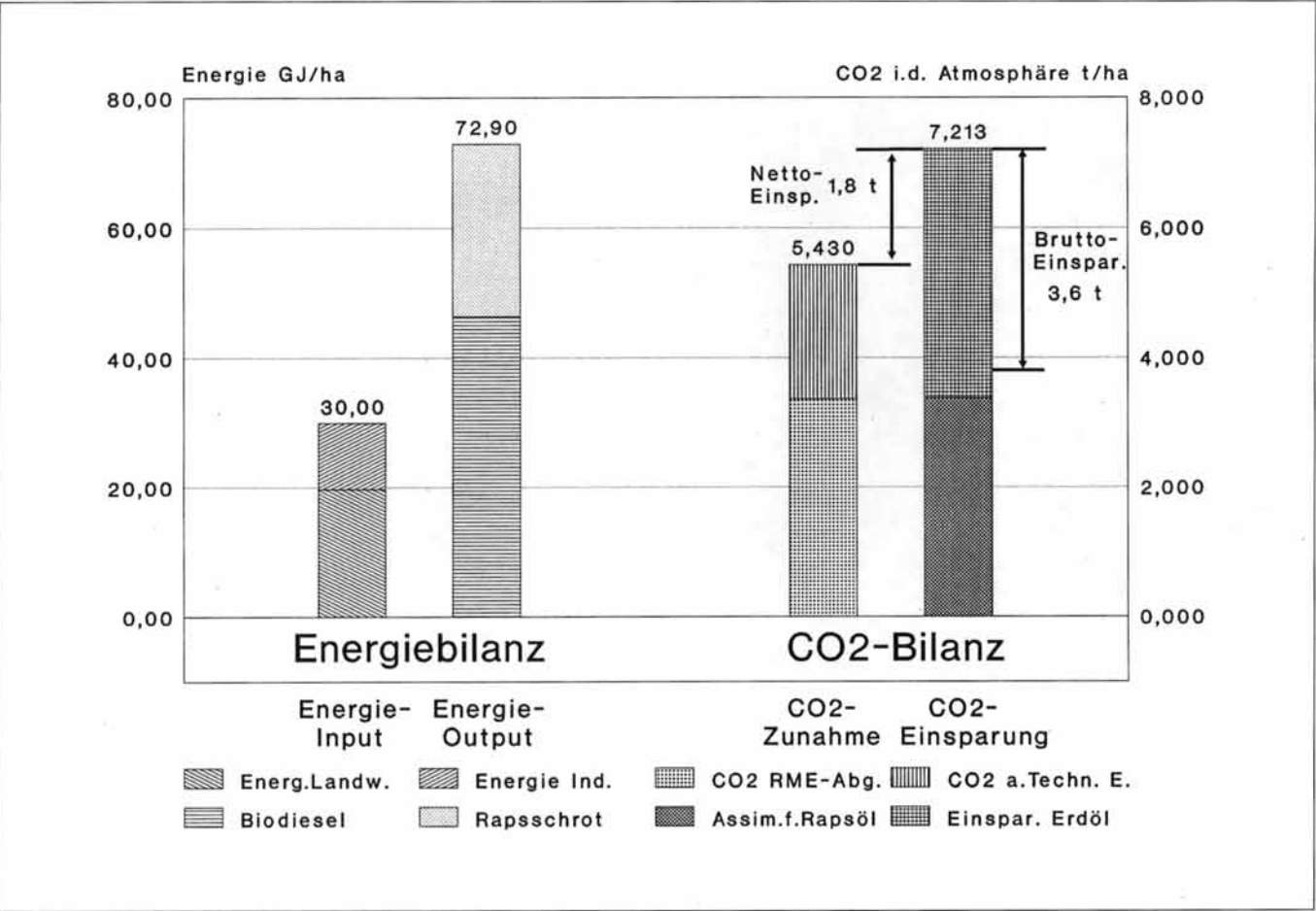


Abb. 11: Energie- und CO₂-Bilanz von Biodiesel

stellt, wobei auf der Aufwandseite sowohl die gesamte landwirtschaftliche Produktion (inkl. Dünger und Spritzmittel) als auch die industrielle Verarbeitung berücksichtigt ist und auf der Ertragsseite neben der Biodieselenergie auch der Energieinhalt des Rapschrots und des Glycerins mitgerechnet wird. In allen betrachteten Fällen ist die Energiebilanz deutlich positiv; mit jeder aufgewendeten Energieeinheit lassen sich im Mittel aller Studien ca. zweieinhalb neue Energieeinheiten gewinnen.

Die CO₂-Bilanz basiert im wesentlichen auf der Energiebilanz. Die Menge CO₂, die bei der Verbrennung des RME entsteht, wird durch das Wachstum der Pflanze wieder vollständig aufgenommen, so dass eigentlich die durch das Rapsöl ersetzte Erdölmenge und deren CO₂-Ausstoss eingespart werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass zur RME-Produktion auch Energie gebraucht wird, bei deren Erzeugung wiederum CO₂ freigesetzt wird. Die so gerechnete Nettoeinsparung des CO₂-Ausstosses beträgt 1,8 t pro ha Raps. Auf dieser Fläche würde jedoch, wenn nicht Raps, dann eine andere Pflanze angebaut, deren Produktion auch Energie braucht und damit CO₂ freisetzt. Diese von der betrachteten Kultur abhängige Menge ist zur Nettoeinsparung zu addieren, so dass die Brutto-CO₂-Einsparung mindestens etwa 2 t pro ha beträgt. Vergleicht man die RME-Produktion mit der Speiseölproduktion, errechnet sich eine Bruttoeinsparung von 3,6 t pro ha (Abb. 11).

Kosten

In der Schweiz ist der Rapsanbau für Speiseöl kontingentiert und subventioniert. Der Preis – derzeit Fr. 2.05/kg Rapssaat – wird vom Bund festgelegt, ist also kein Preis des freien Handels. Auf solchen Grundlagen errechnete RME-Kosten können also keinesfalls mit dem Diesel-Handelspreis konkurrieren. Für einen Vergleich muss der Welthandelspreis für Raps von ca. 27 Rp/kg zugrunde gelegt werden. Geht man im weiteren von der industriellen RME-Produktion in einer 20000 t/Jahr-Anlage aus, werden sich die Kosten nach Abzug der Nebenprodukterlöse auf etwa 90 bis 95 Rp/l RME belaufen.

Wenn für biogene Treibstoffe in Anlehnung an die entsprechende EG-Regelung nur höchstens 10% der üblichen Treibstoffsteuer erhoben werden, ist Biodiesel durchaus konkurrenzfähig, insbesondere wenn der für 1993 vorgeschlagene zusätzliche Grundzollzuschlag auf fossile Treibstoffe von 20 Rp/l eingeführt wird.

Auf der Erzeugerseite hätte der Bauer mit dem Weltmarktpreis von 27 Rp/kg Rapssaat nur gerade einen Erlös von knapp 800 Franken/ha Raps. Erhielte der Landwirt vom Bund die gleiche Flächenprämie für Nachwachsende Rohstoffe wie für Grünbrache, käme er mit dem Beitrag 1992 auf einen Ertrag von rund 4600 Franken/ha, d.h. weniger als für Speiseölraps. Die Agrarkasse des Bundes würde aber nicht mehr belastet als bei der Grünbrache.

Für diese Rechnung wurde die Produktion in einer industriellen Umestierungsanlage mit einer Kapazität von 20000 t/Jahr RME zugrunde gelegt, was die kurzfristige Ausnützung des gesamten zusätzlichen Rapspotentials der Schweiz von 17000 ha bedingte. Die RME-Produktion in einer kleineren Industrieanlage, zum Beispiel der halben Kapazität, was eine Einführung in vorerst reduziertem Umfang erlaubte, erhöht die Kosten stark. Damit schwinden die Realisierungschancen einer industriellen RME-Produktion.

Eine Möglichkeit, in der Schweiz dennoch Biodiesel zu erzeugen, besteht in sogenannten «Kleinanlagen», wie bereits drei in Österreich betrieben werden. Auf genossenschaftlicher Basis verarbeiten einige hundert Bauern ihren Raps in einer Anlage von 500 bis 1000 t/Jahr und verwerten die Produkte – Biodiesel und Rapskuchen – auf dem eigenen Landwirtschaftsbetrieb. Die damit wegfallenden Handelsmargen, Transport- und Lagerkosten könnten in etwa die höheren Betriebskosten einer Kleinanlage gegenüber einer Grossanlage decken. Voraussetzung für eine bäuerliche Rechnung dieses Modells ist ebenfalls die Flächenprämie in gleicher Höhe wie die Grünbracheprämie. Könnte im weiteren mit dem vollen Tankstellenpreis für den Treibstoff von derzeit Fr. 1.04/l, oder ab 1993 gar mit Fr. 1.24/l gerechnet werden, statt mit den zollbegünstigten 60 Rp/l, ergäbe sich für den Landwirt etwa ein gleich hoher Hektarerlös wie beim Modell der industriellen Umestierungsanlage.

Der Erfolg einer Biodieselproduktion in der Schweiz hängt also in beiden Fällen – ob Klein- oder Grossanlage – von der Gewährung einer Flächenprämie für Nachwachsende Rohstoffe in der Höhe der Grünbrachenprämie und von der Handhabung des Treibstoffzolls (bzw. der Treibstoffsteuer) für biogene Treibstoffe ab.

Literatur

- [1] Richter H., 1991. Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Abschlussbericht TV 8837 der Porsche AG im Auftrag des BMFT.
- [2] Elsbett L. et al, 1983. Alternative Fuels on a Small High Speed Turbocharged D.I. Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 830556.
- [3] Wolfensberger U., Stadler E., Walter Th., 1991. Rapsöl für Dieselmotoren – motortechnischer Vergleich mit herkömmlichem Treibstoff. Landwirtschaft Schweiz, Band 4 (12).
- [4] Walter Th., 1992. Untersuchung des Emissionsverhaltens eines Nutzfahrzeugmotors bei Betrieb mit Rapsölmethylester. EMPA Bericht Nr. 133 439.
- [5] Studer R., Wolfensberger U., 1991. Energie- und CO₂-Bilanzen über den Alternativ-Treibstoff Biodiesel. Landwirtschaft Schweiz, Band 4 (12).
- [6] Elektrowatt/Novamont, 1992. Produktion von Rapsmethylester in der Schweiz, Vorstudie im Auftrag des BEW und BLW.