

Emissionen bei der Verwendung von Rapsöl, RME oder Dieselkraftstoff sowie vergleichende Abschätzung ihrer Umweltwirkungen - eine Übersicht *)

JÜRGEN KRAHL, AXEL MUNACK und MÜFIT BAHADIR

Institut für Biosystemtechnik

*) Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Vellguth zum 60. Geburtstag gewidmet

1 Einleitung

Die Nutzung von Rapsölkraftstoffen in Dieselmotoren wird seit der Energiekrise vielerorts intensiv bearbeitet. Anfangs standen dabei die technischen Möglichkeiten im Vordergrund. Nachdem erwiesen war, daß reines Rapsöl nur in speziellen Motoren eingesetzt werden kann, aber Rapsölmethylester (RME) anstelle von Dieselkraftstoff (DK) in konventionellen Motoren verwendbar ist (Vellguth, 1982), beschäftigten sich weiterführende Studien mit den durch die Pflanzenölkraftstoffe hervorgerufenen Emissionen. Dabei galt ihr Interesse zunächst den für Pkw und Lkw gesetzlich limitierten Abgasbestandteilen Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x) sowie dem Rußausstoß (Vellguth, 1987). Diese Komponenten, teilweise ergänzt durch die Partikelemission, wurden bereits in einer großen Zahl von Untersuchungen und auf der Basis unterschiedlicher Motor- testverfahren ermittelt. Eine Reihe von hauptsächlich in jüngerer Zeit erschienenen Publikationen haben darüber hinaus die vergleichende Bestimmung der umweltrelevanten aber bisher gesetzlich nicht limitierten polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), der Aldehyde, der Ketone und vereinzelt der Aromaten zum Inhalt. Über den Butadien- ausstoß, der gemäß dem US-Clean Air Act neben den Emissionen von Benzol, Formaldehyd, Acetaldehyd und polycyclischem organischem Material ebenfalls zu den hauptsächlich toxischen luftgetragenen Abgaskomponenten zählt (Gorse et al., 1991), sind für Rapsöl oder RME derzeit keine Ergebnisse bekannt. Ebenfalls ist bislang auch der Einfluß der Rapsölkraftstoffe auf die Photosmogbildung unbekannt, dessen Hauptkomponente das bei Lichteinstrahlung bodennah gebildete Ozon ist. Unbestrittene Vorteile der Rapsölkraftstoffe liegen dagegen in der Schwefelfreiheit der Emissionen und dem verminderten atmosphärischen CO₂-Eintrag bei ihrer Verbrennung.

Eine tendenzielle Abschätzung der Umweltwirkungen, die die Emissionen aus mit Rapsöl bzw. RME betriebenen Dieselmotoren hervorrufen, kann in einem ersten Schritt durch den relativen Vergleich mit DK vorgenommen werden. Eine weiterführende Unit-Risk-Abschätzung zur Ermittlung von Wirkungspotentialen, wie sie unlängst im Umweltgutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen (1994) für Otto- und Dieselfahrzeuge vorgestellt wurde, bleibt späteren Studien vorbehalten.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die von unterschiedlichen Autoren publizierten Emissionsmessungen möglichst umfassend zusammenzustellen, ihre Ergebnisse zu vergleichen und - sofern möglich - allgemein gültige Tendenzen aufzuzeigen. Zur Einordnung und Bewertung der Aussagen ist zunächst eine Darstellung der verwendeten Versuchsbedingungen, also der Motortestverfahren, erforderlich (Kap. 2). Weiterhin muß der derzeitige Kenntnisstand über die Umweltwirkungen der Abgaskomponenten erfaßt werden (Kap. 3), um die Meßwerte hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz beurteilen zu können. Kap. 4 enthält die Zusammenstellung der Messungen, die dann in Kap. 5 hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz abschließend diskutiert werden, wobei auch einige offene Probleme aufgezeigt werden, hinsichtlich derer noch Forschungsbedarf besteht.

2 Motortestverfahren

Motoren emittieren Schadstoffe in Abhängigkeit von Last und Drehzahl. Aussagen über das Emissionsverhalten verschiedener Motore oder Kraftstoffe sind daher nur möglich, wenn definierte Motortestverfahren zugrunde gelegt sind. Für Pkw werden hauptsächlich Testcyclen verwendet, die Stadtfahrt- und Autobahnfahrtanteile beinhalten. Die hauptsächlich verwendeten Testcyclen sind zur Zeit der amerikanische FTP-75-Test (Federal Test Procedure), der eine typische Stadtfahrt in Los Angeles (City und Highway) simuliert (Code of Federal Regulations) und der seit dem 1.1.1993 um einen Anteil mit höherer Geschwindigkeit ergänzte europäische ECE-15-Test (ECE = Economic Commission for Europe), der auf die Verkehrsverhältnisse in Europa abgestimmt ist und als MVEG-A-Test (Motor Vehicle Emissions Group) bezeichnet wird.

Die Ergebnisse von Abgasmessungen aus diesen Testverfahren sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Fahr- cyclen den Motor unterschiedlich belasten. So werden gesetzlich limitierte Emissionsgrenzwerte immer auf den eingesetzten Test bezogen (Schäfer, 1991). Einen anschaulichen Vergleich der Ergebnisse des FTP-75- und des ECE-15- Tests zeigt Tabelle 1. Ein Fahrzeug wurde mit Rapsöl und Dieselkraftstoff betrieben und jeweils beiden Fahr- cyclen unterzogen, wobei die Emissionswerte der Rapsölverbrennung auf den jeweiligen Wert bei DK (100 %) bezogen sind (Menrad et al., 1989). Die signifikanten Unterschiede der Einzelwerte heben den Einfluß des Motortestverfahrens auf die Ergebnisse klar hervor. Es ist daher erforderlich, bei der Angabe ermittel-

	FTP-75	ECE-15
HC	230	162
CO	185	214
NO _x	97	94
Partikeln	267	320
CO ₂	107	112
Benzo(a)pyren (BaP)	141	169
Pyren	260	302
Fluoranthen	212	308
Σ PAK	189	271
Formaldehyd	286	289
Acetaldehyd	402	293
Acrolein	825	575
Σ Aldehyde	382	336

Tabelle 1: Abgasemission (%) bei Betrieb eines Fahrzeugs mit Rapsöl bezogen auf Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff unter Anwendung des FTP-75- und des ECE-15-Tests

ter Emissionswerte und ihrem Vergleich mit Grenzwerten den verwendeten Testzyklus mit anzugeben.

Für Lkw existieren weltweit ebenfalls unterschiedliche Testverfahren. In der EU werden Lkw nach dem aus 13 Punkten bestehenden stationären Prüfzyklus ECE R49 auf ihre Emissionen untersucht. Dieser Test beschreibt die Motorbeanspruchung im Stadtbetrieb und berücksichtigt die europäische Fahrweise und Auslegung der Fahrzeuge (Fränkle und Stein, 1988). Bild 1 zeigt die gewählten Betriebspunkte im Motorkennfeld und die Anteile ihrer Wichtungen. Der Leerlaufpunkt wird während der Testprozedur dreimal eingestellt und geht jeweils zu 8 1/3 % in die Auswertung ein.

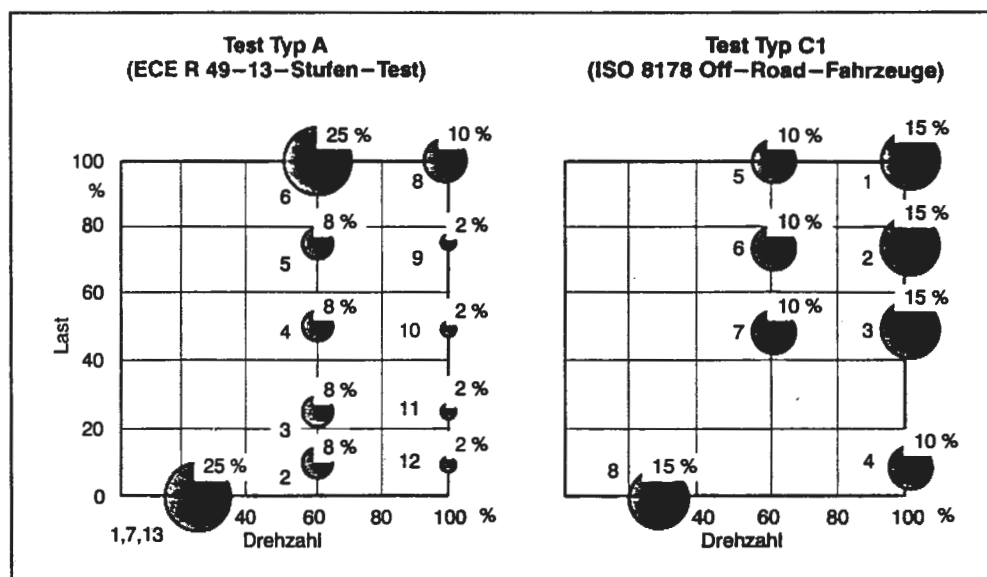


Bild 1: Die Lastpunkte des 13- und des 8-Stufen-Tests

Lkw- und Pkw-Testcyclen sind zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von Ackerschleppern nicht geeignet, da der simulierte Stadt- und Autobahnbetrieb nicht dem Einsatz landwirtschaftlich genutzter Fahrzeuge entspricht. Dem praktischen Einsatz angepaßt ist der von Vellguth (1987) erstmalig zur Emissionsmessung an Schleppern eingesetzte stationäre 5-Punkte-Test. Dieser beruht auf einer Untersuchung von Welschhof (1981), nach der die typischen landwirtschaftlichen Arbeiten fünf bestimmten Punkten des Motorkennfeldes zuzuordnen sind.

Für die Zertifizierung landwirtschaftlich genutzter Motoren wird derzeit ein 8-Stufen-Test von der International Organization for Standardization (ISO) diskutiert, der auf der Grundlage des 13-Stufen-Tests entwickelt wurde. Wie in Bild 1 ersichtlich ist, werden bei diesem Test neben dem Leerlauf nur zwei weitere Motordrehzahlen berücksichtigt. Es bleibt vorerst zu prüfen, ob der nach dem ISO-Entwurf 8178-C1 vorgeschlagene Zyklus neben der Zertifizierung auch zur Abschätzung der durch die Landwirtschaft hervorgerufenen tatsächlichen Emissionen herangezogen werden kann.

Zusammenfassend ist im Blick auf die Vergleichbarkeit der durch verschiedene Testverfahren ermittelten Emissionswerte festzustellen, daß ein direkter Vergleich der Absolutwerte nicht zulässig ist. Daher werden im folgenden die vielerorts ermittelten Ergebnisse in Abhängigkeit vom verwendeten Motortestverfahren dargestellt.

3 Umweltwirkungen der hauptsächlich untersuchten Abgaskomponenten

Die Wirkungen von Abgaskomponenten sind seit langer Zeit Gegenstand der Forschung. An dieser Stelle werden die zu erwartenden Wirkungen nur in verkürzter Form dargestellt. Differenziertere Informationen können der umfangreichen Literatur zum Thema entnommen werden. Auszugsweise sind die Studien Länderausschuss für Immissionsschutz (1992), Lenz et al. (1993), Krahl et al. (1994) und Sachverständigenrat für Umweltfragen (1994) zu nennen.

3.1 Gasförmige limitierte Komponenten HC, CO und NO_x

Die durch den Kraftfahrzeugverkehr hervorgerufenen Kohlenwasserstoffemissionen können toxikologisch wenig relevant sein (Alkane und Alkene wie Methan, Ethan oder Ethen) oder aber kanzerogen wirken (Benzol, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe). Letztere werden

im folgenden gesondert behandelt. Einige Kohlenwasserstoffe sind darüber hinaus in der atmosphärischen Chemie von Bedeutung (s. Kap. 3.3).

Die durch die motorische Verbrennung entstehenden Kohlenmonoxidemissionen sind mit Ausnahme der Vergiftungsgefahr in geschlossenen Räumen oder Garagen im Blick auf die sonstigen durch den Kraftfahrzeugverkehr hervorgerufenen Umweltbelastungen ohne Bedeutung (Henschler, 1994).

Stickoxide tragen zur Bildung acider Niederschläge und in Verbindung mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen oder Aldehyden bei Sonneneinstrahlung zur bodennahen Ozonanreicherung bei (s. Kap. 3.3). Bei derzeit verkehrsbedingt üblichen Stickoxidkonzentrationen ist NO ohne Gesundheitsrelevanz. NO₂ ist dagegen ein Lungenreizgas, das bereits in geringen Dosen die Membranen der menschlichen Lungenbläschen attackiert (Henschler, 1994).

3.2 Aromaten, PAK und Dieselruß

Benzol, Toluol, Xylole und Ethylbenzol sind die Aromaten, die bei den mit Rapsölkraftstoffen betriebenen Motoren hauptsächlich untersucht wurden. Gemäß des US-Clean Air Acts ist Benzol eine besonders umweltrelevante, toxische luftgetragene Komponente (s. Kap. 1). In Deutschland ist Benzol als krebserzeugender Gefahrstoff (Gefahrstoffverordnung, Gruppe II) und als eindeutig krebserzeugender Arbeitsstoff (MAK III A1) ausgewiesen. Die alkylierten Aromaten gelten als wesentlich weniger umweltrelevant hinsichtlich ihrer direkten Wirkung auf den Menschen.

Neben der biologischen Wirkung der Aromaten ist im Blick auf den Kraftfahrzeugverkehr auch deren indirekter Einfluss auf die troposphärische Ozonbildung zu beachten (s. Kap. 3.3). Unter diesem Gesichtspunkt invertieren sich die Bedeutungen von Benzol und dessen Alkylderivaten, da das Ozonbildungspotential von 1 g Benzol gegenüber 1 g 1,3,5-Trimethylbenzol etwa 25fach geringer veranschlagt wird (Carter, 1991). Derzeit liegen kaum Abschätzungen über den Anteil der Aromaten an der bodennahen Ozonbildung durch Dieselmotoremissionen vor.

Die mehrere hundert Verbindungen enthaltende Substanzklasse der kondensierten polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) ist aufgrund ihrer kanzerogenen bzw. mutagenen Eigenschaften zu einer emstzunehmenden Gefahr für Mensch und Umwelt geworden. Die einzelnen PAK besitzen in Abhängigkeit von ihrer Struktur sehr unterschiedliche tumorinduzierende Wirkungen. Während sich Benzo(e)pyren als nicht kanzerogen erwiesen hat, gehört das strukturisomere Benzo(a)pyren zu den im Tierexperiment am meisten krebserregenden Stoffen (Huber et al., 1987). Verschiedene PAK können sich in ihren Wirkungen gegenseitig sowohl hemmen als auch fördern, und somit ist es unmöglich, das kanzerogene Potential eines PAK-Gemisches aufgrund der bekannten Einzelwirkungen abzuschätzen (Heinrich, 1991; Kaschani und Brauns, 1991). In der PAK-Diskussion ist jedoch auch festzustellen, daß nicht der PAK selbst, sondern erst sein

reaktives Stoffwechselprodukt, das PAK-diol-epoxid, ultimativ kanzerogen wirkt (Grover, 1986).

Noch komplexer sind die Zusammenhänge bei der Lungentumorbildung durch Dieselmotoremissionen (DME). An den Dieselrußpartikeln ist nicht nur eine Vielzahl verschiedener PAK adsorbiert, die eine starke krebserzeugende Wirkung haben, sondern es existiert die begründete Annahme, daß der PAK-freie Rußkern ebenfalls Karzinome induziert. In Tierversuchen mit Ratten wurde unlängst gezeigt, daß Rußpartikeln, die nahezu frei von angelagerten organischen Stoffen waren, genauso Lungentumore hervorrufen können wie reale Dieselrußpartikeln und daß somit wahrscheinlich der Rußkern in Verbindung mit den daran angelagerten Substanzen für die Tumorausbildung verantwortlich sein könnte (Heinrich, 1991; Pott, 1991; Boeckh, 1992). Unabhängig von der Frage, ob die PAK, die reine Kohlenstofffraktion oder deren Zusammenwirken die Hauptursache für die Lungenkrebsbildung ist, bleibt festzustellen, daß DME wegen ihres gesundheitsgefährdenden Potentials 1987 durch die Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK-Kommission) als ein für den Menschen kanzerogener Arbeitsstoff (MAK III A2) eingestuft wurden (Henschler, 1987).

3.3 Umweltrelevante Wirkungen der Aldehyde und Ketone

Aldehyde und Ketone sind zu einem großen Teil Verbindungen mit einem stechenden, schleimhautreizenden Geruch. Der bekannteste Vertreter dieser Klasse ist das Formaldehyd, dessen negative Wirkung auf die menschliche Gesundheit als erwiesen gilt. Acrolein, das für den Motorbetrieb mit RME charakteristisch ist (Wurst et al., 1990), gilt ebenfalls als potentielles Kanzerogen (Office of Health, 1990). Diese Effekte sind jedoch nicht allein ausschlaggebend für die Umweltrelevanz der motorisch emittierten Carbonylverbindungen, die ohnehin nur eine kurze Halbwertszeit in der Atmosphäre aufweisen (Lofti et al., 1990). Wesentlich ist jedoch, daß Aldehyde und Ketone in Gegenwart von NO₂ an der Bildung von Photooxidantien in der Luft, dem sogenannten "photochemischen Smog", teilnehmen, deren Hauptkomponente mit einem Anteil bis zu 90 % das Ozon ist (Moussiopoulos et al., 1989; Wagner, 1991).

Im folgenden wird das von Moussiopoulos et al. (1989) ausführlich beschriebene photochemische Reaktionssystem zur Ozonbildung in seinen Grundzügen dargestellt.

Ozon entsteht bei der Reaktion von Sauerstoffmolekülen im Triplett-Zustand:



Sauerstoffatome im Grundzustand werden durch die Photolyse stabiler Moleküle gebildet:

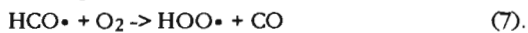


Obwohl die Ozonkonzentration auch durch Deposition oder Reaktionen mit anderen Molekülen gesenkt werden kann, gilt die Oxidation von NO zu NO₂ als der effizienteste Abbau:

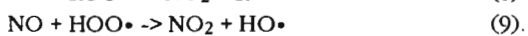


In Abwesenheit weiterer Reaktanden ist ein Gleichgewicht von Ozonbildung (Gln. (1)-(3)) und -abbau (Gl. (4)) erreichbar, dessen Gleichgewichtskonstante bei der real erreichbaren Ozonkonzentration von 100 ppb eine NO_x-Konzentration in der unrealistisch überhöhten Größenordnung von 1000 ppb fordert. Daraus folgt, daß durch weitere Reaktionen überschüssiges Ozon gebildet werden muß.

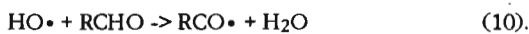
Ein Ozonüberschuß entsteht, wenn bei der Photolyse von NO₂ Ozon gebildet wird, das nicht notwendigerweise bei der NO-Oxidation wieder verbraucht wird. Dieses ist u.a. bei der Photolyse von Aldehyden möglich:



Es werden durch Reaktion mit Sauerstoff Peroxi- und Hydroperoxi-Radikale gebildet, die nun mit NO reagieren und es somit ohne Ozonverbrauch zu NO₂ oxidieren können. Das neu gebildete NO₂ fördert wiederum die Ozonbildung (Gln. (1) und (3)).



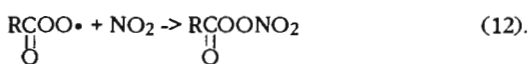
Auch die Hydroxyl-Radikale haben umweltrelevante Wirkungen, da sie u.a. mit Aldehyden zu Acyl-Radikalen reagieren können:



Aus diesen können auch Peroxyacyl-Radikale entstehen:



die mit NO₂ zu den als phytotoxisch bekannten und vermutlich mutagenen Peroxyacylnitraten (PAN) reagieren können (Kirschmer, 1989; Smith et al., 1989):



Neben den aufgeführten Reaktionsmöglichkeiten existiert noch eine Vielzahl anderer Mechanismen (Sattler und Jaeschke, 1990), die an dieser Stelle nicht detaillierter beschrieben werden sollen. Wie die Aldehyde reichern auch die meisten anderen im Abgas vertretenen Kohlenwasserstoffe in Gegenwart von ausreichend NO₂ durch komplexe Kettenreaktionen Ozon in der Atmosphäre an (Moussiopolus et al., 1989). Dabei ist festzustellen, daß der Straßenverkehr in Deutschland (alte Länder) zu ca. 30 % an der anthropogenen Emission flüchtiger Kohlenwasserstoffe beteiligt ist (Reichow, 1992).

In den USA wird derzeit im Automobilbereich der Ozonreduzierung in Ballungsgebieten mehr Interesse entgegengebracht als der CO₂- oder der Energieeinsparung (Krumm et al., 1992). Zur Verminderung der Ozonbelastungen sind vom California Air Resources Board (CARB) für 1994 neue Grenzwerte für den Kohlenwasserstoffausstoß erlassen worden. Dabei wird nicht mehr die Summe aller Kohlenwasserstoffe bewertet, sondern ein methanfreier Anteil (Hockel et al., 1992), da Methan selber nur geringfügig zur Ozonbildung beiträgt (Schäfer, 1991). Die verbleibenden Kohlenwasserstoffe, zuzüglich einiger im Abgas enthaltener Carbonylverbindungen, Alkohole und Ether, werden als NMOG (Non-Methane Organic Gases) bezeichnet und sind ab 1994 für die Fahrzeugflotte jeweils eines Herstellers limitiert (Bayerl et al., 1992; Boyd, 1992). Ein Vorschlag zur spezifizierten Bestimmung der NMOG-Emissionen findet sich in einem Entwurf des CARB (1992).

Grund für das Interesse an der differenzierten Kohlenwasserstoff- und Carbonylbestimmung sind die unterschiedlichen Ozonbildungspotentiale von etwa 150 gasförmigen organischen Verbindungen im Abgas (CARB, 1991a; CARB 1991b). Jeder dieser Komponenten wird vom CARB ein maximaler Ozonvermehrungswert MIR (Maximum Incremental Reactivity) zugeschrieben. Eine Auflistung von MIR-Faktoren ist bei Carter (1991) und Kröll et al. (1993) gegeben.

Über die MIR-Faktoren und die Verbindungen der NMOG-Liste ist es derzeit möglich, unterschiedliche Otto-Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Ozonbildungspotentiale zu vergleichen (Chang und Rudy, 1990; Kröll et al., 1993) und darüber hinaus den Anteil einzelner Abgaskomponenten am Gesamtpotential zu bestimmen. Bei Untersuchungen an einem Dieselmotor konnte gezeigt werden, daß allein Form- Acet- und Propionaldehyd mehr als 40 % des Ozonbildungspotentials ausmachen.

4 Vergleich der Emissionen von Rapsöl, RME und Dieselmotorkraftstoff

4.1 Gasförmige limitierte Abgaskomponenten, Partikelmasse und Rußzahl

Über vergleichende Messungen der limitierten Verbindungen liegt für Rapsöl und RME eine Vielzahl von Veröffentlichungen vor. Da die Quantifizierung von HC, CO und NO_x mittels bewährter, handelsüblicher Gasanalytoren vorgenommen wird, erübrigt sich für diese Komponenten im Blick auf relative Veränderungen die Diskussion der analytischen Verfahren und deren Aussagegehalt. Zur Partikel- und Rußzahlbestimmung existieren ebenfalls standardisierte Methoden mit guter Reproduzierbarkeit. Bei der Erstellung der im folgenden aufgeführten Übersichten wurde teilweise auch auf aktuelle Sekundärliteratur (Scharmer et al., 1993, Irmischer und Jaskulla, 1994) zum Themenkreis zurückgegriffen. Die dort zitierten relativen Emissionsänderungen mußten jedoch nach dem Vergleich mit der Originalliteratur in einigen Fällen korrigiert werden.

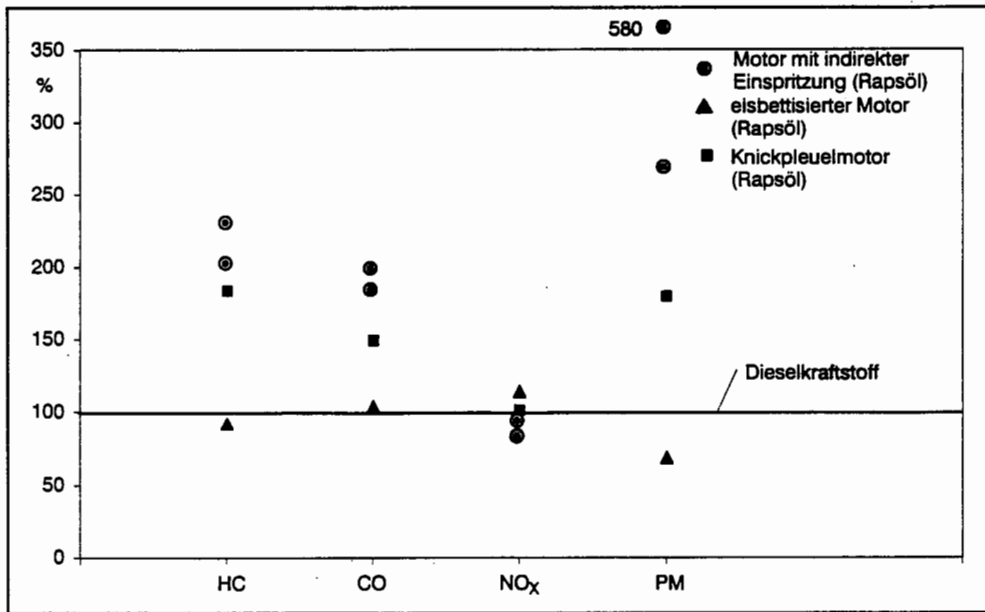


Bild 2: Emission limitierter Verbindungen beim Motorbetrieb mit Rapsöl in relativer Darstellung im FTP-75-Test (DK = 100 %)

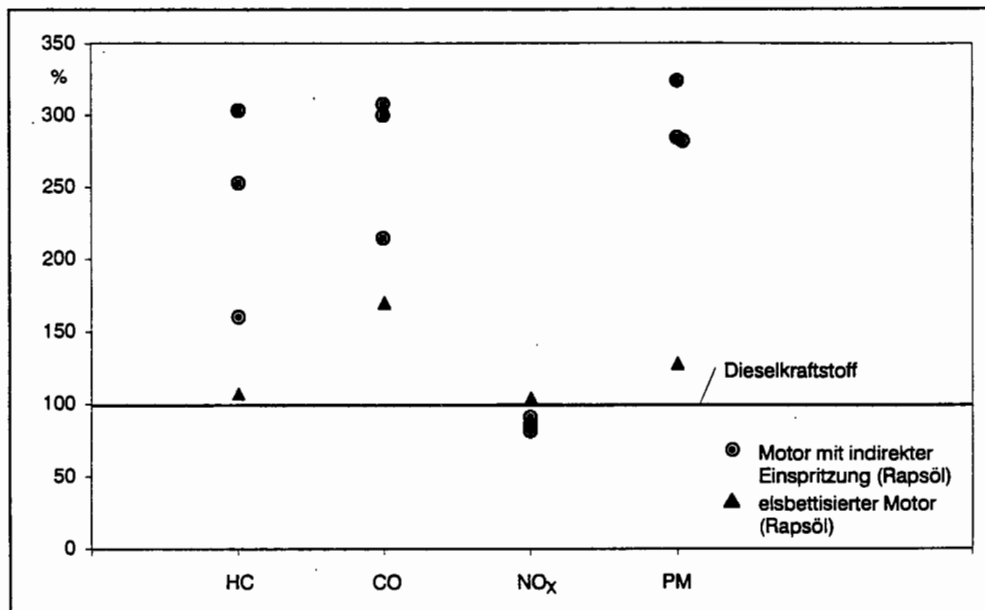


Bild 3: Emission limitierter Verbindungen beim Motorbetrieb mit Rapsöl in relativer Darstellung im ECE-15-Test (DK = 100 %)

4.1.1 Vergleichende Messungen mit DK und Rapsöl

Die Bilder 2 bis 5 zeigen die Ergebnisse für die limitierten gasförmigen Komponenten, die Partikelmasse (PM) und die Rußzahl. Dabei werden jeweils nach dem zugrundeliegenden Testzyklus und dem Motorkonzept in indirekte Einspritzung (IDI), direkte Einspritzung (DI) oder Sonderkonstruktion unterschieden.

Im einzelnen ist der HC-Ausstoß beider Motorkonzepte im FTP-75-Test um etwa 20 % reduziert. Beim 13-Stufen-Test ist für IDI-Motoren im RME-Betrieb eine HC-Minderung um ca. 40 % zu beobachten, während dieser Wert bei DI-Motoren nur um ca. 10 % sinkt.

Vor einer Überinterpretation dieser gefundenen Tendenzen ist jedoch zu warnen, da für DI-Motoren eine wesentlich brei-

Unabhängig vom Testverfahren sind bei der Verwendung von Rapsöl für die gasförmigen Verbindungen einheitliche Tendenzen feststellbar. So steigen HC und CO stark an, wohingegen die NO_x-Werte etwa unverändert bleiben. Bei den instationären Pkw-Testcyclen ist im Rapsölbetrieb ein drastisch erhöhter Partikelausstoß feststellbar. Wird der stationäre 13-Stufen-Test zugrundegelegt, ist größtenteils eine PM-Absenkung in Höhe von ca. 20 % zu beobachten. Um etwa den gleichen Betrag ist auch der Rußausstoß reduziert. Im 5-Punkte-Test ist für Rapsöl eine noch stärkere Rußverminderung um ca. 70 % aufgetreten.

4.1.2 Vergleichende Messungen mit DK und RME

Für RME-betriebene Motoren liegen weit mehr Ergebnisse von Abgasuntersuchungen vor als für den Rapsölbetrieb. Die Bilder 6 bis 11 zeigen die gegenüber DK relativen Änderungen der limitierten Verbindungen und der Rußzahl. Dabei wird nach Motortestverfahren und -konstruktion unterschieden.

Der Vergleich von stationären und instationären Testcyclen zeigt keine signifikanten Unterschiede. Der Einsatz von DI- oder IDI-Motoren läßt für keines der Konzepte eindeutige Vorteile deutlich werden.

tere Datenbasis zur Verfügung steht.

CO ist im Mittel im RME-Betrieb um ca. 15 % vermindert, wobei IDI-Motoren tendenzielle Vorteile zeigen. Der NO_x -Ausstoß steigt nahezu um 10 %. Bei der Partikelmasse ist für die DI-Motoren im 13-Stufen-Test für beide Kraftstoffe eine identische Emission feststellbar, wohingegen in nahezu allen übrigen Fällen eine Reduktion um ca. 20 bis 40 % auftritt, wenn RME als Kraftstoff verwendet wird. IDI-Motoren emittieren generell etwas weniger Partikelmasse als Direkteinspritzer. Unabhängig vom Motorkonzept und vom Testcyclus ist der Rußausstoß. Hier wird sowohl für Rapsöl als auch RME eine Reduktion um ca. 40 % gegenüber Dieselkraftstoff ermittelt.

4.2 Nichtlimitierte Abgaskomponenten PAK, Aldehyde und Aromaten

Im Gegensatz zu den vielfältigen Vergleichsmessungen der limitierten Komponenten steht für die nichtlimitierten Verbindungen kaum Datenmaterial zur Verfügung. Innerhalb dieser Abgasfraktion sind die Aldehyde besser untersucht als die PAK. Sehr vereinzelt finden sich auch Hinweise auf die Emissionen von Benzol und dessen Alkylderivaten. Die unterschiedliche Informationsdichte über Aldehyde und PAK ist damit zu begründen, daß der analytische Aufwand der Carbonylbestimmung wesentlich unter dem der PAK-Quantifizierung liegt.

Im Rahmen des vorliegenden Aufsatzes wird die analytische Genauigkeit der PAK-, Aldehyd- und Aromatenbestimmungen nicht diskutiert. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß viele der gezeigten Werte auf Einzelmessungen ohne

Wiederholung beruhen und daß die ermittelten relativen Standardabweichungen bei Aldehydmessungen mit Wiederholungsmessung hauptsächlich im Bereich von $\pm 2 - 20 \%$ angesiedelt sind, während die relativen Wiederholstandardabweichungen bei PAK-Mehrfachbestimmungen im Intervall von $\pm 5 - 40 \%$ gefunden werden. Detaillierte Informationen zu den im folgenden gezeigten Meßwerten nichtlimitierter Komponenten sind mit Quellenangaben, Beschreibungen der analytischen Vorgehensweisen, Anzahl der Wiederholungsmessungen und ge-

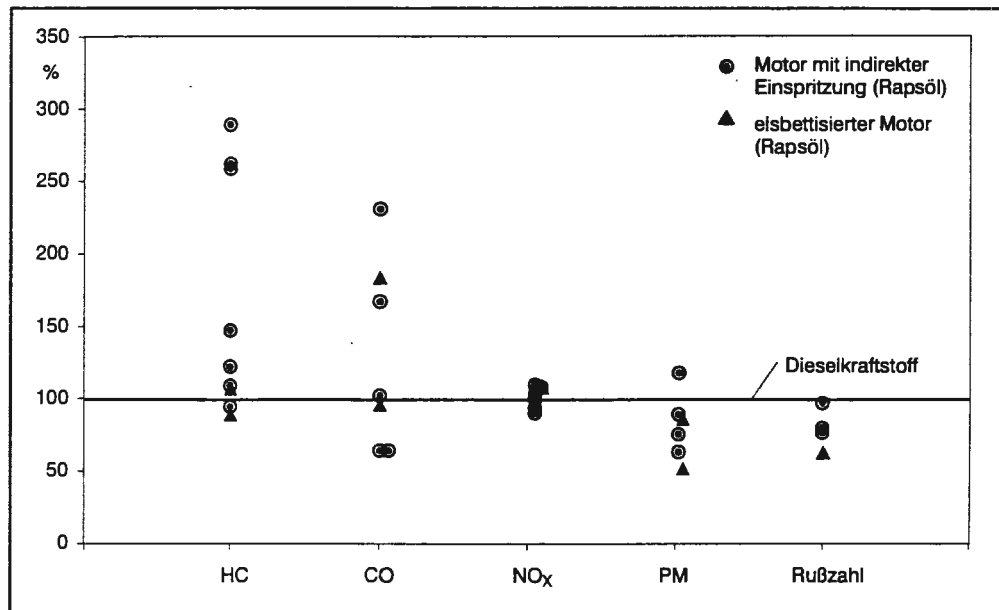


Bild 4: Emission limitierter Verbindungen und Rußzahl beim Motorbetrieb mit Rapsöl in relativer Darstellung im 13-Stufen-Test (DK = 100 %)

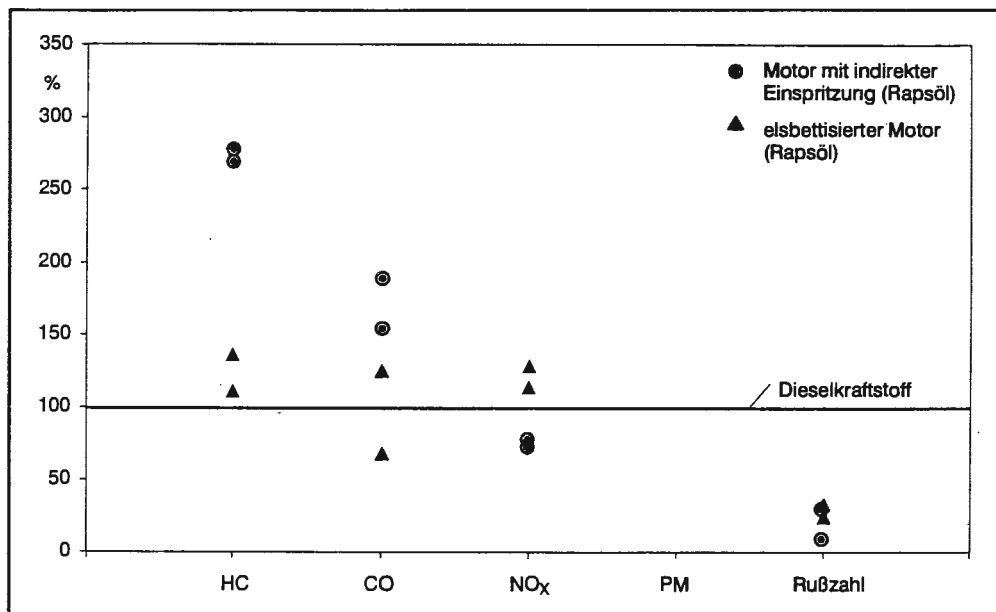


Bild 5: Emission limitierter Verbindungen und Rußzahl beim Motorbetrieb mit Rapsöl in relativer Darstellung im 5-Punkte-Test (DK = 100 %)

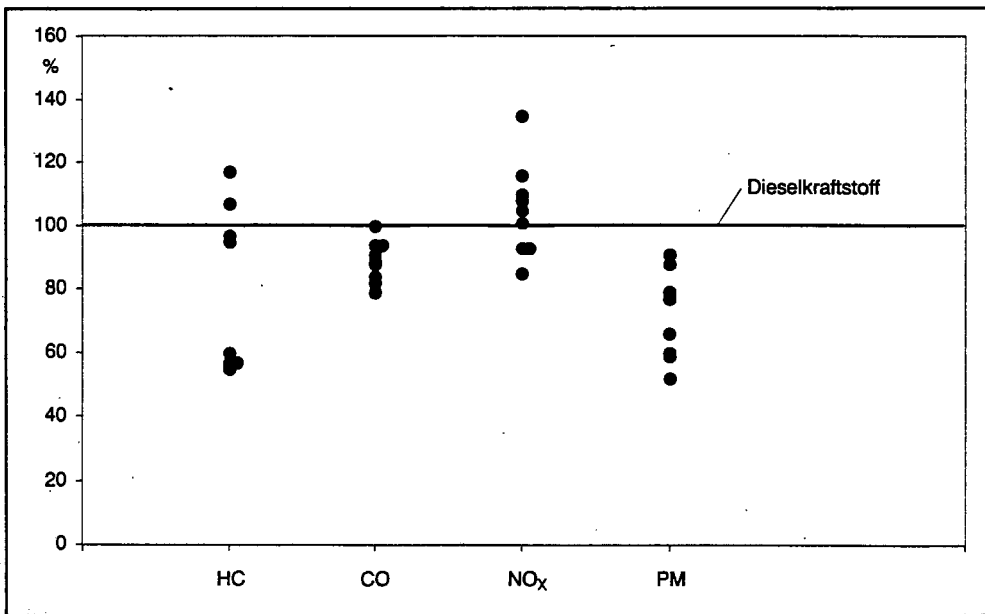


Bild 6: Emission limitierter Verbindungen beim IDI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung im FTP-75-Test (DK = 100 %)

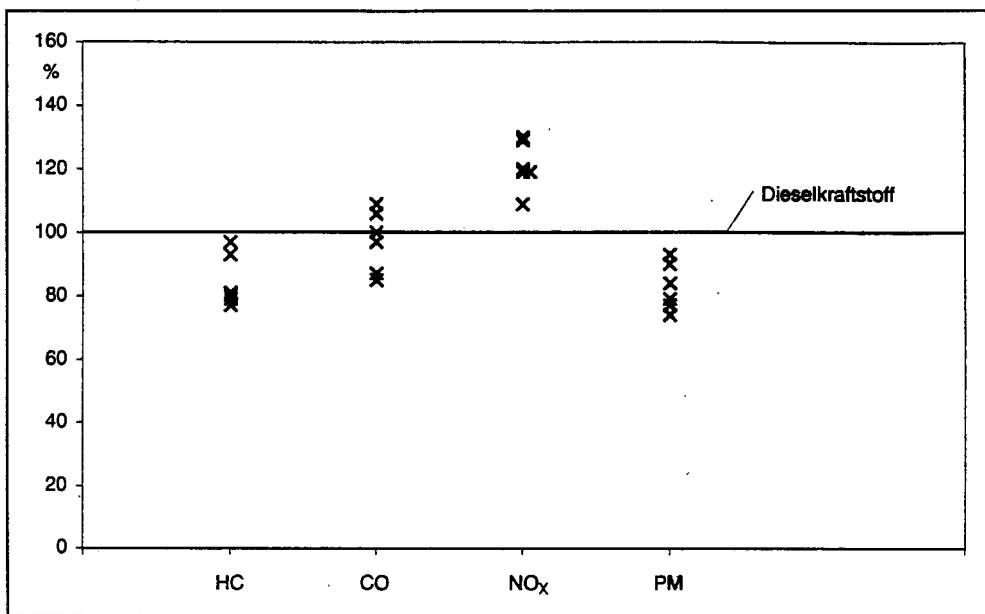


Bild 7: Emission limitierter Verbindungen beim DI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung im FTP-75-Test (DK = 100 %)

gegebenenfalls relativen Wiederholstandardabweichungen bei Krahel et al. (1994) dokumentiert.

Bei der Zusammenstellung wurden ausschließlich Ergebnisse berücksichtigt, die auf der Basis eines gebräuchlichen Motortestverfahrens ermittelt wurden, und die nach Angaben des jeweiligen analytischen Labors zur quantitativen Aussage herangezogen werden dürfen. Als weiteres Auswahlkriterium galt, daß die getesteten Motoren mindestens während des

Beurteilungszeitraums störungsfrei betrieben werden konnten, da schlecht oder gänzlich ungeeignete Motoren das Emissionsverhalten beim Betrieb mit alternativen Kraftstoffen verfälscht wiedergeben. Es wird jedoch deutlich darauf hingewiesen, daß das zweite Auswahlkriterium nicht mit der Eignung zum Dauerbetrieb im Praxiseinsatz gleichzusetzen ist.

4.2.1 Vergleichende Messungen der PAK mit DK und Rapsöl

Außer nach den oben genannten Auswahlkriterien wurden auch Untersuchungen ausgeschlossen, die seitens des Analysenlabors mit einem Fehler in Höhe von $\pm 100\%$ angegeben wurden. Bild 12 zeigt eine Zusammenstellung der schließlich berücksichtigten Meßwerte.

Die Ergebnisse im FTP-75-Cyclus unterliegen starken Schwankungen. Im ECE-15-Test ist für den Rapsölbetrieb einheitlich eine gesteigerte PAK-Emission zu verzeichnen. ECE-R49- und 5-Punkte-Test führen hingegen im Rapsölbetrieb zur Reduktion von PAK im Abgas.

Im Ergebnis aller dargestellten Ergebnisse ist festzuhalten, daß im Motorbetrieb mit Rapsöl die PAK in stationären Tests stark erniedrigt sind, wohingegen sie im instationären ECE-

15-Cyclus und teilweise auch im FTP-75-Test massiv erhöht sind. Im 5-Punkte-Test ist die relative PAK-Reduktion in Kammermotoren stärker als in elsbettisierten Direkteinspritzern. Die Originalliteratur zeigt dagegen, daß der absolute PAK-Ausstoß der Kammermotoren eine 10-bis 20fache Erhöhung gegenüber den elsbettisierten Aggregaten aufweist.

4.2.2 Vergleichende Messungen der PAK mit DK und RME

Im Ergebnis aller in Bild 13 dargestellten Untersuchungen wird deutlich, daß der Einsatz von RME den PAK-Ausstoß der meisten Motoren signifikant reduziert. Die Absenkung tritt besonders im für die Landwirtschaft repräsentativen 5-Punkte-Test zu Tage. Die starke Abweichung eines einzelnen Motors von der sonst einheitlichen Tendenz ist derzeit nicht erklärlich und bedürfte zur Absicherung der wiederholten Untersuchung mit einem baugleichen Motor.

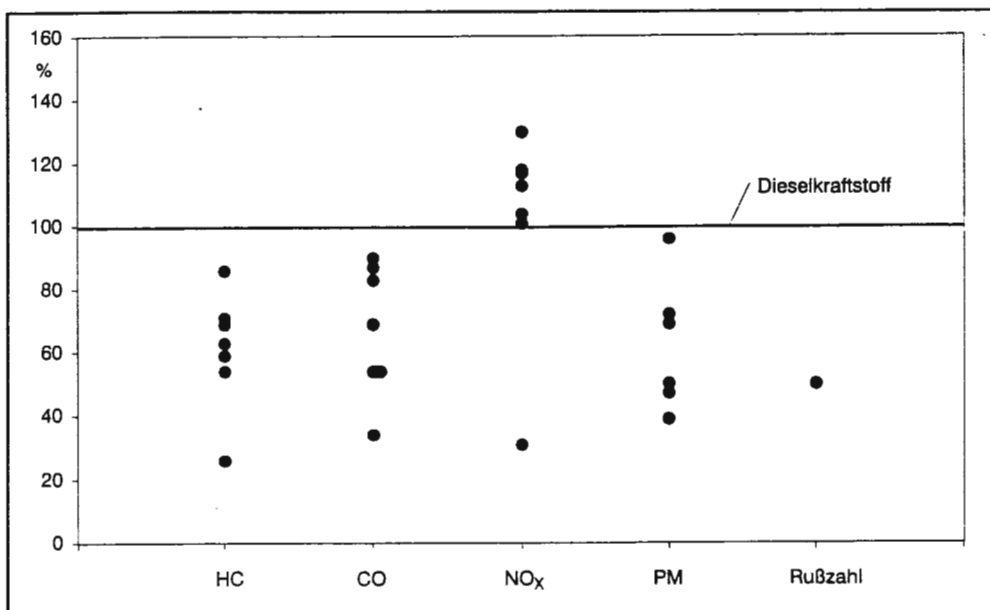


Bild 8: Emission limitierter Verbindungen und Rußzahl beim IDI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung im 13-Stufen-Test (DK = 100 %)

4.2.3 Vergleichende Messungen der Aldehyde mit DK und Rapsöl

Eine Zusammenstellung von Aldehyd- und Ketonemissionen für die unterschiedlichen Motortestverfahren zeigt nach Maßgabe der Auswahlkriterien Bild 14 in relativer Darstellung. Zusammenfassend ist in allen Testcyclen durch Verwendung von Rapsöl ein drastischer Anstieg der Aldehydemissionen auf etwa 200-300 % des DK-Wertes festzustellen, für den jeweils Formaldehyd und Acrolein maßgeblich verantwortlich sind. Die Emissionen von Kammermotoren (IDI) steigen im Rapsölbetrieb tendenziell stärker an als die von elsbettisierten Aggregaten, die in einem Fall für beide Kraftstoffe im Rahmen des Meßfehlers vergleichbare Emissionen aufweisen.

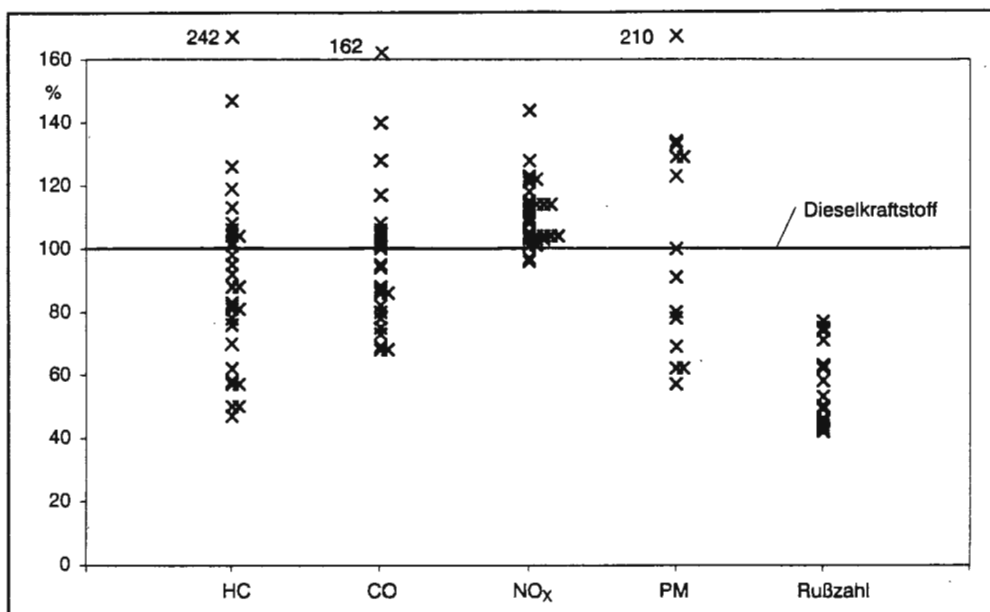


Bild 9: Emission limitierter Verbindungen und Rußzahl beim DI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung im 13-Stufen-Test (DK = 100 %)

4.2.4 Vergleichende Messungen der Aldehyde mit DK und RME

Die relativen Werte der Aldehyd- und Ketonemissionen sind in Bild 15 für die verschiedenen Testcyclen dargestellt. Im Blick auf die Gesamtheit aller Messungen gilt, daß der Aldehydausstoß bei Verwendung von RME im Mittel um etwa

40% gegenüber dem des DK-Betriebs erhöht ist. Daran sind wiederum Formaldehyd und Acrolein maßgeblich beteiligt. Sehr auffällig ist, daß der obere und untere Extremfall durch baugleiche Probanden im FTP-75-Test hervorgerufen wurde. Eine Erklärung für diese Diskrepanz ist nicht offensichtlich. Festzustellen bleibt, daß sich die starke Emission im RME-Betrieb eines Fahrzeugs in hohem Maße von allen anderen getesteten Motoren abhebt. Ohne Berücksichtigung des letztgenannten ergibt sich für RME ein mittlerer Emissionszuwachs von 20%. Der Vergleich von indirekt einspritzenden mit

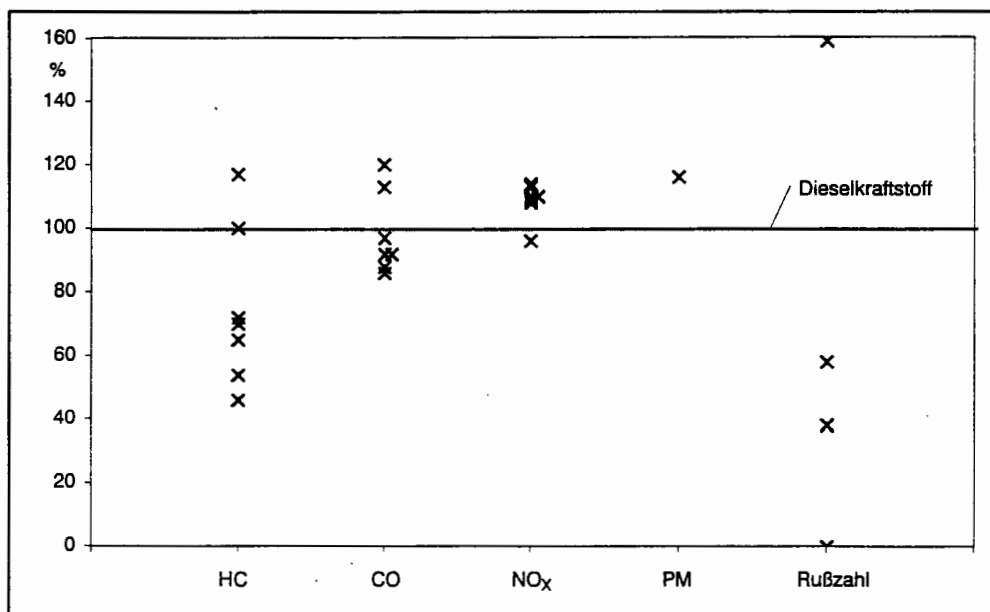


Bild 10: Emission limitierter Verbindungen und Rußzahl beim DI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung im 5-Punkte-Test (DK = 100 %)

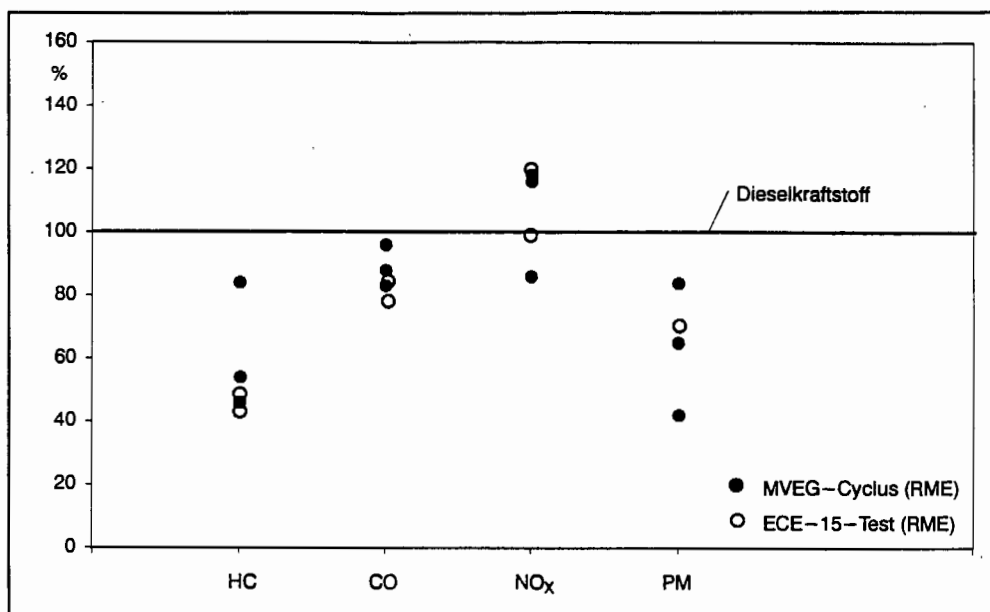


Bild 11: Emission limitierter Verbindungen beim IDI-Motorbetrieb mit RME in relativer Darstellung in diversen Testverfahren (DK = 100 %)

Komponente	Rapsöl		RME	
	Wert	Testverfahren	Wert	Testverfahren
Kohlenwasserstoffe (HC)	210 %	IDI	70 %	IDI
	110 %	DI	80 - 80 %	DI
Kohlenmonoxid (CO)	180 %	IDI	70 - 90 %	IDI
	115 %	DI	100 %	DI
Stickoxide (NO _x)	100 %		110 %	
Partikelmasse (PM)	320 %	inst. IDI	100 %	DI
	90 %	stat. IDI	60 - 80 %	
	80 %	DI		
Rußzahl	55 %		60 %	

IDI: Indirekte Einspritzung; DI: direkte Einspritzung; stat.: stationärer Test; inst.: instationärer test

Tabelle 2: Relative Emissionswerte der limitierten Komponenten und der Rußzahl bei Motorbetrieb mit Rapsöl und RME (DK = 100 %)

direkt einspritzenden Motoren zeigt auf der Basis des verfügbaren Datenmaterials keine aussagekräftige Tendenz.

4.2.5 Vergleichende Messungen der Aromaten

Die Emissionen von Benzol, Toluol, Xylole (BTX) sowie Ethylbenzol sind nur sehr spärlich für den Motorbetrieb mit Rapsöl und RME untersucht. Bild 16 zeigt die verfügbaren Daten in relativer Darstellung. Es wird deutlich, daß für den Vergleich von RME mit DK im FTP-75- und im 5-Punkte-Test analog zur PAK-Emission ein verminderter Aromatenausstoß festzustellen ist. Eine gegenläufige Tendenz weisen die mit Rapsöl im 13-Stufen-Test ermittelten Ergebnisse auf.

Die Gesamtemissionen an BTX und Ethylbenzol korrelieren weitgehend mit den Meßwerten für das besonders interessierende Benzol. Bild 17 zeigt die relativen Emissionswerte von Benzol. Mit Ausnahme des Motors im 5-Punkte-Test sind für die Summe der Aromaten und Benzol gleiche Tendenzen erkennbar. Die elsbettisierten Motoren zeigen eine leichte Erhöhung von Benzol gegenüber der Aromatensumme. Signifikant ist der starke Anstieg von Benzol bei einer insgesamt erniedrigten Aromatenemission des Motors im 5-Punkte-Test.

4.3 Zusammenfassung der bekannten Testergebnisse

Der Einfluß von Rapsöl und RME ist im Blick auf die

limitierten Komponenten vielfältig untersucht worden.

Die Mittelwerte der vorliegenden Ergebnisse zeigen für den Motorbetrieb mit Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff die in Tabelle 2 zusammengefaßten Werte. Es ist zu beachten, daß die Tabelle keinen Aufschluß über die Anzahl der durchgeführten Messungen gibt.

Bei der Zusammenfassung der nichtlimitierten Komponenten muß im folgenden auf die motorkonzeptionelle Differenzierung verzichtet werden, da zu wenig Daten diesbezüglich vorliegen. Ebenfalls ist zu beachten, daß gerade bei der PAK-Bestimmung teilweise hohe Ungenauigkeiten auftreten.

Die angegebenen Tendenzen basieren sowohl auf Mittelwerten von Wiederholmessungen als auch auf Einfachbestimmungen. Eine Zusammenstellung der Messungen ist für den Motorbetrieb mit Rapsöl und RME relativ zu Dieselkraftstoff in Tabelle 3 gegeben. Die relativen Werte sind ohne Hinweise auf die Anzahl der zugrundeliegenden Messungen und deren Wiederholgenauigkeiten angegeben; diese Informationen sind bei Krahl et al. (1994) dokumentiert.

5 Wirkungen von Rapsöl und RME

5.1 Gasförmige limitierte Komponenten

Von den Änderungen der gasförmigen limitierten

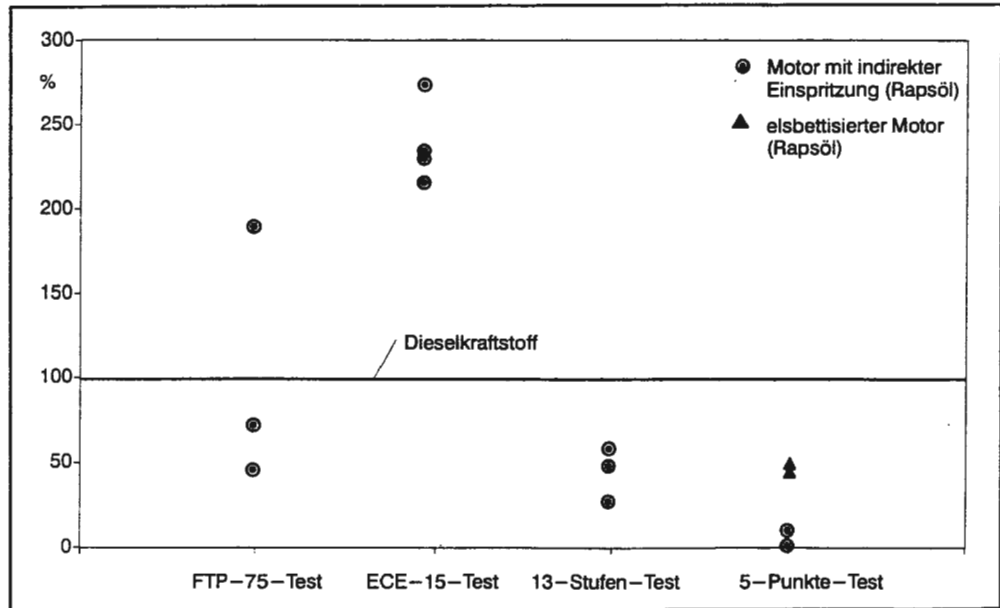


Bild 12: Relative Emissionswerte der PAK bei Motorbetrieb mit Rapsöl (DK = 100 %)

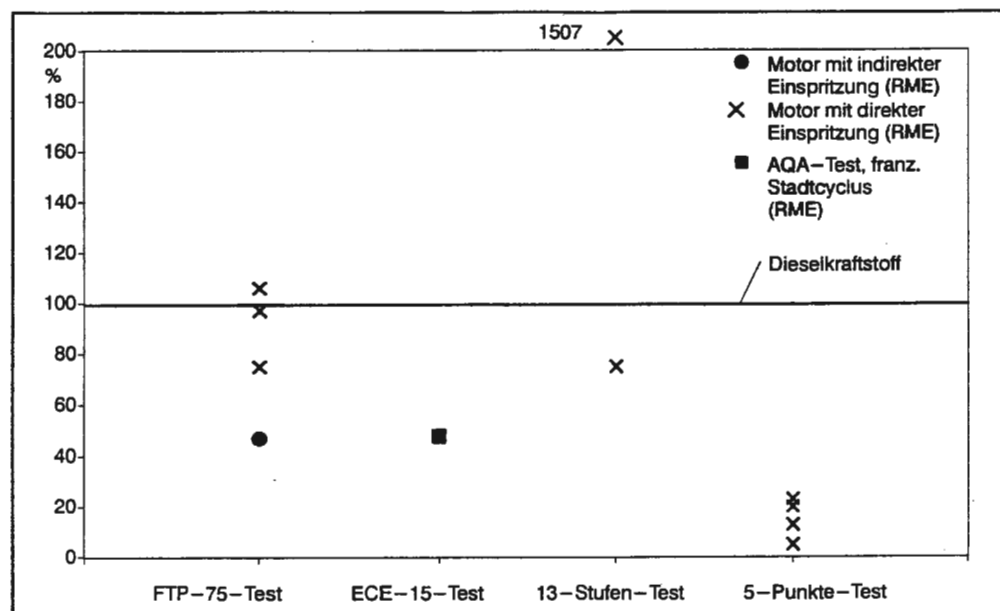


Bild 13: Relative Emissionswerte der PAK bei Motorbetrieb mit RME (DK = 100 %)

Komponente	Rapsöl		RME	
	FTP/13/5	ECE	inst.	13
PAK	10 - 75 %	240 %	75 %	1500 %
Aldehyde		280 %	120 %	400 %
Aromaten	135 %		60 %	70 %
speziell: Benzol	160 %		135 %	

FTP: FTP-75-Test; ECE: ECE-15-Test; 13: 13-Stufen-Test; 5: 5-Stufen-Test; inst.: instationärer Test

Tabelle 3: Relative Emissionswerte der nichtlimitierten Komponenten bei Motorbetrieb mit Rapsöl und RME (DK = 100 %)

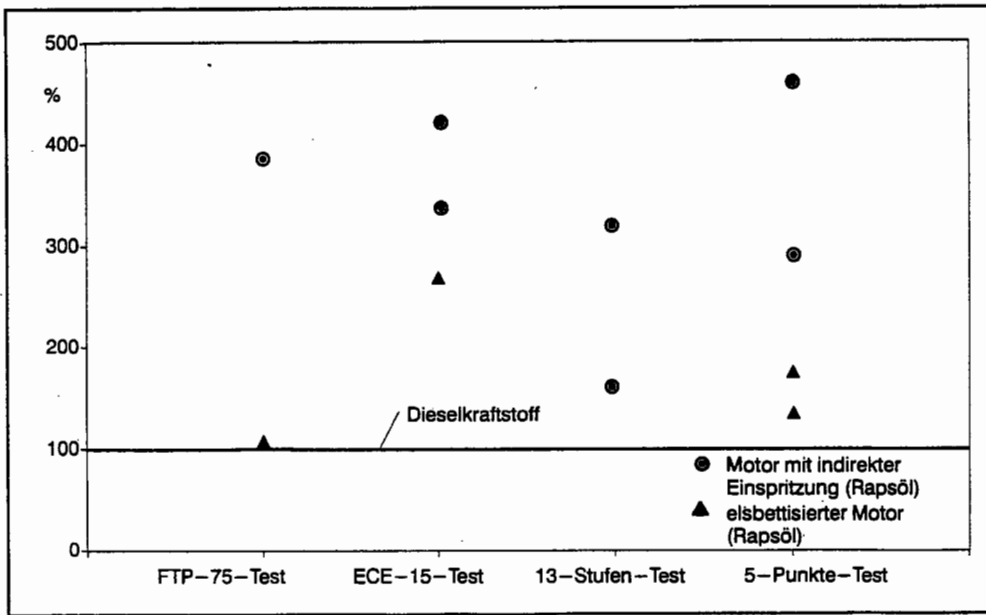


Bild 14: Relative Emissionswerte der Aldehyde bei Motorbetrieb mit Rapsöl (DK = 100 %)

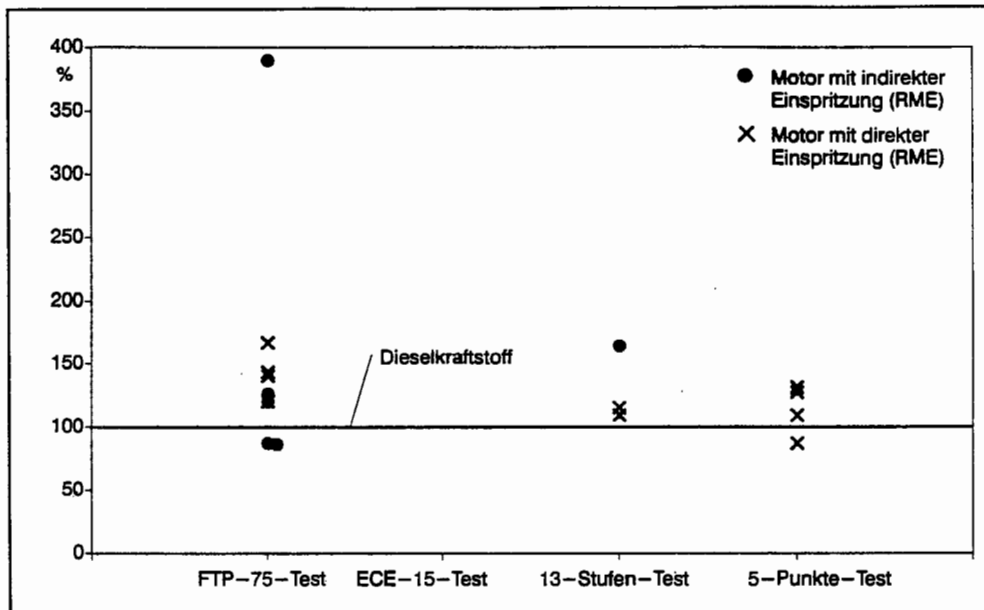


Bild 15: Relative Emissionswerte der Aldehyde bei Motorbetrieb mit RME (DK = 100 %)

Komponenten sind keine signifikanten Änderungen der direkten Wirkungen abzuleiten. Auf die etwaigen indirekten photochemischen Wirkungen spezieller Kohlenwasserstoffe wird im Kapitel 5.3 eingegangen.

5.2 PAK, Partikelmasse und Ruß

Da PAK zusammen mit Rußpartikeln ein höheres kanzerogenes Potential aufweisen als beide Komponenten für sich allein (Heinrich, 1994), ist die Abschätzung einer krebserzeugenden Wirkung von Abgasen nur unter deren gemeinsa-

nen Wirkungen der Partikulate. Von Bedeutung ist auch die eingehende Klärung der Frage, inwieweit Pflanzenölkraftstoffe die Rußpartikelgröße und deren Zahl beeinflussen. Hervorgehoben sei abschließend nochmals, daß der momentane Kenntnisstand hinsichtlich Ruß-, Partikel- und PAK-Emission in Verbindung mit der Teilchenverteilung und dem mutagenen Potential für RME deutliche Vorteile andeutet, wohingegen für Rapsöl uneinheitlichere Ergebnisse vorliegen.

mer Berücksichtigung möglich. Bei der Diskussion der Rußpartikeln ist der ausgestoßene Kohlenstoff ohne die daran angelagerten Verbindungen ebenso relevant wie dessen Körnung, da jedes einzelne Rußpartikel Lungenkrebs induzieren kann. Präliminaruntersuchungen, von denen Krahl (1993) berichtet, zeigen, daß die Partikelgrößen- und Häufigkeitsverteilung aus dem Filtrat unverdünnten Abgases von Dieselkraftstoff und RME Unterschiede zugunsten des alternativen Kraftstoffs aufweisen. Parallel dazu wurde im RME-Abgas ein erheblich reduzierter PAK-Gehalt nachgewiesen. Arbeiten von Stalder et al. (1993) mit Salmonellenstämmen zeigen, daß im Vollast- und Leerlaufbetrieb auch das mutagene Potential des RME-Partikulates gegenüber dem von DK abgesenkt ist. Tendenziell vergleichbare Ergebnisse erzielte auch Eckl (1994).

Für Rapsöl gestaltet sich das Bild uneinheitlicher. PAK und Partikelmasse sind weniger homogen durch die Verwendung von Rapsöl verändert. Mutagenitätstests zeigen ebenfalls starke Schwankungen (Stalder et al., 1994).

Derzeit besteht für beide Kraftstoffe Forschungsbedarf im Hinblick auf die mutagenen und kanzerogenen

5.3 Aldehyde

Der Aldehydausstoß ist in zweifacher Weise umweltrelevant (s. Kap. 3.3). Im Blick auf die direkte Wirkung der Aldehyde berichtet Wolfensberger (1994), daß während eines Praxisversuchs der Stadt Zürich mit Bussen im RME-Betrieb der aufdringliche Abgasgeruch bei einigen Angestellten des Fahr- und Werkstattpersonals zu Unwohlsein führte. Der für Pflanzenölkraftstoffe typische Geruch, der auf Aldehyde zurückzuführen sein kann, wurde durch einen Oxidationskatalysator jedoch praktisch vollständig reduziert (siehe auch Krausgrill und Schmidt, 1993). Stalder et al. (1993) fanden in ersten Laboruntersuchungen, daß durch RME-Ruß eine etwas erhöhte Zytotoxizität hervorgerufen wird. Erst weitere systematische Untersuchungen können jedoch zu abgesicherten Ergebnissen führen. Aldehyde haben neben der direkten Wirkung starken Einfluß auf die troposphärische Ozonbildung. Da Aldehyde aus der dieselmotorischen Verbrennung eventuell zu mehr als 40 % zum gesamten ozonbildenden Potential beitragen, ist der insbesondere im Rapsölbetrieb teilweise extrem gesteigerte Aldehydausstoß zu beachten, wenn ein Einsatz in Innenstädten erwogen wird. In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, daß beim Motorbetrieb mit RME ein erheblicher Zuwachs an Ethen und Ethin festgestellt wurde (Wurst et al. 1990). Beide Komponenten stehen im Verdacht, zusammen einen Anteil von über 30 % an der gesamten dieselmotorisch induzierten Ozonbildung zu haben (Hartung, 1993).

Somit besteht im Hinblick auf Aldehyde, Alkene und Alkine, auch unter Voraussetzung einer teilweise reduzierten HC-Emission ein erheblicher Forschungsbedarf, wenn

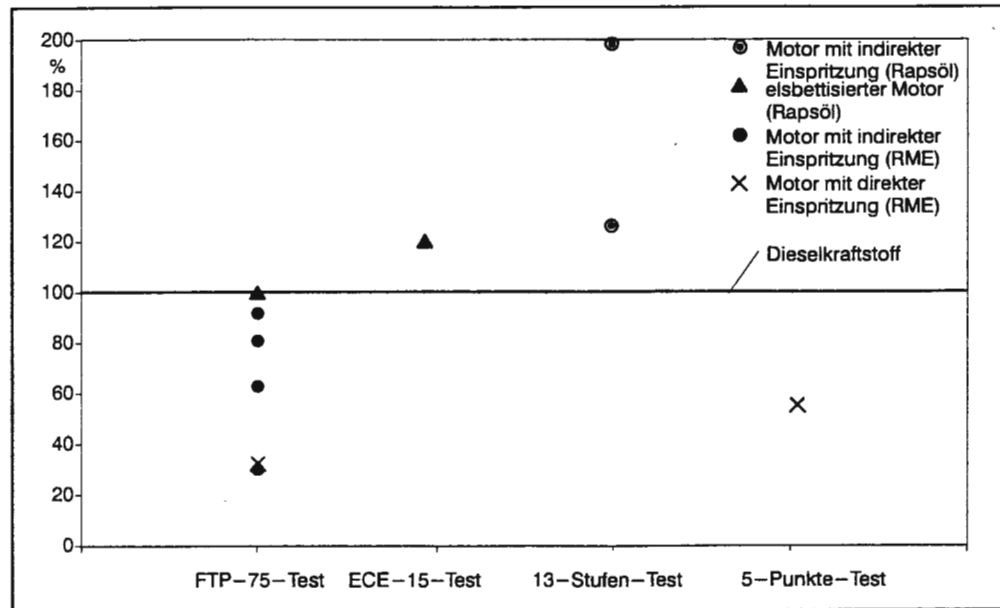


Bild 16: Relative Emissionswerte der Aromaten bei Motorbetrieb mit Rapsöl bzw. RME (DK = 100 %)

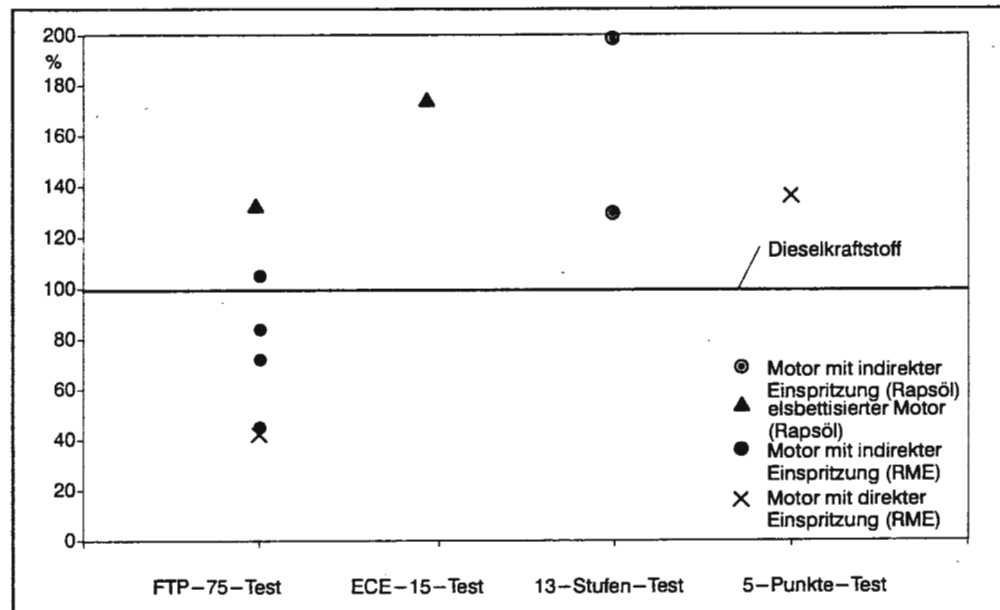


Bild 17: Relative Emissionswerte von Benzol bei Motorbetrieb mit Rapsöl bzw. RME (DK = 100 %)

Pflanzenölkraftstoffe in Ballungsgebieten eingesetzt werden sollen.

5.4 Aromaten

Die Emissionen der Aromaten sind für RME weitgehend abgesenkt, wohingegen sie für Rapsöl ansteigen. Wurst et al. (1990) berichten über einen deutlichen Benzolanstieg im 5-Punkte-Test. Eine befriedigende Erklärung dieses Vorgangs kann vorerst nicht gegeben werden. Da das RME-Abgas noch

Untersuchungen hinsichtlich des ozonbildenden Potentials der Alkylderivate des Benzols bedarf, sollte somit gleichzeitig auch systematisch der direkt umweltrelevante Benzolaustritt eingehend untersucht werden.

5.5 Schlußbemerkung

Die Zusammenstellung aller Ergebnisse unter Berücksichtigung der zu erwartenden Wirkungen zeigt Vor- und Nachteile für die Rapsöl- und RME-Verwendung. Die direkt wirkenden Nachteile sind bei RME weniger stark ausgeprägt als bei Rapsöl. Eine endgültige Bewertung kann sich teilweise an der unlängst vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (1994) veröffentlichten Unit-risk-Abschätzung von Otto- und Dieselmotoren orientieren, bedarf allerdings der Erweiterung um pflanzenölspezifische Aspekte, zu der auch die Größenverteilung der Rußpartikeln gehören sollte. Im Blick auf die Wirkungen der Emissionen sind als wichtige zukünftige Arbeiten systematische Untersuchungen der zytotoxischen, mutagenen und kanzerogenen Eigenschaften zu nennen. Ebenfalls bedarf es der Ermittlung des ozonbildenden Potentials von Pflanzenölkraftstoffen, wenn diese nicht ausschließlich im ländlichen Raum eingesetzt werden sollen.

Zusammenfassung

Aus der vielfältigen Literatur zur Messung der durch Pflanzenölkraftstoffe hervorgerufenen Emissionen wurden die verfügbaren Daten zusammengestellt und hinsichtlich der verwendeten Kraftstoffe, Motoren und der zugrundeliegenden Motortestverfahren differenziert. Mit Blick auf die zunächst dargestellten bekannten Wirkungen einzelner Abgaskomponenten wurde angestrebt, die Umweltrelevanz von Rapsöl bzw. RME und Dieselmotorkraftstoff vergleichend abzuschätzen.

Im Ergebnis wurden Vor- aber auch Nachteile der Pflanzenölkraftstoffe deutlich, wobei nach gegenwärtigem Kenntnisstand RME mit weniger negativen Wirkungen behaftet ist als Rapsöl. Um jedoch zu einer gegenüber Dieselmotorkraftstoff fundierten Bewertung der Emissionen dieser alternativen Energieträger zu gelangen, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich. Dazu gehören die Bestimmungen von besonders umweltrelevanten, aber in Europa bislang gesetzlich nicht limitierten Abgaskomponenten. Ebenfalls liegen heute noch unzureichende Daten über die mutagenen, kanzerogenen und zytotoxischen Auswirkungen des Rapsöl- oder RME-Einsatzes im Vergleich zu den bereits eingehender untersuchten Wirkungen bei Verwendung von Dieselmotorkraftstoff aus Mineralöl vor. Für die Verwendung der Pflanzenölkraftstoffe in Gebieten mit hohen NO_x -Konzentrationen ist es darüber hinaus erforderlich, die zu erwartende bodennahe Ozonbildung zu ermitteln und mit der von Dieselmotorkraftstoff zu vergleichen.

Review: Utilization of Rape Seed Oil, Rape Seed Oil Methyl ester or Diesel Fuel - Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects

Based on the extensive literature about exhaust gas emissions of rape seed oil and its methyl ester (RME), the available data were compiled and distinguished with regard to the used fuels, motors and motor test procedures. To estimate the environmental relevance of the biofuels versus Diesel fuel, in a second step the effects of single exhaust components are described.

In the result it becomes obvious that environmental advantages and disadvantages occur, when rape seed oil or RME are used, but RME seems to have less disadvantages than rape seed oil. To achieve a sound estimation of the environmental relevance of these biofuels it will be necessary to determine some more components of the non-limited exhaust gases. Also, at present the mutagenic, cancerogenic and cytotoxic potentials of the exhaust gas emissions derived from rape seed oil and RME are investigated insufficiently. For a utilization of these alternative fuels in areas with high NO_x levels it is very important to determine their ozone forming potentials in comparison with Diesel fuel.

Literatur

- Bayerl, W., Müller, A., Schäfer, H.-v. (1992): Einfluß der Kraftstoffzusammensetzung auf die Kohlenwasserstoffemissionen von Ottomotoren. - Motortechn. Zeitschrift 53, S. 584-590.
- Boeckh, M. (1992): Des Diesels Kern. - VDI-Nachrichten Nr. 36, S. 3.
- Boyd, J.D. (1992): Aspects of Alternative Energies for Automotive Propulsion - A California Prospect. - VDI-Berichte 1020, Tagungsanlage, S. 1-13.
- CARB (1991a): Tagungsbericht Reactivity Meeting, 8./9. April 1991, Beckman Center of National Academics of Sciences and Engineering, Irvine, CA (USA).
- CARB (1991b): Notice of Public Hearing to Consider Amendments to Regulations Regarding the Calculation and Use of Reactivity Adjustment Factors for Passenger Cars and Light-Duty Trucks Certifying to Transitional Low-Emission Vehicle Exhaust Emission Standards. - Mail-Out, S. 91-43.
- CARB (1992): Determination of Non-Methane Hydrocarbon Mass Emissions by Flame Ionisation Detection (Draft).
- Carter, P.L.W. (1991): Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds. - US Environmental Protection Agency Project Report EPA 600/3-91/050.
- Chang, T.Y., Rudy, S.J. (1990): Ozone-Forming Potential of Organic Emissions from Alternative-Fueled Vehicles. - Atmospheric Environm. 24a, S. 2421-2430.
- Code of federal regulations, Title 40: Protection of Environment; Chapter I: Environmental Protection Agency, Part 86: "Control of Air Pollution from New Motor Vehicles and New

- Motor Vehicle Engines: Certification and Test Procedures." Federal Register, US Government Printing Office (jährlich neue Auflagen).
- Eckl, P. (1994): Vergleich der Mutagenität von Diesel- und Rapsmethylester-Abgas. - Tagungsband Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen - C.A.R.M.E.N.-Eigenverlag, Würzburg, S. 109-119.
- Fränkle, G., Stein, H.-J. (1988): Instationäre oder stationäre Abgasprüfverfahren für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren? - Automobiltechn. Zeitschrift 90, S. 15-22 und 85-92.
- Gorse, R.A., Benson, J.D., Burns, K.R., Hochhauser, A.M., Koehl, W.J., Painter, L.J., Reuter, R.M., Rippon, B.H. (1991): Toxic Air Pollutant Vehicle Exhaust Emissions with Reformulated Gasolines. - SAE-Paper 912324.
- Grover, P.L. (1986): Pathways Involved in the Metabolism and Activation of Polycyclic Hydrocarbons. - Xenobiotica 16, S. 915-931.
- Hartung, A. (1993): Persönliche Mitteilung, Volkswagen AG.
- Heinrich, U. (1991): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe - Tierexperimentelle Ergebnisse. VDI-Tagungsband Krebs erzeugende Stoffe in der Umwelt, 23./25.4.1991, Mannheim, Kurzfassung.
- Heinrich, U. (1994): Wirkungsforschung bei Dieselmotoremissionen. Tagungsband Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, S. 19-29, Würzburg, C.A.R.M.E.N.-Eigenverlag.
- Henschler, D. (1987): Dieselmotor-Emissionen. - Lfg. 13, Weinheim, Verlag Chemie.
- Henschler, D. (1994): Bedeutung der Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren für den Menschen und die Umwelt. Tagungsband Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, S. 14-18, Würzburg, C.A.R.M.E.N.-Eigenverlag.
- Hockel, K.G.L., Langen, P., Mallog, J. (1992): Abgas-Emissionsreduzierung - Eine Herausforderung für die Automobilindustrie. - Motortechn. Zeitschrift 53, S. 326-338.
- Huber, L., Emmert, J., Gratzfeld-Hüsgen, A., Dulson, W. (1987): Bestimmung von polycyclischen Aromaten mit HPLC, UV/VIS Diodenarray und Fluoreszenzdetektion. - Staub-Reinhalt. Luft 47, S. 22-27.
- Irmscher, I., Jaskulla, N. (1994): Aspekte des motorischen Verhaltens von Kraftstoffen aus pflanzlichen Ölen - Stand der internationalen Forschung. - Vorabveröffentlichung, BML-Förderkennzeichen 0310494A.
- Kaschani, D.T., Brauns, A. (1991): Bestimmung von PAHs in Kraftfahrzeugabgasen durch HPLC (Teil 2). - GIT Spezial Chromatogr. 2, S. 66-76.
- Kirschmer, P. (1989): Aldehydmessungen in der Außenluft. - Staub-Reinhalt. Luft 49, S. 263-266.
- Krahl, J. (1993): Bestimmung der Schadstoffemissionen von landwirtschaftlichen Schleppern beim Betrieb mit Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. - VDI-Fortschrittberichte, Reihe 15, Nr. 110, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- Krahl, J., Vellguth, G., Munack, A. (1994): Übersicht von Arbeiten zum Einsatz von Rapsöl und Rapsölmethylester als Kraftstoffe unter Berücksichtigung umweltrelevanter Auswirkungen. - BML-Abschlußbericht aus dem Institut für Biosystemtechnik, FAL, Braunschweig.
- Krausgrill, C., Schmidt, C. (1993): Abschlußbericht RME-Projekt Stadt Fulda. - Schrift der TH Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau.
- Kröll, M., Decker, G., Hartung, A., Postulka, A., Georgi, B. (1993): Influence of Fuel Composition on NMOG-Emissions and Ozone Forming Potential. - SAE-Paper 932676.
- Krumm, H., Reglitzky, A.A., Schnieder, H. (1992): Energieeinsparung und Minderung der CO₂-Emissionen bei konventionellen und alternativen Kraftstoffen. - VDI-Berichte 943, S. 67-95, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Länderausschuss für Immissionsschutz (1992): Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- Lenz, H.P., Pucher, E., Kohoutex, P., Rennenberg, H., Hahn, J., Elstner, E.F., Hippeli, S. (1993): Emissionen, Immissionen und Wirkungen von Abgaskomponenten. - VDI-Fortschrittbericht, Reihe 12, Nr. 183, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- Lofti, C.F.P., Brentani, M.M., Böhm, G.M. (1990): Assessment of the Mutagenic Potential of Ethanol Auto Engine Exhaust Gases by the Salmonella typhimurium Microsomal Mutagenesis Assay, Using a Direct Exposure Method. - Environ. Research 52, S. 225-230.
- Menrad, H., Weidmann, K., Bernhard, W., Heilmann, G., Behn, U. (1989): Rapsöl als Motorkraftstoff. - Mineralöltechnik 5-6.
- Moussiopoulos, N., Oehler, W., Zellner, U. (1989): Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung. - Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo, Hong Kong, Springer-Verlag.
- Office of Health and Environmental Assessment (1990): Health Assessment Document for Acrolein, - EPA/600/8-86/014 F.
- Pott, F. (1991): Dieselmotorabgas - Tierexperimentelle Ergebnisse zur Risikoabschätzung. - VDI-Berichte 888, S. 211-243, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- Reichow, H.P. (1992): Luftverkehr und Umwelt. - VDI-Berichte 943, S. 133-150, Düsseldorf, VDI-Verlag.

- Sachverständigenrat für Umweltfragen (1994): Umweltgutachten 1994. - Kusterdingen, Metzler-Poeschel-Verlag.
- Sattler, T., Jaeschke, W. (1990): Modell zur Ausbreitung Kfz-bedingter Luftschadstoffe in einem Baumbestand. - Staub-Reinhalt. Luft 50, S. 331-337.
- Schäfer, F. (1991): Gesetzliche Vorschriften zur Schadstoff- und Verbrauchsbegrenzung bei Pkw-Verbrennungsmotoren. - Motortechn. Zeitschrift 52, S. 346-355.
- Scharmer, K., Glüsing, H., Krings, L. (1993): Standardanforderungen an Rapsölmethylester als Motorenkraftstoff. - Teil I: Stand der Technik, BMFT-Förderkennzeichen TV 9102 1.
- Smith, D.F., Kleindienst, T.E., Hudgens, E.E. (1989): Improved High-Performance Liquid Chromatographic Method for Artifact-Free Measurements of Aldehydes in the Presence of Ozone Using 2,4-Dinitrophenylhydrazine. - J. Chromatogr. 483, S. 431-436.
- Stalder, K., Gerhard, V., Frohmann, H., Krahl, J. (1993): Zytotoxizität und Mutagenität von Rapsölmethylester als Kraftstoff. - Verhandlungen der deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin, Band 33, S. 75-78.
- Stalder, K., Gerhard, V., Krahl, J. (1994): Zur kanzerogenen Wirkung von Rußen aus Dieselmotoren im Betrieb mit Rapsöl, RME und Dieselkraftstoff. - Tagungsband Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, S. 30-35, Würzburg, C.A.R.M.E.N.-Eigenverlag.
- Vellguth, G. (1982): Eignung von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten als Kraftstoff für Dieselmotoren. - Grundle. Landtechnik 32, S. 177-186.
- Vellguth, G. (1987): Emissionen bei Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schlepper-Dieselmotoren. - Grundle. Landtechnik 37, S. 207-213.
- Wagner, H.M. (1991): Anthropogenes Ozon ("Sommermog") - Entstehung, Vorkommen und gesundheitliches Risiko. - Wissenschaft und Umwelt 1-2, S. 15-20.
- Welschhof, G. (1981): Der Ackerschlepper - Mittelpunkt der Landtechnik. - VDI-Berichte 407, S. 11-17, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- Wolfensberger, U. (1994): Hat Biodiesel in der Schweiz eine Chance? - Raps 12(1), S. 12-14.
- Wurst, F., Boos, R., Prey, R., Scheidl, K., Wörgetter, M. (1990): Emissionen beim Einsatz von Rapsölmethylester an einem Prüfstandsmotor. - Forschungsberichte der Bundesanstalt für Landtechnik, Wieselburg, Heft 22.
- Verfasser: Krahl, Jürgen, Dr. rer. nat.; Munaack, Axel, Dir. u. Prof. Professor Dr.-Ing., Institut für Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL); Leiter: Dir. u. Prof. Professor Dr.-Ing. Axel Munaack.
Bahadir, Müfit, Prof. Dr. rer. nat. Dr. agr. habil., Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der TU Braunschweig.