

MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Teil 2



Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen



MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Untersuchung der limitierten und
nicht-limitierten Abgasemissionen von
regenerativ betriebenen Verbrennungsmotoren

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München
Internet: <http://www.umweltministerium.bayern.de>
E-Mail: poststelle@stmlu.bayern.de

- Juni 2002 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: TU München
Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie

Autoren: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Meyer-Pitroff
Dr.-Ing. Alexander Dobiasch
Dipl.-Ing. Jürgen Lachenmaier

Gefördert vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMLU erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMLU, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMLU oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMLU Einsicht nehmen.

Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMLU vertreten.

Die Verteilung der aufgrund finanzieller oder materieller Beteiligung an der Herstellung als Gegenleistung an Personen oder Institutionen abgegebenen Exemplare liegt nicht in der Verantwortung des StMLU.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Projektbeschreibung	4
3	Instrumentierung des Versuchsstandes	6
3.1	Anlagenschema	6
3.2	BHKW Versuchsträger	8
3.2.1	Meßwerterfassung (Almemo Datenlogger)	10
3.2.2	Temperaturmessung	10
3.2.3	Volumenstrommessung	10
3.2.4	Elektrische Wirkleistungsbestimmung	11
3.2.5	Kraftstoffverbrauchsmessung	11
3.2.6	Technische Daten der verwendeten Meßgeräte und -fühler	12
3.3	Gasmeßtechnik	12
3.3.1	Photometrische Meßsysteme (NO, CO, CO ₂ , SO ₂ , H ₂ O)	14
3.3.2	Flammenionisationsdetektor (HC)	14
3.3.3	Sauerstoffmeßgerät (O ₂)	15
3.3.4	Gaschromatograph (N ₂ O)	15
3.3.5	Massenspektrometer mit chemischer Ionisation (Aceton, Butyraldehyd, Acrolein)	15
3.3.6	Technische Daten und Fehlerabschätzung der einzelnen Meßgeräte	19
4	Darstellung der Versuchsergebnisse	20
4.1	Kraftstoffuntersuchungen	20
4.1.1	Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)	20
4.1.2	Versuchsdurchführung und Reproduzierbarkeit	22
4.1.3	Versuchsergebnisse	22
4.2	Versuchsergebnisse der Fettsäureanalytik	26
4.2.1	Versuchsdurchführung und Reproduzierbarkeit	26
4.2.2	Versuchsergebnisse	26
4.3	Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Meßwerten am Versuchsstand	29
4.3.1	Versuchsdurchführung und Auswertung	29
4.3.2	Eingestellte Sollgrößen	31
4.3.3	Thermische und energetische Meßgrößen	33
4.3.4	Emissionsuntersuchungen	36
4.3.5	PAH-Untersuchungen	37
4.4	Emissionsuntersuchungen von 38 verschiedenen Kraftstoffen	41
4.4.1	Versuchsdurchführung und Auswertung	41
4.4.2	Eingestellte Sollgrößen	41

4.4.3	Thermische und energetische Meßgrößen	43
4.4.4	Emissionsuntersuchungen.....	49
4.5	Vergleich der Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen	63
4.6	Beimischungen zu AME	67
4.7	Einsatz eines Oxidationskatalysators an einem BHKW der Vereinigten Werkstätten Pflanzenöltechnologie (VWP)	69
5	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	71
5.1	Versuchsauswertung	71
5.2	Einflußgrößen auf Emissionen	72
5.2.1	Zahlenwerte der Korrelationskoeffizienten.....	72
5.2.2	Einfluß auf Stickoxidemissionen	72
5.2.3	Einfluß auf Kohlenmonoxidemissionen.....	80
5.2.4	Einfluß auf Kohlenwasserstoffemissionen	84
5.2.5	Einfluß auf Partikel-Emissionen.....	84
5.2.6	Einflüsse auf Acteon-, Butyraldehyd- und Acrolein-Emissionen	87
5.2.7	Einfluß auf PAH-Emissionen	87
5.2.8	Einfluß auf kanzerogene PAH-Emissionen.....	88
6	Zusammenfassung.....	89
7	Literaturverzeichnis	91

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit am Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie zur „Untersuchung der limitierten und nicht-limitierten Abgasemissionen von regenerativ betriebenen Verbrennungsmotoren“ wurde durch das Bayerische Landesamt für Umweltschutz Az. 1/2-1500-290 gefördert.

Bisherige Forschungsarbeiten über das Abgasemissionsverhalten beim motorischen Betrieb mit regenerativen Kraftstoffen beschränkten sich meist auf den Vergleich von Rapsöl oder Rapsölmethylester (RME) zu Dieselkraftstoff. So existieren bisher keine detaillierten Erkenntnisse über karzinogene Abgasemissionen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) oder Aldehyde und Ketone sowie über den Einfluß der Fettsäuremuster regenerativer Kraftstoffe auf deren Abgasemissionsverhalten. Ziel der vorliegende Arbeit ist es, wesentlich detaillierter als bisher die Einflüsse einzelner kraftstoffspezifischer Eigenschaften auf die Emissionen zu untersuchen, um daraus Anforderungen an einen emissionsarmen regenerativen Kraftstoff ableiten zu können. Zur Messung dieser Abgasemissionen wurde am Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie ein Prüfstand an einem mit regenerativen Kraftstoffen betriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW) instrumentiert und in Betrieb genommen. Dabei wurden sowohl limitierte als auch nicht-limitierte Abgasemissionen in Abhängigkeit verschiedener Kraftstoffe bestimmt. Weiterhin konnte ein Massenspektrometer mit chemischer Ionisation auf die Messung von Aldehyden und Ketonen optimiert werden.

In dem vorliegenden Abschlußbericht werden die Ergebnisse einer Untersuchung von 38 verschiedenen Kraftstoffen, die ein breites Spektrum an chemischen und physikalischen Eigenschaften aufweisen, vorgestellt. Die Abgasemissionen von regenerativen Kraftstoffen wie Rapsöl, Senföl, Rapsölmethylester (RME) und Altfettmethylester (AME) werden im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff diskutiert.

2 Projektbeschreibung

In dem Projekt „Untersuchung der limitierten und nicht-limitierten Abgasemissionen von regenerativ betriebenen Verbrennungsmotoren“ wurde der Einfluß einzelner physikalischer und chemischer Eigenschaften von regenerativen Kraftstoffen auf das

Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren möglichst isoliert bestimmt. Dazu werden synthetische und nichtsynthetische Fette und Öle mit einem hohen Gehalt an nur einer Fettsäure verwendet und deren Einfluß auf das Emissionsverhalten (limitiert/nicht-limitiert) bestimmt. Es wurden vier verschiedene Kraftstoffgruppen untersucht: Veresterte und unveresterte Öle, synthetisch hergestellte Triglyceride und Dieselmotorkraftstoff.

Folgende Punkte wurden bearbeitet:

1. Bestimmung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der ausgewählten Fette und Öle (Fettsäuremuster, Standardanalysen)
2. Optimierung eines Massenspektrometers mit chemischer Ionisation (CIMS) für eine detaillierte HC-Untersuchung (Aldehyde und Ketone)
3. Stationäre Messungen am BHKW-Prüfstand mit 38 verschiedenen Ölen und Fetten (synthetisch und nichtsynthetisch). Untersuchung der limitierten (CO, NO, NO₂, HC, Partikel) und nicht-limitierten Emissionen (SO₂, O₂, CO₂, Aldehyde und Ketone, PAH)
4. Untersuchung des Einflusses eines Oxidationskatalysators

Desweiteren war geplant Vergleichsmessungen an einem für Pflanzenöl geeigneten BHKW der Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie durchzuführen. Aufgrund technischer bedingter zu hoher Fehlerschwankungen, konnten die Messergebnisse aus diesem Versuch für die Verifizierung der ersten Ergebnisse aber nicht herangezogen werden.

3 Instrumentierung des Versuchsstandes

3.1 Anlagenschema

In Abbildung 3.1 ist der experimentelle Aufbau des Versuchsstandes dargestellt. Der Aufbau gliedert sich in drei Teile: Das BHKW, die Abgasemissionsmeßgeräte und die Meßwerterfassung /71/.

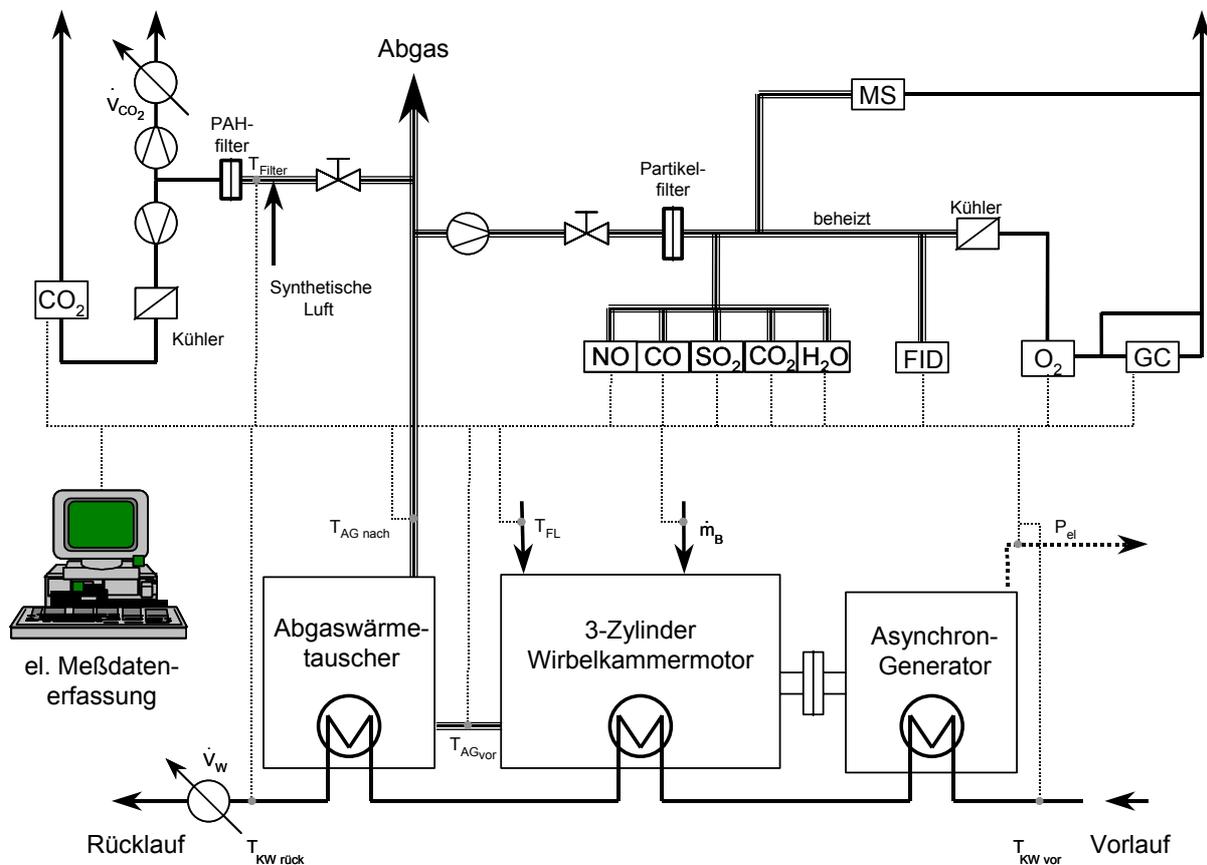


Abbildung 3.1: Experimenteller Aufbau des Versuchsstandes

Die Abgase werden mit beheizten Leitungen über zwei Stränge auf die Meßgeräte verteilt:

- Die Messung der Partikel und PAH erfolgt nach einer Verdünnung mit synthetischer Luft. Nach Definition der Environmental Protection Agency (EPA) sind unter dem Begriff Abgas-Partikel alle Bestandteile (mit Ausnahme des kondensierten Wassers) zu verstehen, die bei einer maximalen Temperatur von 51,7 °C (125 °F)

aus dem mit Luft verdünnten Abgas (Verdünnungstunnel) auf einem definierten Filter abgeschieden werden (Abbildung 3.2). Die Masse der abgeschiedenen Partikel stellt ein Maß für die Belastung des Abgases dar und wird gravimetrisch bestimmt /66/. Mit einer Gasuhr wird der Volumenstrom durch den Filter ermittelt. Zusätzlich ist ein Kohlendioxid-Meßgerät zur Bestimmung des momentanen Verdünnungsverhältnisses in das verdünnte Abgas integriert. Um einen Durchbruch des ersten Filters zu erkennen, ist ein zweiter Filter nachgeschaltet, der wie der Erste ausgewogen wird. Das Gewicht der so beladenen Filter wird mit einer Laborwaage der Genauigkeit $\pm 0,1$ mg bestimmt. Dabei werden die Filter vor und nach der Messung in einem Exsikkator bis zur Gewichtskonstanz gelagert, um gleichbleibende Feuchtigkeit und Temperatur der Filter zu gewährleisten.

- Die Messung der Standardabgasemissionen wird mit einem Perkin&Elmer MCS 100 HW Mehrkomponentenmeßgerät durchgeführt, das nach dem photometrischen Meßprinzip arbeitet. Zur Bestimmung der Aldehyde und Ketone wird ein Massenspektrometer mit chemischer Ionisation (V&F CIMS 500) verwendet, ein Flammenionisationsdetektor (COMPUR-FID) zur Bestimmung der Gesamtkohlenwasserstoffe, ein paramagnetisches Meßgerät (OXYNOS 100) für Sauerstoff und ein Gaschromatograph (Sichromat 1) zur Messung von N_2O .

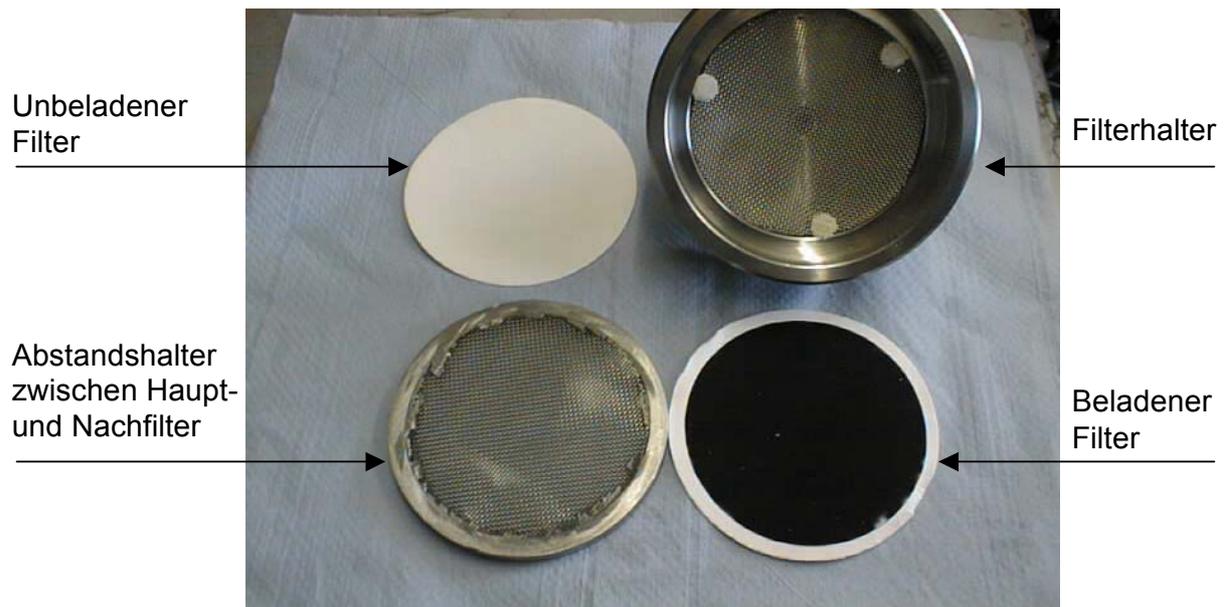


Abbildung 3.2: Ansicht des geöffneten des Partikelfilters

3.2 BHKW Versuchsträger

Die Messungen wurden an einem BHKW Panda 10 der Icemaster GmbH Paderborn durchgeführt. Das BHKW besteht aus einem 3-Zylinder- Wirbelkammermotor mit Indirekteinspritzung und einem wassergekühlten Asynchrongenerator (Abbildung 3.3).

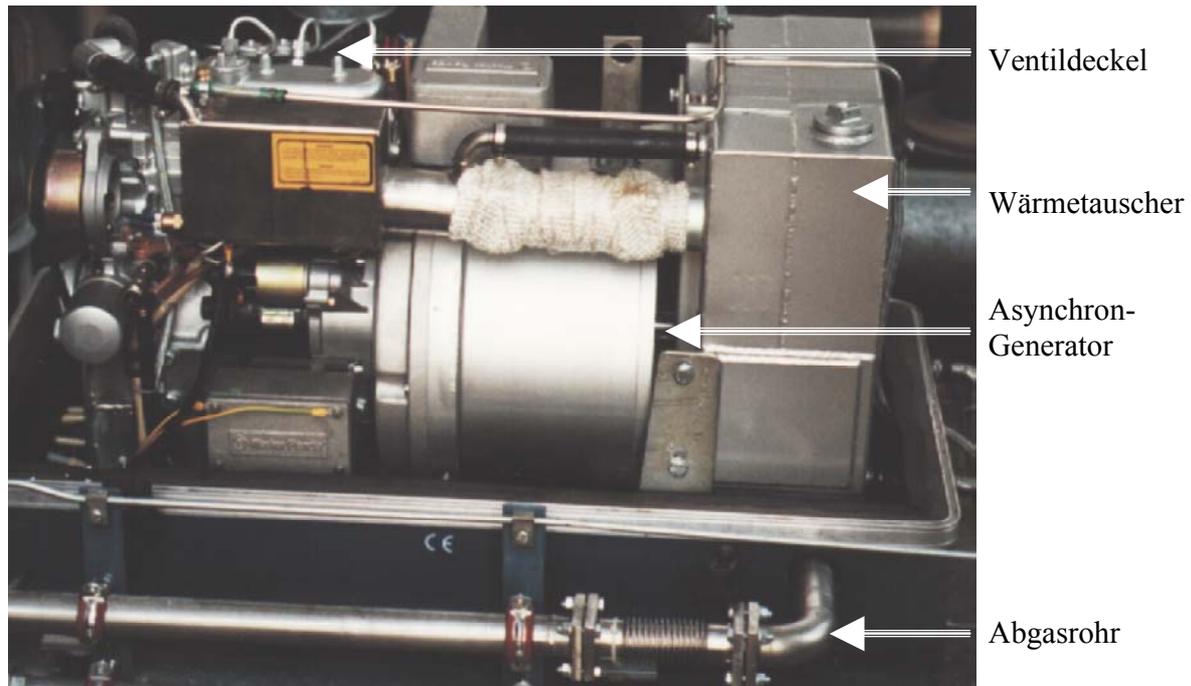


Abbildung 3.3: Panda 10 BHKW bei geöffneter Schallschutzhaube

Die Wellenleistung des Motors beträgt 13,8 kW, die elektrische Spitzenleistung 9,5 kW. Die elektrische Dauerleistung (Nennleistung) darf 6 kW nicht übersteigen. Der Kraftstoffverbrauch beträgt in Abhängigkeit von der Leistung zwischen 1,2 und 3,2 l/h. Die Kühlung erfolgt über ein Einkreiskühlsystem, d.h. die Generator-, Motor- und Abgaswärmetauscher sind in einem Kreislauf in Reihe geschaltet /56/.

Der verwendete Versuchsträger ist ein 3-Zylinder-Wirbelkammer-Motor der Kubota Industries mit den in Tabelle 3.1 zusammengestellten Kennwerten. Der Motor ist für einen Betrieb mit Methylester zugelassen und wurde mit einer Kraftstoffvorheizung versehen. Damit ist es möglich, das BHKW mit Diesel-, Methylester und Pflanzenöl zu betreiben.

Tabelle 3.1: Kennwerte des 3-Zylinder-Wirbelkammer-Motors der Kubota Industries

Beschreibung	Fischer Panda 10
Motor	3 Zylinder Wirbelkammer
Bohrung und Hub	64*68 mm
Volumen	719 cm ³
Einspritzpumpe	Bosch MD Type Mini Pump
Einspritzdruck	13,73 MPa
Einspritzzeit	21° vor OT
Kompressionsverhältnis	23:1
Max. mechanische Leistung	12,4 kW bei 3000/min
Generator	Asynchron
Max. elektrische Leistung	9,5 kW
Elektrische Nennleistung	6 kW

3.2.1 Meßwerterfassung (Almemo Datenlogger)

Zur Meßwertaufnahme wird das Almemo Meßsystem der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH in Holzkirchen benutzt. Zum Anschluß der Fühler an den Datenlogger werden Almemo-Stecker verwendet, die einen programmierbaren Datenträger (EEPROM) enthalten /41/. So werden die angeschlossenen Fühler automatisch erkannt und Meßbereich, Meßwertkorrekturen, Skalierungen, Dimensionen und Fühlerbezeichnung an den Datenlogger übertragen /1,39/

3.2.2 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung am BHKW erfolgt durch Pt-100 und NiCr-Ni Temperaturfühler eines Almemo Meßwerterfassungssystems der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH. NiCr-Ni Fühler geben eine Thermospannung ab, die sich proportional zur Temperatur ändert. Dabei werden Materialien ausgewählt, die eine hohe Thermospannung besitzen. Zur Messung der Kühlwassereintritts- und der Kühlwasseraustrittstemperatur wird je ein Pt-100 Fühler verwendet /1/.

3.2.3 Volumenstrommessung

Die Volumenstrommessung erfolgt über ein Axial-Turbinen-Durchflußmeßgerät Turbotron VTP 15 MS-40 der VSE GmbH. Hier werden die Umdrehungen eines Flügelrades bestimmt, die sich proportional zum jeweiligen Volumenstrom verhalten. Als Ausgangssignal werden 855 Impulse pro Liter mit einem Frequenzfühler des

Almemo-Systems zum Datenlogger übertragen. Dieser Fühler hat einen Meßbereich von 0 bis 25000 Hz /107/.

3.2.4 Elektrische Wirkleistungsbestimmung

Die elektrische Wirkleistung wird mit einem Meßumformer MU-P4Wu/s der Müller&Weigert GmbH ermittelt. Mit diesem Meßgerät können alle drei symmetrisch und asymmetrisch belasteten Phasen eines Drehstromnetzes erfaßt werden. Das Produkt aus gemessener Stromstärke, Spannung und Phasenwinkel ist die elektrische Leistung. Die so erhaltene Leistung wird über ein Spannungssignal dem Almemo Meßwerterfassungssystem zugeführt /83/.

3.2.5 Kraftstoffverbrauchsmessung

Der Kraftstoffverbrauch wird mit einer Laborwaage der Sartorius AG bestimmt und der Wert vor und nach der Messung notiert (Abbildung 3.4).

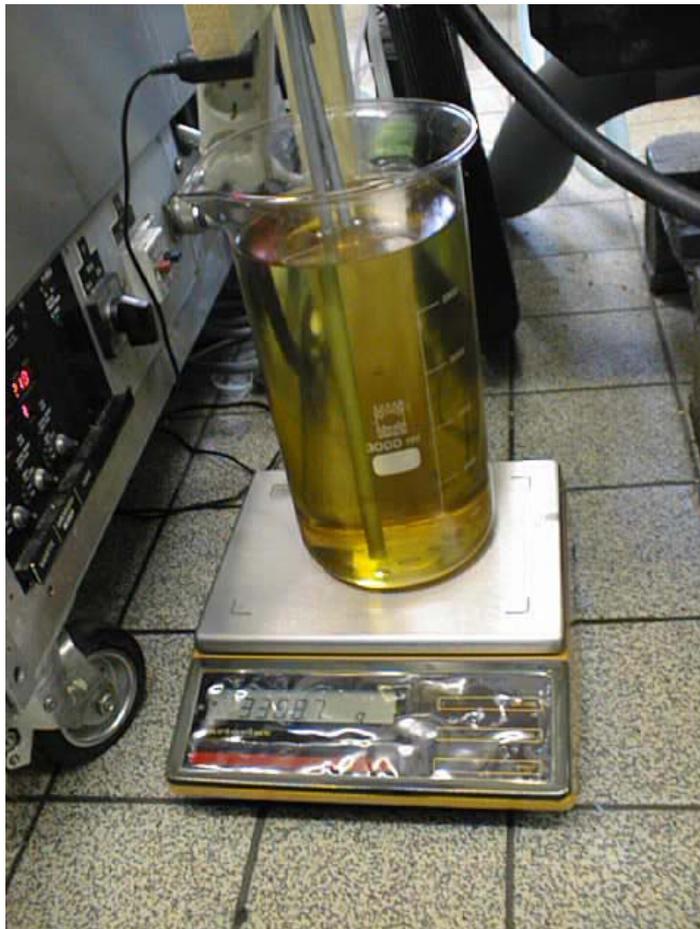


Abbildung 3.4: Gravimetrische Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs

3.2.6 Technische Daten der verwendeten Meßgeräte und -fühler

In Tabelle 3.2 sind die Herstellerangaben der verwendeten Meßgeräte zusammengefaßt. Sie spiegeln das kleinstmögliche Fehlerintervall bei den Messungen dar. Die Meßgenauigkeit wird in Kapitel 4.3 gesondert überprüft.

Tabelle 3.2: Technische Daten der verwendeten Meßgeräte und -fühler

Meßgerät/-fühler	Meßbereich	Auflösung	Meßgenauigkeit
Datenlogger	Fühlerspezifisch	1 : 65536 (2^{16} Bit)	$\pm 0,0015$ % vom Endwert
NiCr-Ni	-200 °C bis 1370 °C	0,1 K	$\pm 0,5$ K
Pt-100	-200 °C bis 400 °C	0,01 K	$\pm 0,05$ K
Durchflußmesser	2 bis 40 l/min	1 Hz = $1,2 \cdot 10^{-3}$ l/s	± 1 % vom Endwert
Kraftstoffverbrauchsmessung	0 bis 3700 g	0,05 g	$\pm 0,05$ g
el. Wirkleistungsbestimmung	0 bis 34,64 kW	1 W	$\pm 0,1$ % vom Endwert

3.3 Gasmeßtechnik

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die im Abgas eines Dieselmotors enthaltenen Komponenten, die mit den zur Verfügung stehenden Meßgeräten bestimmt werden können. Dabei eignen sich nicht alle Komponenten für eine Untersuchung, da entweder die Konzentrationen im Abgas zu gering sind oder eine Überlagerung durch andere Gase auftritt. In der Tabelle sind deshalb in der letzten Spalte die in die Untersuchung aufgenommenen Komponenten markiert.

Tabelle 3.3: Auswahl wichtiger Abgaskomponenten von Dieselmotoren und die angewandten Meßverfahren /10,75/

Komponente	chem. Formel	M [g/mol]	I _p [eV]	max. Konzentration [ppm]	Meßprinzip	¹
Ammoniak	NH ₃	17	10,52	100	NDIR	
Kohlendioxid	CO ₂	44			NDIR	✓
Kohlenmonoxid	CO	28	14,01	500	NDIR	✓
Schwefeldioxid	SO ₂	64	12,42	20	NDIR	✓
Stickstoffdioxid	NO ₂	46	9,91	200	NDIR	
Stickstoffmonoxid	NO	30	9,40	750	NDIR	✓
Wasser	H ₂ O	18	12,83	80000	NDIR	
Sauerstoff	O ₂	32	12,50	150000	Paramagnetismus	✓
Kohlenwasserstoffe allg.	C _x H _y	-	-	400 (C ₁)	FID	✓
Distickstoffoxid	N ₂ O	44	12,80	50	GC	
1-Buten	H ₃ C-CH ₂ -CH=CH ₂	56	9,76	4	CIMS (Hg)	
2-Butanon (Methylethylketon)	H ₃ C-CH ₂ -CO-CH ₃	72	9,74	0,09	CIMS (Hg)	
2-Butenal (Crotonaldehyd)	H ₃ C-CH=CH-CHO	70	9,73	0,04	CIMS (Hg)	
Acetaldehyd	H ₃ C-CHO	44	10,22	0,52	CIMS (Hg)	
Aceton	H ₃ C-CO-CH ₃	58	9,69	0,32	CIMS (Hg)	✓
Acrolein	H ₂ C=CH-CHO	56	10,10	0,32	CIMS (Hg)	✓
Benzaldehyd	H ₅ C ₆ -CHO	106	9,55	0,025	CIMS (Hg)	
Benzol	C ₆ H ₆	78	9,24	0,12	CIMS (Hg)	
Ethylen	H ₂ C=CH ₂	28	10,56	8,15	CIMS (Hg)	
Isobutyraldehyd (2-Methylpropionaldehyd)	H ₃ C-C ₂ H ₄ -CHO	72	9,52	0,04	CIMS (Hg)	✓
Methanol	CH ₃ OH	32	10,85	14	CIMS (Xe)	
Propen	H ₂ C=CH-CH ₃	42	9,80	5,25	CIMS (Hg)	
Propionaldehyd	H ₃ C-CH ₂ -CHO	58	9,98	0,07	CIMS (Hg)	
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	34	10,40	2	CIMS (Hg)	

¹ In Untersuchung aufgenommen

Weitere Komponenten können nur mit einem erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand mit anderen Meßverfahren (z.B. naßchemisch) untersucht werden. Dies ist erst bei weitergehenden Untersuchungen sinnvoll.

3.3.1 Photometrische Meßsysteme (NO, CO, CO₂, SO₂, H₂O)

3.3.1.1 Mehrkomponentenmeßsystem MCS 100 HW

Für die photometrische Mehrkomponentenmessung wird ein MCS 100 HW der Perkin&Elmer Bodenseewerk GmbH verwendet. Die Küvette dieses Meßgeräts ist auf eine Temperatur von 220 °C temperiert, weshalb eine Beaufschlagung mit heißem und feuchtem Abgas über eine beheizte Meßgasleitung ohne Abgaskühler erfolgen kann. Es wird nur die Konzentration von Stickstoffmonoxid gemessen, da bei der hohen Küvettentemperatur noch kein NO₂ vorliegt. Das Meßgerät verwendet zur Wertebildung eine Querempfindlichkeitstabelle und erreicht dadurch auch bei geringen Absolutwerten eine hohe Genauigkeit /87/. Es können folgende Abgaskomponenten gemessen werden: NO, CO, SO₂, CO₂, NH₃, N₂O und H₂O. Aufgrund der niedrigen Konzentrationen wurde auf eine Auswertung von Ammoniak und Distickstoffoxid verzichtet. Alle Meßwerte dieser beiden Stoffe lagen unter der Nachweisgrenze des Meßgerätes.

3.3.1.2 Kohlendioxid-Gasanalysator (CO₂)

Der mikroprozessorgesteuerte Gasanalysator der Rosemount GmbH vom Typ Binos 1000 wird für die photometrische Messung von Kohlendioxid (CO₂) verwendet. Die Bestimmung des CO₂-Gehalts wird nach der Zufuhr synthetischer Luft bei der PAH-Messung durchgeführt, um den Volumenstrom des Abgases zu bestimmen /2/. Auf eine Auswertung der Ammoniak (NH₃)-Meßergebnisse wurde verzichtet, da ein Teil des NH₃ in Verbindung mit Wasser im Kühler abgeschieden wird und damit die quantitative Bestimmung nicht möglich ist.

3.3.2 Flammenionisationsdetektor (HC)

Zur Kohlenwasserstoffbestimmung wird ein Flammenionisationsdetektor (FID) COMPUR FID der Bayer Diagnostics AG eingesetzt. Der Nachteil dieses Gerätes liegt darin, daß der zugeführte Volumenstrom proportional die Ionenbildung beeinflusst /4/. Trotz interner Stabilisierungsvorrichtungen hat sich im Lauf der Messungen gezeigt, daß ein Durchfluß außerhalb ±5 % des Sollwertes von 80 l/h eine deutliche Abweichung des Meßwertes bewirkt. Aus diesem Grund wurde der FID mit einer Meßgaspumpe und einem Durchflußmesser versehen, um den Durchfluß möglichst konstant zu halten.

3.3.3 Sauerstoffmeßgerät (O₂)

Zur Sauerstoffmessung wird ein Gerät vom Typ Oxynos 100 der Rosemount GmbH, mit einem Meßbereich von 0 - 5 Vol.-% und 0 - 100 Vol.-% verwendet. Dabei werden die paramagnetischen Eigenschaften von Sauerstoff zur Meßwerterzeugung herangezogen. Hier besteht mit einer Empfindlichkeit von 1 bezüglich Sauerstoff (O₂) eine Querempfindlichkeit von 0,43 bezüglich Stickstoffmonoxid (NO) und 0,23 bezüglich Stickstoffdioxid (NO₂). Das bedeutet, daß bei einem NO-Anteil von 1,0 Vol.-% zusätzlich zu dem im Analysegas tatsächlich enthaltenen Sauerstoffgehalt 0,43 Vol.-% O₂ angezeigt werden /46/.

3.3.4 Gaschromatograph (N₂O)

Zur exakten Bestimmung von N₂O wird, neben dem MCS 100 ein Gaschromatograph SICHROMAT 1 der Siemens AG eingesetzt. Zur exakten Dosierung einer festgelegten Meßgasprobenmenge auf die Säule wird bei dem Gaschromatographen ein Gasdosierventil eingesetzt. Das pneumatisch gesteuerte Aufgabesystem dosiert ein Volumen von 1 ml Meßgasprobenmenge auf eine 30 m lange Kapillarsäule (Poraplot-Q, Vorsäule) auf. Die beiden Komponenten CO₂ und N₂O werden am Ende der Vorsäule von den übrigen Abgaskomponenten über ein Life-T-Stück (Pneumatische Säulenschaltung) abgetrennt und sofort mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD2) analysiert. Die übrigen Komponenten des Probegases werden auf eine 25 m lange Molekularsiebsäule (fused silica 5 Å) aufgegeben und nach Durchlaufen dieser Säule ebenfalls mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD1) erfaßt /47,83/.

Aus neun Kalibriergasaufgaben mit 200 ppm N₂O konnte eine Standardabweichung von 1,2 ppm ermittelt werden /71/. Die Nachweisgrenze wurde experimentell mit 2 ppm ermittelt /51/.

3.3.5 Massenspektrometer mit chemischer Ionisation (Aceton, Butyraldehyd, Acrolein)

In der Abbildung 3.5 ist das für die Abgasanalytik verwendete CIMS 500 der V&F Ges.m.b.H. in Absams (Österreich) dargestellt.



Abbildung 3.5: Aufbau des V & F CIMS 500

Es handelt sich um ein Quadrupol-Massenspektrometer mit einer Ionenquelle zur chemischen Ionisation /104/. Die Ionisation der Neutralgase erfolgt im Reaktionsraum über Ladungsaustausch durch Ionen-Molekülreaktionen. Die zur Ionisierung benötigten Primärionen werden in einer Elektronenstoß-Ionenquelle aus einem Quellgas erzeugt. Die angestrebte Ionisationsenergie wird durch die Wahl des Quellgases bestimmt.

Bei dem eingesetzten V & F CIMS 500 werden die in Tabelle 3.4 gezeigten Arbeitsgase Xenon, Krypton und Quecksilber in der Ionenquelle durch Elektronenstoß-Ionisation (EI) zu positiv geladenen Molekülionen ionisiert. Ist die Ionisierungsenergie um einige Elektronenvolt größer als die Ionisierungsenergie des Moleküls, so entsteht ein Massenspektrum, das einem Elektronenstoßspektrum sehr ähnlich ist /16/. Damit die Arbeitsgase nicht gleichzeitig im Vakuum vorliegen, erfolgt deren Zufuhr über zeitlich gesteuerte Magnetventile. Um den Durchfluß der Arbeitsgase in das CIMS konstant zu halten, werden diese über Goldkapillaren eingeleitet.

Tabelle 3.4: Arbeitsgase des CIMS mit seinen Ionen und Ionisierungsenergien /66/

Arbeitsgas	Plasma-Ionen	Ionisierungsenergie I_p [eV]
Quecksilber (Hg)	Hg ⁺	10,54
Xenon (Xe)	Xe ⁺	12,10
Krypton (Kr)	Kr ⁺	13,99

Über ein Linsensystem wird der Primärionenstrom A^+ des Arbeitsgases aus der Ionenquelle in den Reaktionsraum extrahiert, wo er die eingeleiteten Probegasmoleküle B senkrecht trifft. Im Reaktionsraum befindet sich ein Niederdruckplasma mit einer im Vergleich zur Elektronenstoß-Ionisation geringen Ionisierungsenergie. Durch die Ionisation erhält man die in Formel 3.1 dargestellte Ausbeute an Probegasionen $[B^+]$:

$$[B^+] = [A^+] (1 - \exp(-[B] k t)) \quad 3.1$$

k stellt dabei die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante für die Reaktion von A^+ mit B dar, t ist die Verweilzeit der Ionen in der Zelle und $[A^+]$ die Dichte der Primärionen in der Reaktionszelle. Aus dieser Gleichung lassen sich prinzipielle Optimierungsstrategien ableiten. Um die Ausbeute der Probegasionen $[B^+]$ zu erhöhen und um damit die Empfindlichkeit zu steigern, kann entweder die Dichte der Primärionen oder die Dichte der Probegasmoleküle erhöht werden.

Übertrifft die Ionisationsenergie des Primärionenstroms die des Probegases um einige Elektronenvolt, muß die Energiedifferenz in internen Freiheitsgraden des Probegasmoleküls oder in die Auflösung von Bindungen aufgeteilt werden. So wird beispielsweise Acrolein $H_2C=CH-CHO$ (Masse 56, Ionisierungsenergie 10,10 eV) zum Teil deprotoniert auf Masse 55 und zusätzlich zu einem geringen Anteil in weitere Bruchstücke zerlegt auf niedrigeren Massen detektiert /103/.

Der Weg der Ionen durch den Analysator wird in der Abbildung 3.6 dargestellt.

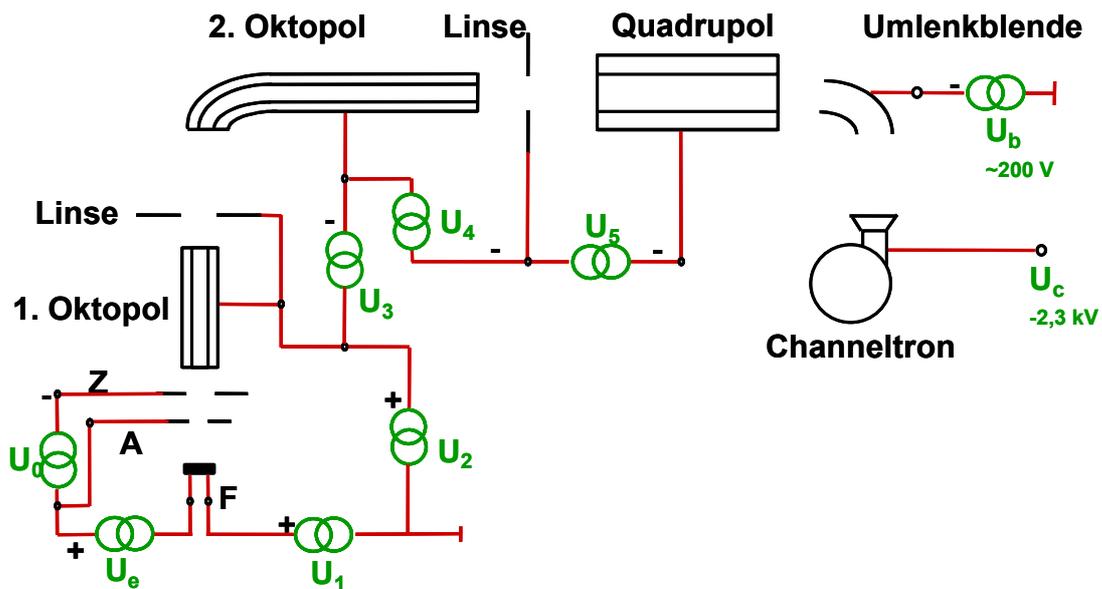


Abbildung 3.6: Weg der Ionen durch den Analysator (U: Potentiale der ionenführenden Bauteile, F: Filament, A: Anode, Z: Ziehblende, U Spannungsquellen) /92/

Für die optimale Ionisation der Probegasmoleküle, die Trennung und die Detektion der Ionen sind folgende Einflußgrößen veränderbar /92/:

- Beschleunigung der Elektronen über U_e auf die Anode in der Ionenquelle.
- Einleitung des Arbeitsgases A senkrecht zur Elektronenbewegung; Ionisation des Arbeitsgases durch Elektronenstoß-Ionisation. Druck des Arbeitsgases in der Ionenquelle bestimmt den Strom der Primärionen.
- Extraktion bei gleichzeitiger Fokussierung der Primärionen A^+ aus der Ionenquelle über U_0 .
- Primärionen A^+ gelangen mit der Energie $U_1 + U_e - U_2$ in den ersten Oktopol; durch das HF-Feld werden sie dort auf einem Querschnitt von 7 mm^2 gehalten. Frequenz und Amplitude sind im ersten Oktopol so gewählt, daß die Transmission für Molekularmassen unter 60 amu stark abfällt. Hier erfolgt eine Bündelung der Ionen, damit sie aufgrund ihrer positiven Ladung nicht auseinanderdriften.
- Über U_3 wird der Primärionenstrom in den zweiten Oktopol, den Reaktionsraum, gebracht. Dort wird das Probegas eingeleitet, das den Primärionenstrom kreuzt.
- Probegasionen werden über U_4 und U_5 aus dem zweiten Oktopol extrahiert und in den Quadrupol geführt.

- Höhe der Spannung U_c am Sekundärelektronenvervielfacher (Channeltron) steht im direkten Zusammenhang mit der Höhe der Sensitivität und der Verkürzung der Lebensdauer des Detektors.

Im Rahmen von Optimierungsversuchen zur Bestimmung von Aldehyden und Ketonen wurde die Probegasmenge erhöht (Probe high) und damit ein höheres Signal bei gleicher Konzentration erzielt. Zusätzlich wurde die Mittelungsdauer zwischen zwei Messungen auf 2000 mS angehoben, was ein wesentlich stabileres Meßsignal liefert.

3.3.6 Technische Daten und Fehlerabschätzung der einzelnen Meßgeräte

Zusammenfassend ist in Tabelle 3.5 ein Vergleich der technischen Daten der verwendeten Meßgeräte entsprechend den Herstellerangaben aufgelistet.

Tabelle 3.5: Technische Daten der verwendeten Meßgeräte (Herstellerangaben)

Meßgerät	Hersteller	Gasart	Meßbereich	Meßgenauigkeit bez. auf Endwert	Nachweisgrenze	Nullpunktstabilität bez. auf Endwert
Oxynos 100	Rosemount	O ₂	0 - 5 Vol.-% 0 - 100 Vol.-%	±1 %	0,05 Vol.-%	±0,5 %
Binos 1000	Rosemount	CO ₂	0-20 Vol.-%	±1 %	k.A.	±1 %
MCS 100	Perkin Elmer Bodenseewerk	NO	0 - 200 mg/m ³ 0 - 10000 mg/m ³	±2 % ±2 %	1% vom Endwert für alle Gase	±0,5 % für alle Komponenten
		CO	0 - 140 mg/m ³ 0 - 700 mg/m ³	±2 % ±2 %		
		NH ₃	0 - 30 mg/m ³	±2 %		
		SO ₂	0 - 300 mg/m ³ 0 - 1000 mg/m ³	±2 % ±2 %		
		N ₂ O	0 - 50 mg/m ³	±5 %		
		CO ₂	0 - 15 Vol.-%	±2 %		
		H ₂ O	0 - 20 Vol.-%	±2 %		
FID	Bayer Diagnostics	HC	0 - 105 mg/m ³	k.A.	0,2 mg/m ³	k.A.
Sichromat1	Siemens	N ₂ O	Peakhöhen 1:108	±1 %	10 ppm	n.v.
CIMS 500	V&F	Aceton	0,1 - 10 ppm	±5 %	0,1 ppm	n.v.
		Acrolein	0,1 - 10 ppm	±5 %	0,1 ppm	
		Butyraldehyd	0,1 - 10 ppm	±5 %	0,1 ppm	

k.A. keine Angabe

n.v. nicht vorhanden (aufgrund des Meßprinzips)

4 Darstellung der Versuchsergebnisse

4.1 Kraftstoffuntersuchungen

4.1.1 Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)

Im Mai 2000 wurde vom LTW-Arbeitskreis „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ der Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) verabschiedet. Er regelt die Grenzwerte wichtiger Parameter für die motorische Rapsölnutzung. Nach dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff /91/ werden 15 unterschiedliche Kennzahlen gefordert (siehe Abb. 4.1). Der Standard ist in zwei Bereiche unterteilt: Der erste Bereich charakterisiert die für Rapsöl typischen Kennzahlen, die u.a. auf eine mögliche Vermischung mit anderen Kraftstoffen hinweisen können. Diese Parameter sind bei der Ölgewinnung kaum zu verändern und daher sekundär zu betrachten.

Kennzahlen, die für die Motortauglichkeit von hohem Interesse sind und auch durch das Auspressen stark beeinflusst werden können, sind im unteren Teil des Qualitätsstandards zusammengefaßt. (siehe Abbildung 4.1) /75/

	LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung, Weihenstephan		in Zusammenarbeit mit:	
	Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) 05/2000		 	
Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
für Rapsöl charakteristische Eigenschaften				
Dichte (15 °C)	kg/m ³	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 22719
Heizwert	kJ/kg	35000		DIN 51900-3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm ² /s		38	DIN EN ISO 3104
Kälteverhalten				Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen werden erarbeitet)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)				Prüfverfahren wird evaluiert
Koksrückstand	Masse-%		0,40	DIN EN ISO 10370
Iodzahl	g/100 g	100	120	DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg		20	ASTM D5453-93
variable Eigenschaften				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25	DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (1 10 °C)	h	5,0		ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg		15	ASTM D3231-99
Aschegehalt	Masse-%		0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%		0,075	pr EN ISO 12937

Abbildung 4.1: Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff /91/

4.1.2 Versuchsdurchführung und Reproduzierbarkeit

Es wurden 38 Kraftstoffe ausgewählt (siehe Tabelle 4.2) und im lehrstuhleigenen Fettlabor sowie bei der ASG GmbH in Augsburg analysiert. Bei der Auswahl der Untersuchungsparameter wurden bereits überwiegend die (erst im Verlauf des Projektes festgelegten) Werte des Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff /91/ berücksichtigt.

Die Untersuchungen wurden entsprechend den DIN-, ASTM- oder DGF-Anweisungen durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde experimentell in neun Einzelversuchen mit dem Kraftstoff AME (2) überprüft. Die maximal ermittelten Abweichungen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Maximale gemessene Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert bei den Kraftstoff-Untersuchungen

Dichte	Heizwert	Viskosität	Koksrückstand	Schmutz
[kg/l]	[MJ/kg]	[mm ² /s]	[Mass.-%]	[mg/kg]
0,001	0,1	0,4	0,01	0,5

Säurezahl	Asche	Jodzahl	Phosphor	Neutralisationszahl
[mg KOH/g]	[Mass.-%]	[g/100g]	[mg/kg]	[mg KOH/g]
0,01	0,0001	1	0,5	0,01

Die Abweichungen der Einzelwerte von deren Mittelwert variieren je nach untersuchter Kennzahl innerhalb enger Bereiche.

4.1.3 Versuchsergebnisse

In Tabelle 4.2 sind die numerischen Ergebnisse der Standarduntersuchungen zusammengefaßt. Die angegebenen Werte des Qualitätsstandards wurden für den Kraftstoff Rapsöl bearbeitet und können daher nur bedingt auf andere Kraftstoffe übertragen werden (siehe 4.1.1). Zudem sind die Inhaltsstoffe sehr stark von der Preßtechnik, Ölreinigung und Anbausorte abhängig. So sind z.B. für die Purgiernußöle aus Nicaragua und Mali (Nr. 36 und 37) die Werte für die Gesamtverschmutzung weit überschritten, da diese nicht in diesen Ländern filtriert wurden.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Standarduntersuchungen aller Öle und Fette

Öl-Art	Dichte [kg/m ³]	Heizwert [MJ/kg]	Viskosität [mm ² /s]	Koksrückstand [Mass.-%]	Schmutz [mg/kg]	Säurezahl [mg KOH/g]	Asche [Mass.-%]	Jodzahl [g/100g]	Phosphor [mg/kg]
RK-Qualitätsstandard	900-930	>35	<38	<0,40	<25	<2,0	<0,01	100-120	<15
2 AME	883	37,2	5,4	0,07	30,4	0,97	0,001	100	0
3 Biodiesel	880	37,5	4,8	0,11	30,8	1,11	0,002	107	0
4 EME I	878	37,6	4,9	0,02	32,4	0,97	0,000	88	0
5 EME II	885	37,1	4,7	0,03	48,0	1,93	0,000	71	0
6 Distelöl I	923	37,1	32,3	0,61	62,4	0,56	0,004	137	1
7 Distelöl II	917	37,1	41,2	0,43	29,2	0,55	0,001	90	1
8 Erdnußöl	917	37,1	41,2	0,43	29,2	0,55	0,001	90	1
9 Euphorbia-lathyris-Öl	918	36,8	43,7	0,89	39,6	9,99	0,032	84	66
10 Hanföl	926	37,5	29,3	0,60	111,6	2,63	0,010	149	22
11 Lackleinöl	929	37,1	27,6	0,79	56,4	0,94	0,008	174	21
12 Leindotteröl	923	37,0	31,1	0,68	42,0	6,56	0,004	150	6
13 Keimöl	921	37,0	34,1	0,75	68,0	0,69	0,002	122	0
14 Olivenöl	913	37,2	40,4	0,65	40,8	2,08	0,001	83	2
15 Pflanzenölmix	914	37,7	31,6	0,34	75,6	74,37	0,001	113	106
16 Rapsöl I	917	37,6	36,2	1,04	110,8	1,37	0,005	112	7
17 Rapsöl II	918	37,6	36,7	0,70	32,4	1,66	0,007	106	11
18 Saflor	923	37,4	31,3	0,59	26,0	15,51	0,030	133	39
19 Senföl	911	37,8	46,1	0,34	36,4	1,11	0,007	86	2
20 Soja	922	37,4	32,7	0,52	142,4	0,42	0,004	128	1
21 Sonne I	918	37,6	35,8	0,41	255,9	7,14	0,016	100	28
22 Sonne II	914	37,7	40,0	0,39	111,0	9,50	0,013	86	9
23 Sonne III	915	37,7	38,5	0,56	45,2	3,03	0,019	82	19
24 Sonne IV	915	37,7	41,7	0,30	52,0	0,83	0,007	83	2
25 Sonne V	922	38,2	33,2	0,46	128,8	0,83	0,009	128	2
26 Traubenkernöl	922	37,4	32,6	2,27	71,2	0,56	0,000	132	3
27 Walnußöl	923	37,4	30,7	2,33	81,2	1,24	0,004	146	1
28 Orangenketon/AME	880	37,4	4,5	0,06	17,2	1,26	0,000	127	2
29 Rizinußöl/AME	892	37,2	7,1	0,09	51,2	0,97	0,004	97	1
30 Styropor/AME	886	37,3	7,0	0,07	114,4	1,26	0,005	99	1
31 Synthetik I	945	32,7	16,0	0,09	34,4	0,70	0,002	0	1
32 Synthetik II	928	34,2	20,3	0,12	25,0	0,69	0,002	0	0
36 Purgienuß (Nicaragua)	912	37,2	35,7	0,29	830,9	2,21	0,006	91	5
37 Purgienuß (Mali)	915	37,7	34,3	0,38	824,5	11,47	0,022	94	20
39 HO Sonne I	915	37,1	36,3	0,25	145,1	8,74	0,004	93	1
40 HO Sonne II	915	37,7	38,2	0,24	109,3	8,78	0,012	78	12
38 Sommerdiesel	827	42,4	2,7	0,04	7,2	0,96	0,002	1	0
1 Winterdiesel	822	42,5	2,4	0,08	11,9	0,97	0,001	1	0
42 TME	876	37,0	4,3	0,03	305,0	0,23	0,039	97	0

AME = Altfettmethylester

EME = Euphorbia-lathyris-Ester

TME = Tierfettmethylester

HO Sonne = High Oleic Sonnenblumenöl

Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (Mai 2000) nach /91/

Bezüglich der **Dichte** unterscheiden sich die untersuchten Kraftstoffe deutlich zwischen den verschiedenen Gruppen (naturbelassene Öle, Methylester, synthetische Öle, Diesel), innerhalb der Gruppen allerdings nur gering. Die niedrigsten Dichten weisen die Dieselmotoren (Nr. 38 mit 1) auf, die höchsten Werte zeigen die synthetischen Öle mit einem Höchstwert von 0,945 kg/l bei Synthetik I (Nr. 31).

Der **Heizwert** ist von der Dichte und dem C/H-Verhältnis des Kraftstoffes abhängig. Der Wert ist für Dieselmotoren mit 42,4 und 42,5 MJ/kg am höchsten und für die synthetischen Öle aufgrund ihres niedrigen C/H-Verhältnisses mit 32,7 MJ/kg am niedrigsten.

Die **Viskosität** wird bei 40 °C untersucht und ist der wichtigste Parameter für die notwendige Anpassung von Verbrennungsmotoren an naturbelassene Pflanzenöle.

Die Viskosität variiert von 2,4 mm/s² bei Dieselkraftstoff (Nr. 1) bis 46,1 mm/s² bei Senföl (Nr. 19). Die Viskosität der naturbelassenen Pflanzenöle wird maßgeblich von den Inhaltsstoffen, also den einzelnen Fettsäuren bestimmt.

Der **Koksrückstand nach Conradson** ist für die Neigung der Kraftstoffe zur Verkockung des Brennraums und der Einspritzdüsen verantwortlich. Bei den Dieselkraftstoffen (Nr. 38) ist dieser Wert sehr gering (0,04 Mass.-%), für naturbelassene Öle kann dieser Wert bei Traubenkernöl (Nr. 26) bis zu 2,33 Mass.-% erreichen. Der Grenzwert nach dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff liegt bei 0,40 Mass.-%. Bei einem Überschreiten dieses Wertes ist mit einer Motorschädigung beim Dauerlauf bei nicht angepaßten Motoren zu rechnen.

Die **Gesamtverschmutzung** kann durch Sedimentation und Filtration beeinflusst werden und reicht von 7,2 mg/kg für Dieselkraftstoff (38) bis 830,9 mg/kg bei Purgiernußöl (36).

Die **Säurezahl** variiert von 0,23 mg KOH/kg für TME (Nr. 42) bis 74,37 mg KOH/kg bei dem Pflanzenölmix (Nr. 15). Bei einem Einsatz dieses Kraftstoffes in Verbrennungsmotoren muß diesem hohen Wert durch korrosionsfeste Materialien Rechnung getragen werden.

Der **Aschegehalt** der untersuchten Öle reicht von 0,001 Mass.-% bei AME (Nr. 2) bis 0,039 Mass.-% bei TME (Nr. 42). Der Grenzwert von 0,01 Mass.-% wird von den wenigsten naturbelassenen Ölen überschritten.

Die **Jodzahl** spiegelt den Gehalt an Doppelbindungen der einzelnen Öle wieder. Sie variiert zwischen 0 g/100g für die geradkettigen synthetischen Öle (Nr. 31, 32) und 174 g/100g für Lackleinöl (Nr. 11), das einen hohen Anteil der dreifach ungesättigten Linolensäure aufweist.

Der **Phosphorgehalt** ist für Ablagerungen im Verbrennungsraum des Motors verantwortlich und sollte möglichst gering gehalten werden. Ein erhöhter Phosphorgehalt im Kraftstoff führt zu Ablagerungen im Verbrennungsraum und dadurch zu erhöhtem Verschleiß an Kolben und Zylinderbuchsen. Die Höhe des Phosphorgehaltes wird durch die Ölgewinnung stark beeinflusst. Kaltgepresstes Öl aus dezentralen Anlagen weist einen Phosphorgehalt von weniger als 15 mg/kg auf. Durch den Entölungsgrad beim Kaltpressen wird der Phosphorgehalt nur wenig, durch die Saatterperatur beim Warmpressen jedoch stark beeinflusst. Wie in

Abbildung 4.2 zu sehen ist, steigt mit zunehmender Auspreßtemperatur der Phosphorgehalt des ausgepreßten Öles. Um den Grenzwert von 15 mg/kg einhalten zu können, darf das Öl nur kalt gepreßt werden (dies verlängert aber den Auspreßvorgang und verringert die Ölausbeute /112/) oder der Phosphorgehalt müßte bei einer Heißpressung durch eine anschließende Raffinationsstufe nachträglich gesenkt werden. Der Phosphorgehalt der untersuchten Öle reicht bis zu einem Wert von 106 mg/kg bei Pflanzenölmix (Nr. 15).

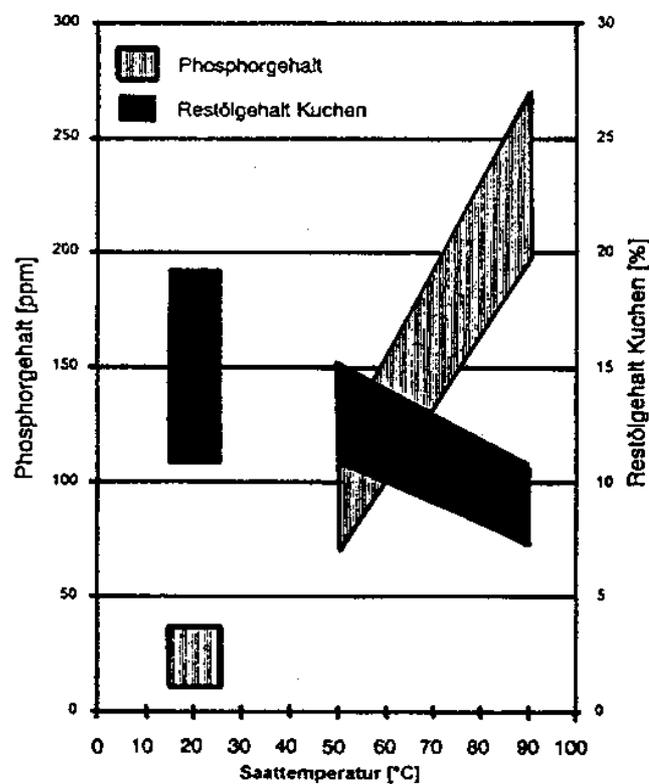


Abbildung 4.2: Einfluß der Saattemperatur beim Pressen auf den Phosphorgehalt des Rapsöls und den Restölgehalt im Kuchen /55/

4.2 Versuchsergebnisse der Fettsäureanalytik

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse der Fettsäureanalytik beschrieben.

4.2.1 Versuchsdurchführung und Reproduzierbarkeit

Die Untersuchung der Fettsäurezusammensetzung erfolgte im lehrstuhleigenen Fettlabor. Zu Beginn der Versuchsreihe wurde der Gaschromatograph mit einer Eichlösung kalibriert, die die acht zu untersuchenden Substanzen enthält. Jede veresterte Probe wurde daraufhin dreimal untersucht und das Ergebnis gemittelt.

Aus einer Meßreihe mit 10 Eichlösungen konnte eine maximale Abweichung der Einzelergebnisse um $\pm 0,5$ Mass.-% vom Mittelwert festgestellt werden.

4.2.2 Versuchsergebnisse

Die numerischen Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchung sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Fettsäureuntersuchung

	Fettsäuren	Palmitinsäure	Stearinsäure	Ölsäure	Linolsäure	Linolensäure	Arachinsäure	Behensäure	Erucasäure	Rest
	Kettenlänge : Doppelbindungen	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	22:0	22:1	
Öl-Nr.	Öl-Art	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%
2	AME	8,8%	3,9%	44,2%	28,5%	5,1%	1,0%	0,0%	0,0%	8,5%
3	Biodiesel	4,5%	1,7%	57,4%	21,3%	10,6%	1,6%	0,4%	0,0%	2,4%
4	EME I	1,6%	0,0%	89,8%	2,9%	2,3%	2,1%	0,1%	0,0%	1,1%
5	EME II	13,4%	1,3%	75,8%	2,7%	1,4%	0,6%	0,0%	0,0%	4,9%
6	Distelöl I	7,5%	4,7%	22,0%	53,5%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%	11,4%
7	Distelöl II	6,2%	2,5%	12,6%	75,2%	0,0%	0,4%	0,5%	0,0%	2,5%
8	Erdnußöl	9,5%	3,1%	42,8%	25,4%	0,2%	8,5%	2,9%	0,0%	7,5%
9	Euphorbia-lathyris-Öl	5,6%	1,7%	76,1%	3,4%	2,5%	1,5%	0,0%	0,0%	9,2%
10	Hanföl	5,9%	2,7%	15,4%	55,2%	17,2%	0,5%	0,0%	0,0%	3,1%
11	Lackleinöl	5,1%	3,0%	17,6%	15,1%	51,8%	0,2%	0,0%	0,0%	7,2%
12	Leindotteröl	4,8%	2,4%	11,6%	14,3%	36,5%	1,4%	0,0%	2,7%	26,2%
13	Keimöl	9,8%	1,8%	26,2%	55,0%	1,0%	0,3%	0,0%	0,0%	6,0%
14	Olivenöl	0,0%	2,5%	68,3%	8,7%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	19,7%
15	Pflanzenölmix	4,4%	1,4%	57,9%	20,1%	9,1%	1,3%	0,7%	0,0%	5,1%
16	Rapsöl I	4,3%	1,6%	58,3%	19,4%	9,7%	1,3%	0,0%	0,0%	5,4%
17	Rapsöl II	4,2%	1,6%	58,0%	19,4%	8,8%	1,3%	0,0%	0,0%	6,6%
18	Saflor	20,3%	9,5%	33,6%	0,8%	2,0%	3,3%	0,0%	4,2%	26,5%
19	Senföl	2,7%	1,4%	20,3%	7,6%	9,1%	11,5%	0,0%	38,5%	8,9%
20	Soja	9,0%	3,8%	19,6%	50,7%	7,5%	0,0%	0,0%	0,0%	9,4%
21	Sonne I	4,4%	3,3%	44,0%	39,8%	0,9%	0,3%	0,0%	0,0%	7,3%
22	Sonne II	2,8%	3,0%	79,6%	9,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%
23	Sonne III	2,4%	2,7%	81,9%	6,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%
24	Sonne IV	3,3%	2,0%	71,4%	8,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	14,7%
25	Sonne V	3,6%	3,4%	19,4%	60,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,1%
26	Traubenkernöl	5,9%	4,0%	19,3%	61,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%
27	Walnußöl	6,6%	2,4%	13,8%	55,3%	10,9%	0,0%	0,0%	0,0%	11,0%
28	Orangenketon/AME	5,1%	5,6%	35,6%	39,8%	3,5%	0,6%	0,0%	0,0%	9,7%
29	Rizinußöl/AME	8,1%	3,8%	40,8%	26,7%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	15,8%
30	Styropor/AME	7,9%	3,5%	48,2%	26,3%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,3%
31	Synthetik I	1,2%	0,0%	5,7%	3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	89,7%
32	Synthetik II	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
36	Purgiernuß (Nicaragua)	9,7%	7,6%	52,4%	22,3%	3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	4,6%
37	Purgiernuß (Mali)	7,6%	8,2%	53,9%	18,4%	5,9%	0,0%	0,0%	0,0%	6,0%
39	HO Sonne I	2,5%	2,2%	47,3%	44,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%
40	HO Sonne II	1,8%	2,0%	43,2%	48,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,9%
38	Sommerdiesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
1	Winterdiesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
42	TME	28,1%	18,4%	40,9%	8,6%	1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%

Rest = natürliche Fettsäuren und andere Bestandteile

Zur Übersicht sind in den nachfolgenden Abbildungen die Fettsäuren der einzelnen Kraftstoffe graphisch dargestellt, wobei nach gesättigten und ungesättigten Fettsäuren unterschieden wird. In Abbildung 4.3 ist der Palmitin-, Stearin- und Arachinsäuregehalt (gesättigte Fettsäuren) der untersuchten Proben aufgezeigt. Dabei weisen die Proben 18 (Safloröl) mit 20,3 Mass.-% und 42 (TME) mit 28,1 Mass.-% den höchsten Palmitinsäuregehalt auf. Ebenso weisen diese Proben mit 9,5 bzw. 18,4 Mass.-% die höchsten Stearinsäuregehalte auf. Der Arachinsäuregehalt der untersuchten Proben ist generell gering und erreicht mit 11,5 Mass.-% bei Senföl (19) den höchsten Wert.

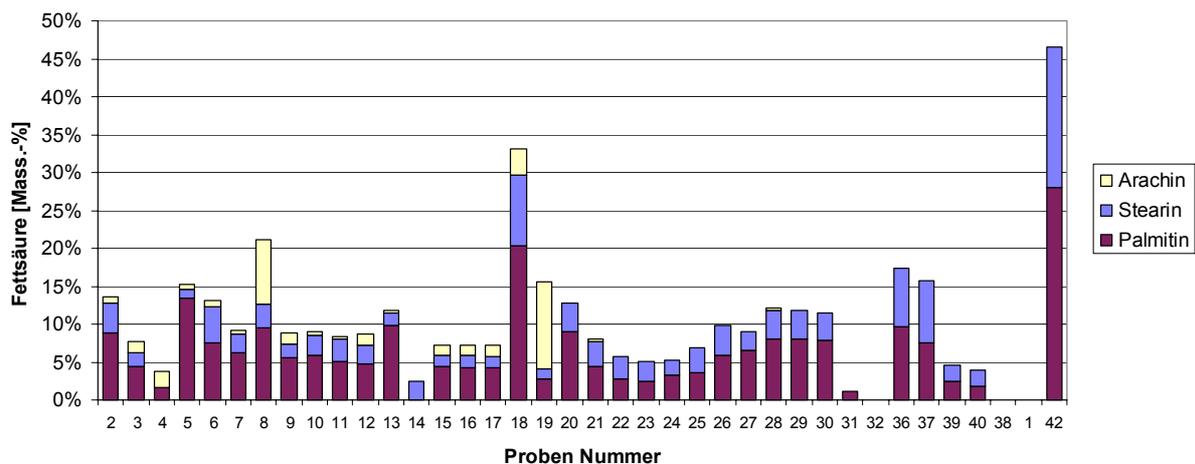


Abbildung 4.3: Anteil der gesättigten Fettsäuren der untersuchten Kraftstoffe

Abbildung 4.4 zeigt den Gehalt an ungesättigten Fettsäuren in den untersuchten Ölen. Dabei läßt sich feststellen, daß alle Öle einen nennenswerten Ölsäuregehalt aufweisen. Besonders bei hochgezüchteten Arten wie HO-Sonnenblumenöl (23) oder EME I (4) kann der Gehalt 80 Mass.-% erreichen. Besonders auffällig ist auch der Linolensäuregehalt der Proben 11 (Lackleinöl) mit 51,8 Mass.-% und 12 (Leindotteröl) mit 36,8 Mass.-%. Der Behensäuregehalt ist generell sehr gering, Erucasäure ist vor allem im Senföl (19) mit 38,5 Mass.-% enthalten.

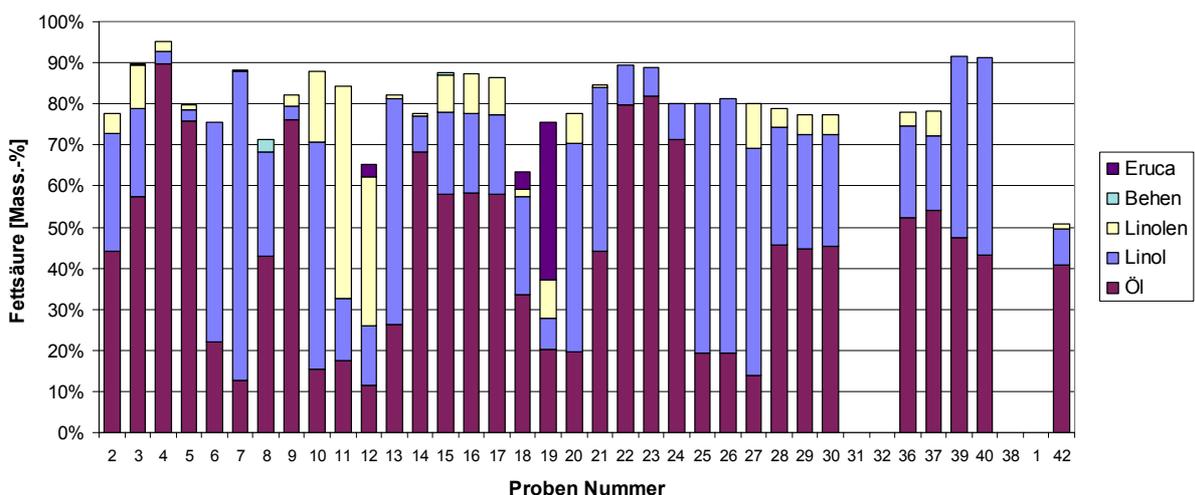


Abbildung 4.4: Öl-, Linol-, Linolen, Behen- und Erucasäuregehalt der untersuchten Kraftstoffe

Abschließend sind in Abbildung 4.5 alle Fettsäuren der untersuchten Proben und der Gehalt an Reststoffen dargestellt.

Als Reststoffe sind Größen aufgeführt, die nicht eindeutig als eine der acht analysierten Fettsäuren identifizierbar sind. Hierbei kann es sich um kurz- oder langkettige Fettsäuren oder auch um aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen handeln. So weisen die Dieselkraftstoffe (Nr. 1, 38) und synthetischen Kraftstoffe (Triglyceride mit C8 und C10 Fettsäuren, Nr. 31, 32) aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung keine analysierte Fettsäure auf und fallen daher unter „Rest“.

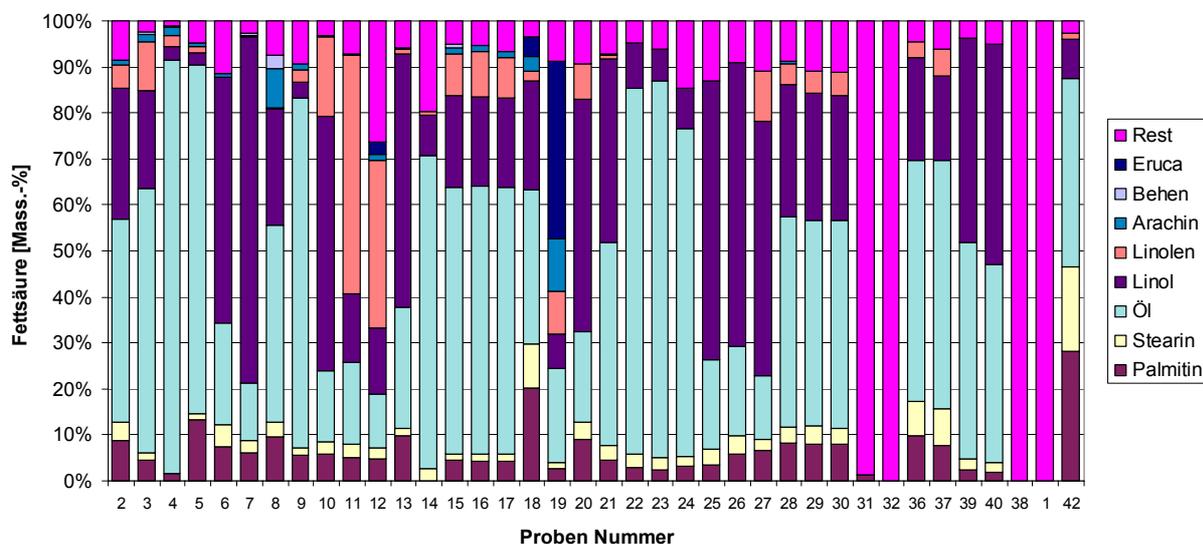


Abbildung 4.5: Übersicht der Fettsäuren der untersuchten Kraftstoffe

4.3 Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Meßwerten am Versuchsstand

4.3.1 Versuchsdurchführung und Auswertung

Zu Beginn der Emissionsuntersuchungen wurden mehrere Arbeiten zur Quantifizierung der Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen am Versuchsstand durchgeführt. Es sollte dabei die Frage geklärt werden, unter welchen Bedingungen zwei verschiedene Kraftstoffe signifikant unterschiedliche Meßwerte liefern. Die in diesem Abschnitt gewonnenen Ergebnisse werden bei der Diskussion der verschiedenen Kraftstoffe in Kapitel 5 als Fehlergrößen verwendet.

Die Grundbedingung für eine Vergleichbarkeit verschiedener Meßwerte ist eine konstante Bezugsgröße. Diese muß so genau wie möglich eingestellt werden, um ein Durchgreifen einer sich verändernden Sollgröße auf die Meßwerte zu verhindern. Als Sollgröße wurde die abgegebene elektrische Wirkleistung und die Kühlwassereintrittstemperatur vor dem Wärmetauscher gewählt. Eine Veränderung der abgegebenen elektrischen Wirkleistung beeinflusst unmittelbar alle thermischen Größen, wie z.B. Abgastemperatur oder Kühlwasseraustrittstemperatur, alle Durchflüsse und damit auch die Emissionen, da diese in der Regel temperaturabhängig sind. Eine spätere Korrektur der Meßwerte ist nicht möglich, da eine veränderte Wirkleistung sich entweder positiv oder negativ auf einen Meßwert auswirkt, in keinem Fall kann jedoch ein linearer Zusammenhang angenommen werden.

Als weiterer Parameter wurde die Kühlwassereintrittstemperatur vor dem Wärmetauscher zu Beginn der Messungen möglichst genau auf einen Wert von 40 °C eingestellt. Die Kühlwassereintrittstemperatur beeinflusst die Abgastemperatur nach dem Wärmetauscher und damit die Abgasemissionen sowie den Wirkungsgrad. Sie wurde zu Versuchsbeginn auf einen Sollwert von ca. 40 °C durch die Regelung des Kühlwasservolumenstroms eingestellt. Diese Einstellung wurde während der Versuche nicht verändert, um thermische Schwankungen zu vermeiden.

Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich der thermischen und energetischen Größen sowie der Emissionen von verschiedenen Kraftstoffen untereinander und zu Dieselmotorkraftstoff. Da jeder Kraftstoff nur in sehr geringen Mengen zur Verfügung stand, konnten für jeden Kraftstoff keine Mehrfachbestimmungen, sondern nur Einzelversuche durchgeführt werden. Es wurde das folgende Verfahren gewählt, um mit den Ergebnissen der Einzelmessungen qualitative Aussagen treffen zu können:

1. Starten des BHKW mit AME und Einstellen der Sollgrößen elektrische Last und Kühlwassereintrittstemperatur
2. Einlaufphase mit dem Referenzkraftstoff AME von mindestens 4 Stunden
3. Aufzeichnung aller Meßgrößen (Temperaturen, Durchflüsse, Emissionen) über einen Zeitraum von 30 Minuten
4. Wechsel des Kraftstoffes

5. Einlaufphase von mindestens 30 Minuten, solange bis sich die veränderten Meßwerte stabil eingestellt haben
6. Wiederholen der Messungen entsprechend 3.

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von Microsoft Excel97 Makroprogrammierung nach folgendem Schema ausgewertet:

1. Importieren der Meßwerte der verschiedenen Datenaufzeichnungsgeräte in eine MS Excel97 Datei
2. Eingabe der von Hand zusätzlich aufgenommenen Werte (Kraftstoffverbrauch, Start- und Endzeit)
3. Automatisierte Berechnung der 30 minütigen Mittelwerte und statistischen Größen für jede untersuchte Kraftstoffprobe. Die Emissionswerte wurden auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-% im Abgas entsprechend TA Luft bezogen /20/.
4. Die PAH-Emissionen wurden an den beladenen Partikelfiltern am Bayerischen Institut für Abfallforschung (BIfA GmbH) in Augsburg untersucht. Dazu wurden die im Exsikkator getrockneten Filter ausgewogen, gefaltet und in Petrischalen verpackt.

Dieses Versuchsschema wurde mit dem Referenzkraftstoff AME (2) über einen Versuchszeitraum von insgesamt 60 Stunden im Wechsel mit allen anderen Kraftstoffen untersucht. Die Ergebnisse aus neun identischen Versuchen mit dem Kraftstoff AME sind im folgenden dargestellt.

4.3.2 Eingestellte Sollgrößen

Zu Beginn werden die eingestellten Sollgrößen P_{el} und $T_{Kühlwasser\ ein}$ betrachtet. Die **elektrische Last** wurde mit rein Ohmschen Wirkleistungsverbrauchern dargestellt. Das BHKW verfügt über eine Spannungsregelung, weshalb die Wirkleistung nur im Rahmen der Regelungenauigkeit abweicht. Die Meßergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Der **Fehlerbalken** über dem Mittelwert zeigt den minimalen und maximalen Wert aller Versuche.

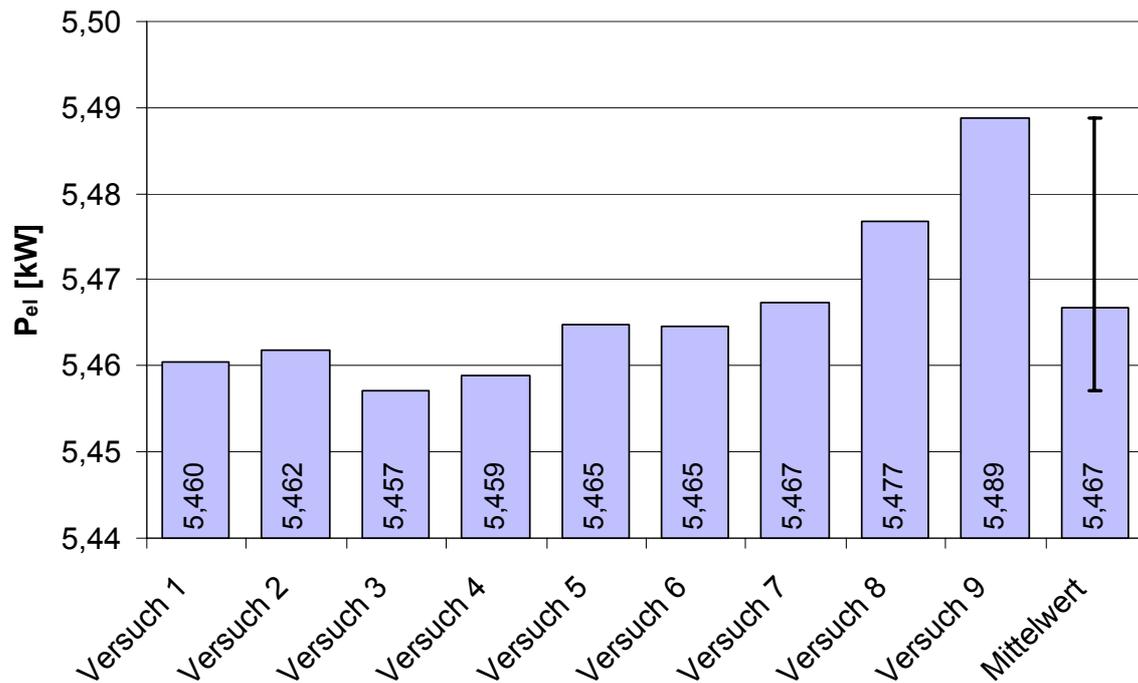


Abbildung 4.6: Elektrische Leistung P_{el}

Im Verlauf der viertägigen Messungen zeigte sich ein geringer Anstieg der elektrischen Leistung um 0,8 % von 5,457 kW auf 5,489 kW. Der Mittelwert aller Messungen beträgt 5,467 kW. Der Anstieg der abgegebenen elektrischen Wirkleistung ist sehr gering und wurde bei der Versuchsdiskussion nicht berücksichtigt.

Der Meßwert der **Kühlwassereintrittstemperatur** bei den einzelnen Versuchen schwankt zwischen 39,3 °C und 40,0 °C (siehe Abbildung 4.7). Eine veränderte Kühlwassereintrittstemperatur bedingt eine veränderte Austrittstemperatur und damit ein annähernd konstantes ΔT , weshalb auf eine Einregelung der Temperatur verzichtet wurde. Der Mittelwert aller Eintrittstemperaturen liegt bei 39,4 °C.

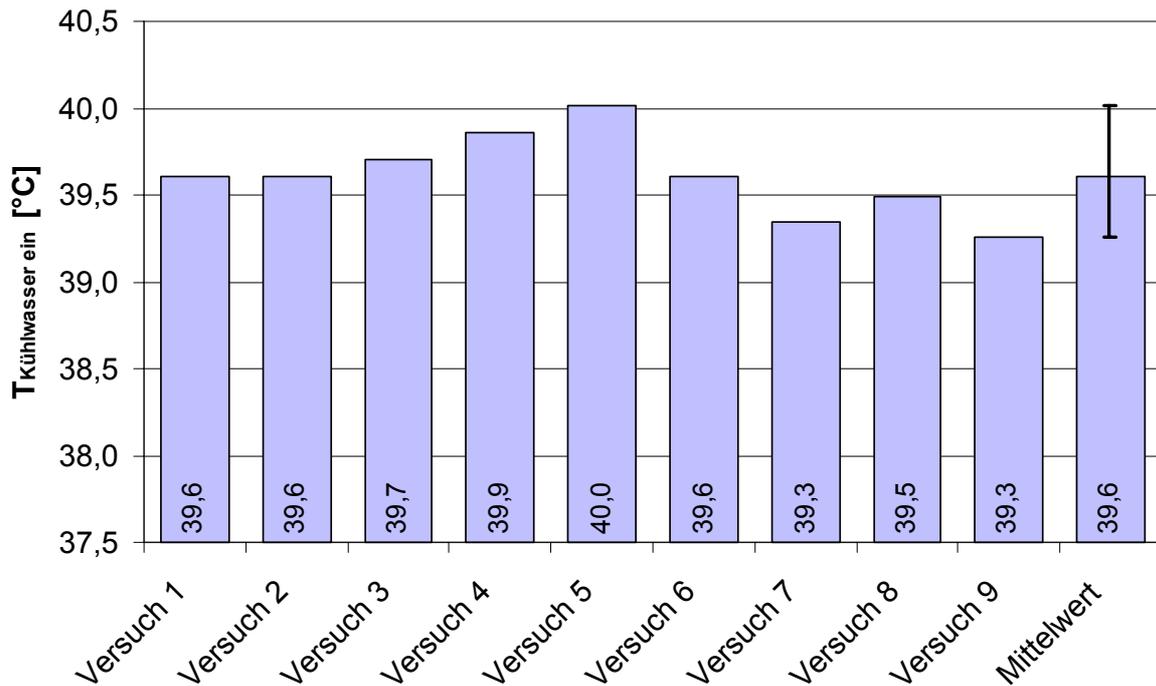


Abbildung 4.7: Kühlwassereintrittstemperatur $T_{\text{Kühlwasser ein}}$

4.3.3 Thermische und energetische Meßgrößen

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit bezüglich der Sollwerte und der thermischen und energetischen Größen zusammengefaßt. Zusätzlich sind in den untersten fünf Spalten die statistischen Daten Mittelwert, Standardabweichung, prozentuale Abweichung der Standardabweichung umgerechnet nach den Mittelwert und die maximale Abweichung als Absolutwert bzw. prozentual umgerechnet nach den Mittelwert aufgeführt.

Die Sollgröße **elektrische Leistung** P_{el} bedingt alle anderen Größen. Die maximale Abweichung vom Mittelwert liegt bei 22 W oder 0,40 % und stellt dabei die kleinstmögliche Abweichung zwischen zwei Kraftstoffen dar.

Die für die Verbrennung benötigte **Ansaugluft** (T_{Ansaug}) wird in der schallgedämmten Haube des BHKW angesaugt. Dadurch wird eine Kühlung der inneren Komponenten gewährleistet. Die Temperatur der angesaugten Verbrennungsluft schwankte maximal 2,1 % um einen Mittelwert von 60,6°C. Die Temperatur der Ansaugluft wirkt

sich direkt auf eine erhöhte Verbrennungstemperatur und damit auf ein insgesamt erhöhtes Temperaturniveau der Abgas- und Kühlwassertemperaturen aus.

Die **Abgastemperatur vor dem Wärmetauscher** (T_{AGvor}) ist im wesentlichen von der Temperatur der Ansaugluft und der eingestellten elektrischen Wirkleistung abhängig. So ist in den Versuchen 8 und 9 die leicht erhöhte Abgastemperatur auf eine geringfügig erhöhte elektrische Wirkleistung, bei einer gleichzeitig erhöhten Temperatur der Ansaugluft, zurückzuführen. Die Temperatur der Abgase vor dem Wärmetauscher hat einen Mittelwert von 336,3 °C bei einer maximalen Abweichung vom Mittelwert um 9,3 K.

Der **Brennstoffmassenstrom** (\dot{m}_{Br}) in kg/h ist von der elektrischen Wirkleistung abhängig. Der Mittelwert liegt bei 2,461 kg/h, die maximale Abweichung aller Versuche vom Mittelwert beträgt 9 g/h.

Die **Gesamtleistung** P_{ges} wird ermittelt durch Addition von elektrisch (P_{el}) und thermisch (P_{th}) produzierter Leistung.

Der **elektrische Wirkungsgrad** η_{el} ist der Quotient aus abgegebener elektrischer Leistung P_{el} dividiert durch die zugeführte Brennstoffleistung P_{br} , wie in Formel (4.1) dargestellt.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{Br}} \quad (4.1)$$

η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad	$[-]$
P_{el}	Elektrische Leistung	$[kW]$
P_{Br}	Brennstoffleistung	$[kW]$

Analog dazu zeigt die Formel (4.2) den **thermischen Wirkungsgrad** η_{th} als Quotient aus abgegebener thermischer Leistung P_{th} und zugeführter Brennstoffleistung P_{br} .

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{Br}} \quad (4.2)$$

η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	$[-]$
P_{th}	Thermische Leistung	$[kW]$
P_{Br}	Brennstoffleistung	$[kW]$

Die Summe beider Wirkungsgrade ist der **Gesamtwirkungsgrad** η_{ges} . Dieser wird als Quotient der Summe der elektrischen und thermischen Leistung und der zugeführten Brennstoffleistung beschrieben, siehe Formel (4.3).

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{Br}} \quad (4.3)$$

η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad	$[-]$
P_{el}	Elektrische Leistung	$[kW]$
P_{th}	Thermische Leistung	$[kW]$
P_{Br}	Brennstoffleistung	$[kW]$

Mit der Formel (4.4) läßt sich die **Brennstoffleistung** P_{Br} als Produkt von Brennstoffmassenstrom und Heizwert ausdrücken.

$$P_{Br} = H_u * \dot{m}_{Br} \quad (4.4)$$

P_{Br}	Brennstoffleistung	$[kW]$
H_u	Unterer Heizwert des Brennstoffs	$\left[\frac{kJ}{kg} \right]$
\dot{m}_{Br}	Brennstoffmassenstrom	$\left[\frac{kg}{s} \right]$

Die **thermische Leistung** P_{th} ist dagegen das Produkt aus Wärmekapazität, Kühlwassermassenstrom und Kühlwassertemperaturdifferenz, wie in Formel (4.5) zu sehen ist.

$$P_{th} = c_{p(T)} * \dot{m}_{KW} * \Delta \mathcal{G}_{KW} = c_{p(T)} * \delta_{KW} * \dot{V}_{KW} * \left(\mathcal{G}_{KW_{aus}} - \mathcal{G}_{KW_{ein}} \right) \quad (4.5)$$

P_{th}	Thermische Leistung	$[kW]$
$c_{p(T)}$	Wärmekapazität von Wasser	$\left[\frac{kJ}{kg * K} \right]$
\dot{m}_{KW}	Kühlwassermassenstrom	$\left[\frac{kg}{s} \right]$
$\Delta \mathcal{G}_{KW}$	Kühlwassertemperaturdifferenz	$[K]$

δ_{KW}	Temperaturabhängige Dichte des Kühlwassers	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
\dot{V}_{KW}	Kühlwasservolumenstrom	$\left[\frac{kg}{s} \right]$
$\mathcal{G}_{KW_{aus}}$	Kühlwasseraustrittstemperatur	$[^{\circ}C]$
$\mathcal{G}_{KW_{ein}}$	Kühlwassereintrittstemperatur	$[^{\circ}C]$

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit

Versuch		P el	Kühl ein	Kühl aus	TAnsaug	TAg vor	TAg nach	m _{Br}	V _{Br}	P _{Br}	P _{th}	P _{ges}	η el	η th	η ges
		[kW]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/h]	[l/h]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[%]
Versuch 1	AME	5,460	39,60	62,68	60,7	335,1	183,9	2,452	2,777	25,34	16,70	22,16	21,55	65,90	87,44
Versuch 2	AME	5,462	39,61	62,71	59,3	335,3	183,8	2,460	2,786	25,42	16,72	22,18	21,49	65,75	87,24
Versuch 3	AME	5,457	39,71	62,80	60,2	334,9	183,5	2,465	2,792	25,47	16,72	22,18	21,42	65,65	87,07
Versuch 4	AME	5,459	39,86	62,98	60,6	334,6	183,0	2,462	2,788	25,44	16,75	22,21	21,46	65,85	87,31
Versuch 5	AME	5,465	40,01	63,10	60,7	334,3	182,8	2,459	2,785	25,41	16,73	22,19	21,51	65,82	87,33
Versuch 6	AME	5,465	39,60	62,78	60,2	333,6	182,5	2,465	2,792	25,47	16,79	22,25	21,45	65,92	87,37
Versuch 7	AME	5,467	39,35	62,48	60,7	334,3	182,9	2,471	2,798	25,53	16,81	22,27	21,42	65,83	87,25
Versuch 8	AME	5,477	39,49	62,43	61,6	339,2	188,5	2,460	2,786	25,42	16,64	22,12	21,54	65,47	87,02
Versuch 9	AME	5,489	39,26	62,21	61,4	345,7	193,5	2,458	2,783	25,40	16,61	22,10	21,61	65,41	87,02
Mittelwert		5,467	39,61	62,68	60,6	336,3	184,9	2,461	2,787	25,43	16,72	22,19	21,49	65,73	87,23
Stabw		0,010	0,23	0,28	0,7	3,8	3,7	0,005	0,006	0,05	0,06	0,06	0,07	0,19	0,16
Stabw	%	0,18%	0,59%	0,44%	1,11%	1,14%	1,99%	0,21%	0,21%	0,21%	0,38%	0,26%	0,30%	0,28%	0,18%
Max Abweichung		0,022	0,40	0,47	1,3	9,3	8,6	0,009	0,010	0,10	0,11	0,09	0,12	0,33	0,22
Max Abweichung	%	0,40%	1,03%	0,76%	2,13%	2,70%	4,42%	0,38%	0,38%	0,38%	0,65%	0,40%	0,55%	0,50%	0,25%

Die Versuche zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit zeigen, daß sich insgesamt alle thermischen und energetischen Meßwerte in einem engen Rahmen bewegen.

4.3.4 Emissionsuntersuchungen

Nachfolgend sind in Tabelle 4.5 die Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen dargestellt. Die Emissionen sind entsprechend der TA Luft auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-% im Abgas bezogen /20/. Zusätzlich sind in den untersten fünf Spalten die statistischen Daten Mittelwert, Standardabweichung, prozentuale Abweichung der Standardabweichung umgerechnet nach den Mittelwert und die maximale Abweichung als Absolutwert bzw. prozentual umgerechnet nach den Mittelwert aufgeführt.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Emissionen

Versuch		NO _x	CO	CO ₂	CH	O ₂	SO ₂	Partikel	Aceton	Butyraldehyd	Acrolein
		[mg/m ³]	[mg/m ³]	[Vol.-%]	[mg/m ³]	[Vol.-%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	ppm	ppm	ppm
Versuch 1	AME	1614	252,3	11,47	47,1	9,76	5,23	48,5	5,99	1,52	2,05
Versuch 2	AME	1605	243,9	11,49	42,3	9,74	3,28	47,7	6,30	1,53	2,35
Versuch 3	AME	1586	250,1	11,46	46,7	9,71	3,12	44,4	6,03	1,50	2,25
Versuch 4	AME	1574	248,3	11,42	49,2	9,69	1,90	44,7	5,25	1,70	1,84
Versuch 5	AME	1572	245,5	11,42	47,7	9,70	1,76	44,5	4,06	1,47	1,74
Versuch 6	AME	1563	245,7	11,43	47,8	9,70	1,65	45,7	4,65	1,71	1,20
Versuch 7	AME	1524	239,8	11,42	42,2	9,66	1,14	44,4	3,58	1,49	1,54
Versuch 8	AME	1549	239,5	11,53	44,0	9,75	1,02	42,0	4,31	1,73	1,58
Versuch 9	AME	1565	241,9	11,61	44,8	9,78	0,85	40,9	4,28	1,75	1,50
Mittelwert		1573	245,2	11,47	45,8	9,72	2,22	44,7	4,94	1,60	1,78
Stabw		28	4,5	0,06	2,5	0,04	1,42	2,4	0,99	0,12	0,38
Stabw	%	1,75%	1,82%	0,56%	5,5%	0,39%	64%	5,4%	20,0%	7,3%	21,1%
Max Abweichung		49	7,1	0,14	3,5	0,06	3,01	3,9	1,36	0,15	0,58
Max Abweichung	%	2,88%	2,62%	0,84%	7,6%	0,60%	99%	8,6%	27,6%	8,6%	32,2%

Die Abweichungen der Meßwerte bewegen sich in einem etwas größeren Rahmen als die thermischen und energetischen Meßgrößen. Es werden die von den Herstellern angegebenen Werte für die Wiederholbarkeit nicht erreicht (vgl. Kapitel 3.3.6). Die maximalen Abweichungen der Komponenten NO und CO liegen mit einem Wert von unter 2,9 % umgerechnet nach den Mittelwert noch in einem engen Rahmen. Die Kohlenwasserstoffe schwanken mit maximalen Abweichungen von 7,6 % umgerechnet nach den Mittelwert bereits deutlich. Gründe liegen in dem niedrigen Meßwert umgerechnet nach den Meßbereichsendwert des Gerätes. Die gravimetrisch bestimmten Partikelemissionen weisen eine maximale Abweichung von 8,6 % umgerechnet nach den Mittelwert auf. Die Ergebnisse für die Sauerstoff und Kohlendioxidmessung sind aufgrund des großen Meßwertes über den gesamten Meßzeitraum relativ stabil, weshalb die maximalen Abweichungen dieser Komponenten unter 0,84 % liegen. Auffällig sind die großen prozentualen Schwankungen bei der Schwefeldioxidanalyse, was von dem sehr niedrigen Meßwert herrührt, da der verwendete Kraftstoff nahezu keinen Schwefel enthält. Bei den Aceton-, Butyraldehyd- und Acroleinmessungen zeigt sich mit Abweichungen von bis zu 32,2 %, daß das gewählte Meßverfahren noch in der Genauigkeit weiter verbessert werden muß.

4.3.5 PAH-Untersuchungen

Die Untersuchung der PAH-Emissionen erfolgte auf den Partikelfiltern. Es wurden dabei die 16 nach dem EPA Standard definierten Emissionen betrachtet. Die Probenentnahme und -aufbereitung erfolgte nach den Vorgaben der EPA.

Um die Qualität der Ergebnisse, vor allem im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit mit anderen PAH-Untersuchungen besser beurteilen zu können, wurden aus den neun gesammelten Proben sechs zufällig ausgewählte Proben am Bayerischen Institut für Abfallforschung (BfA GmbH) in Augsburg und die restlichen drei Proben am Lehrstuhl für Chemisch-technische Analyse und Chemische Lebensmitteltechnologie (CTA) der TU München (Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dr.agr.habil. H. Parlar) zur Untersuchung in Auftrag gegeben. Es zeigen sich bei beiden Untersuchungslabors deutliche Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert. Dies liegt wahrscheinlich an der schwierigen und hochsensiblen Analytik mit mehrfacher Aufkonzentration der Probesubstanzen. Generell müssen Ergebnisse aus der Spurenanalytik sehr kritisch betrachtet werden, da, wie im gezeigten Fall, auch bei einer immer gleichen Versuchsdurchführung und Probenaufbereitung schwankende Meßergebnisse vorliegen können.

Es wurden nicht für alle Stoffe Emissionswerte festgestellt, wie in Tabelle 4.6 ersichtlich ist.

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der PAH-Emissionen

	BifA	CTA	BifA	CTA	BifA	CTA
	Mittelwert	Mittelwert	Max. Abw.	Max. Abw.	Max. Abw.	Max. Abw.
	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[%]	[%]
Naphthalin	-	-	-	-	-	-
Acenaphthylen	0,069	-	0,035	-	51%	-
Acenaphthen	-	-	-	-	-	-
Fluoren	0,008	-	0,012	-	158%	-
Phenanthren	0,522	-	0,513	-	98%	-
Anthracen	0,009	0,532	0,014	0,351	156%	66%
Fluoranthren	0,213	0,130	0,095	0,041	45%	32%
Pyren	0,389	0,284	0,224	0,262	58%	92%
Benzo(a)anthracen	0,006	-	0,007	-	110%	-
Chrysen	0,017	-	0,009	-	55%	-
Benzo(b)fluoranthren	-	0,440	-	0,414	-	94%
Benzo(k)fluoranthren	-	0,088	-	0,058	-	65%
Benzo(e)pyren	0,002	-	0,004	-	245%	-
Benzo(a)pyren	-	-	-	-	-	-
Perylen	-	-	-	-	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pyren	-	-	-	-	-	-
Dibenz(ah)anthracen	-	-	-	-	-	-
Benzo(ghi)perylene	-	-	-	-	-	-
Coronen	-	-	-	-	-	-
Summe PAH	1,234	1,474	0,913	1,126	74%	76%
Summe PAH (k)	0,412	0,812	0,240	0,734	58%	90%

In der graphischen Auftragung in Abbildung 4.8 zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung bei der analysierten Summe der PAH. Die einzelnen Substanzen konnten dabei nicht von beiden Untersuchungslabors eindeutig nachgewiesen werden. Die Fehlerindikatoren stellen die maximalen Abweichungen der einzelnen Versuche dar.

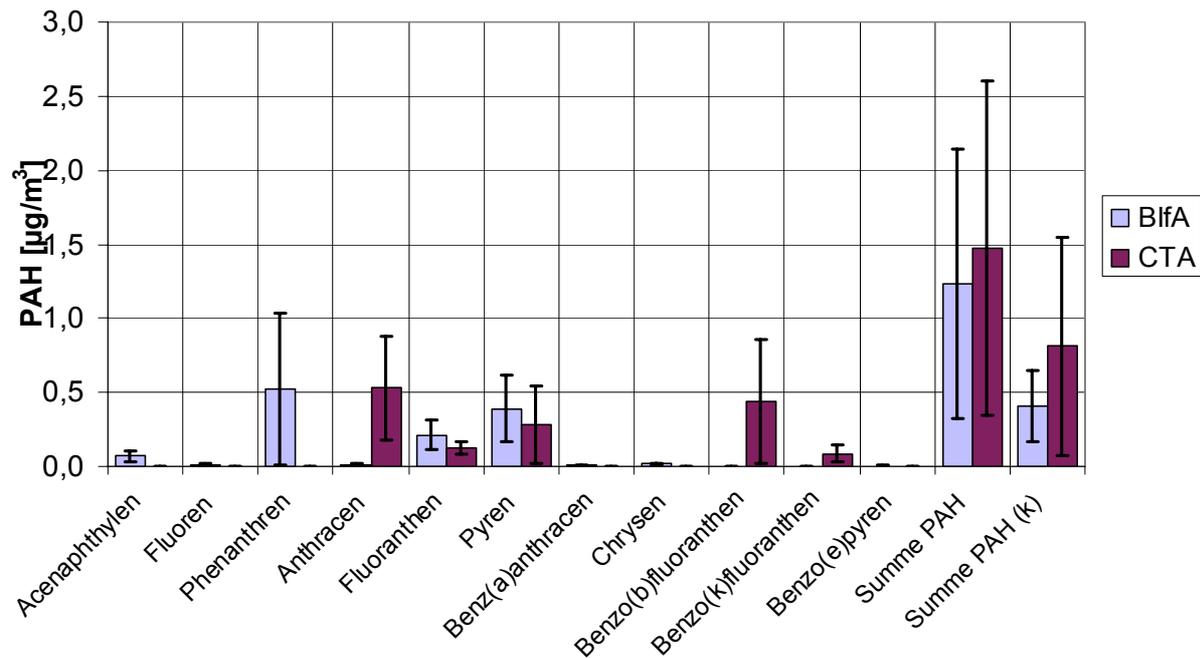


Abbildung 4.8: Reproduzierbarkeit der PAH-Emissionen umgerechnet nach TA Luft

Es bleibt festzustellen, dass die PAH-Analytik starken Schwankungen bezüglich der analysierten Substanzen und der Meßwerte unterliegt. Eine gezielte Auswertung einzelner Substanzen kann nur dann als sinnvoll angesehen werden, wenn die Untersuchungen von einem Untersuchungslabor aufgenommen worden sind. Ein Vergleich über die Summe an PAH (kanzerogen und nicht kanzerogen), wie in der Literaturrecherche durchgeführt, ist dabei ebenfalls kritisch zu bewerten, da die Versuchsergebnisse maßgeblich von der Qualität der Probennahme und dem gewählten Untersuchungslabor abhängen.

Aufgrund der großen Streuungen wurden die weiteren PAH-Untersuchungen nur an einem Untersuchungslabor (BifA) durchgeführt.

4.4 Emissionsuntersuchungen von 38 verschiedenen Kraftstoffen

4.4.1 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Vorgaben. Aufgrund der Erfahrungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit wurden alle Versuche in einer viertägigen Meßreihe nach folgender Vorgehensweise durchgeführt:

1. 5 Einzelversuche mit AME,
2. 3 Einzelversuche mit Diesel,
3. 5 Probekraftstoffe,
4. 1 Einzelversuch AME,
5. 1 Einzelversuch Diesel,
6. weiteres Vorgehen entsprechend Punkt 3.

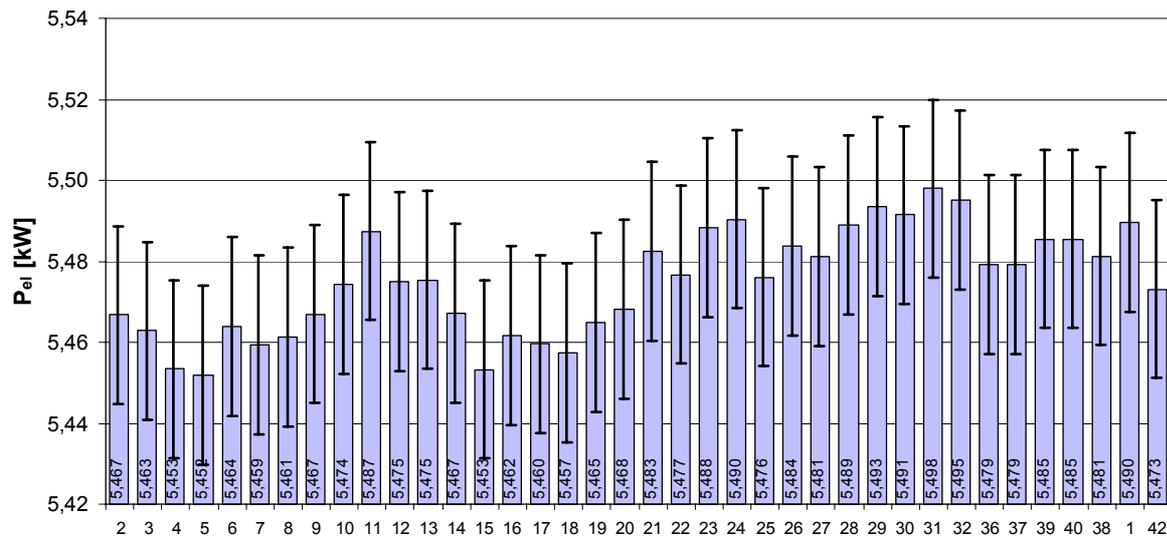
Mit Hilfe der Mehrfachuntersuchung der Referenzkraftstoffe kann ein Abweichen der Meßwerte von den in Kapitel 4.3 gewonnenen Fehlerintervallen sichtbar gemacht werden, und die Versuche können gegebenenfalls wiederholt werden, ohne daß die ganze Messung abgebrochen werden muß.

Zur **Versuchsauswertung** wurden MS Excel97 Makros verwendet, die eine automatisierte Berechnung der Ergebnisse ermöglichen. Die Emissionsergebnisse sind dabei auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-% im Abgas entsprechend TA Luft bezogen /20/.

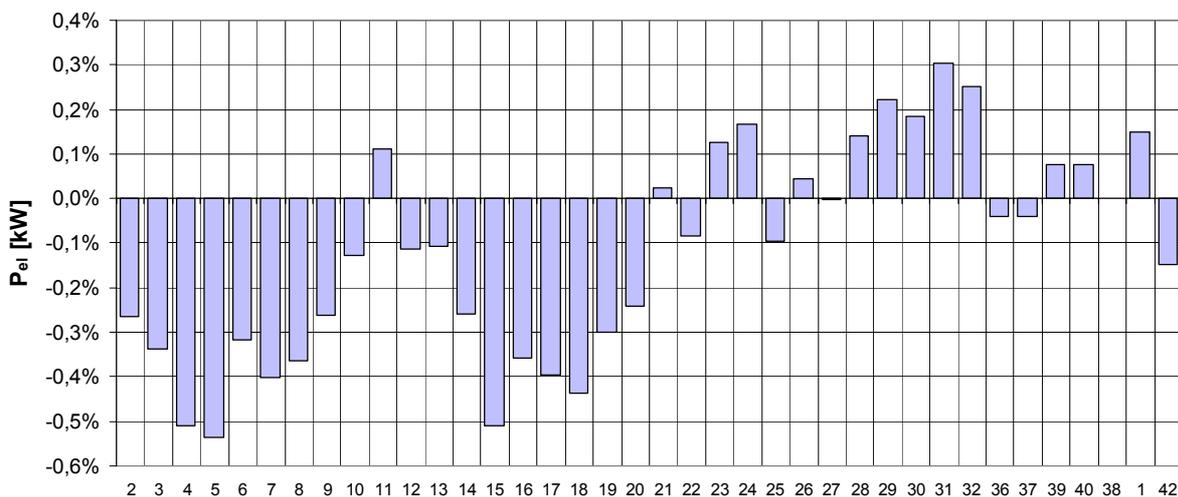
Die **Fehlerindikatoren** der Diagramme sind die in Kapitel 4.3 ermittelten Werte der Reproduzierbarkeit. Von einer signifikanten Unterscheidung zweier Kraftstoffe kann daher nur dann gesprochen werden, wenn sich die Fehlerintervalle nicht überlappen /89/.

4.4.2 Eingestellte Sollgrößen

Zu Beginn werden die eingestellten Sollgrößen P_{el} und $T_{Kühlwasser\ ein}$ betrachtet. Die **elektrische Wirkleistung** ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

Abbildung 4.9: Elektrische Wirkleistung P_{el}

Wie in Abbildung 4.10 ersichtlich, konnte im Verlauf der viertägigen Messungen eine Schwankung der elektrischen Leistung von - 0,5 % bis + 0,3 % umgerechnet nach den Mittelwert der elektrischen Leistung bei Dieseldieselkraftstoff erreicht werden, was den Regelbereich der Leistungsregelung von ± 1 % noch unterschreitet. Somit wurde die Bedingung erfüllt, eine möglichst konstante Sollgröße vorzugeben.

Abbildung 4.10: Prozentuale Abweichung der elektrische Leistung P_{el} bezogen auf Dieseldieselkraftstoff (38)

In Abbildung 4.11 ist die **Kühlwassereintrittstemperatur** aufgezeigt. Der Mittelwert der einzelnen Messungen schwankt zwischen 38,5 °C und 39,8 °C. Eine veränderte

Kühlwassereintrittstemperatur bedingt eine veränderte Austrittstemperatur und damit ein annähernd konstantes ΔT . Aufgrund der geringen Abweichungen wurde auf eine Regelung dieser Temperatur verzichtet.

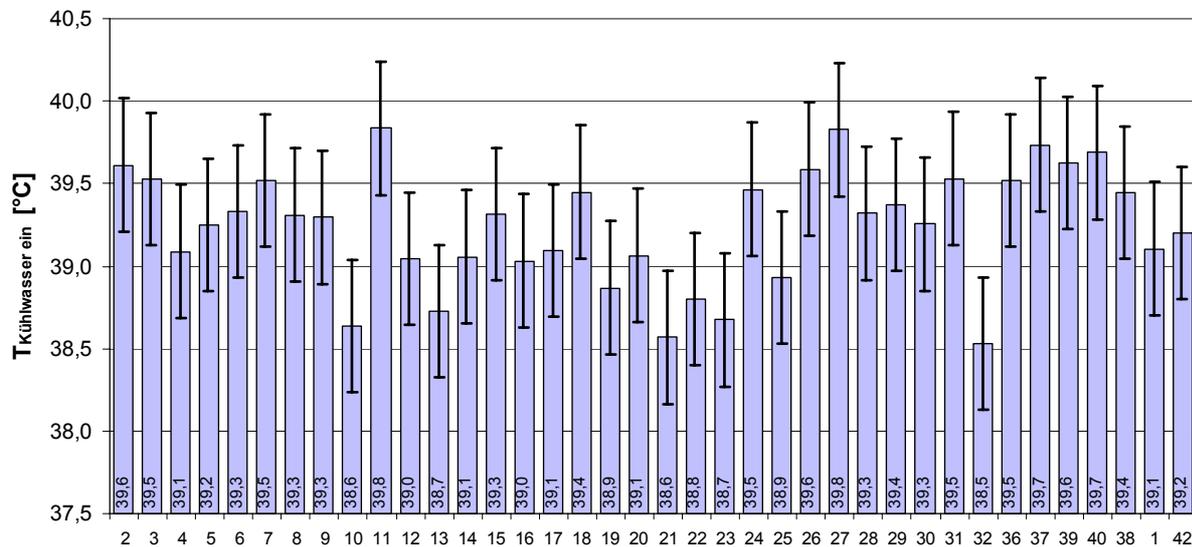


Abbildung 4.11: Kühlwassereintrittstemperatur vor dem Wärmetauscher $T_{\text{Kühlwasser ein}}$

4.4.3 Thermische und energetische Meßgrößen

Die **Abgastemperatur vor dem Wärmetauscher** ist im wesentlichen von dem verwendeten Kraftstoff, der Temperatur der Ansaugluft und der eingestellten elektrischen Wirkleistung abhängig. Die für die Verbrennung benötigte Luft wird in der schallgedämmten Haube des BHKW angesaugt. Die Ansaugluft sowie die elektrische Wirkleistung waren möglichst konstant eingestellt, trotzdem müssen bei einem direkten Vergleich der Abgastemperaturen zweier Kraftstoffe diese beiden Größen mit berücksichtigt werden.

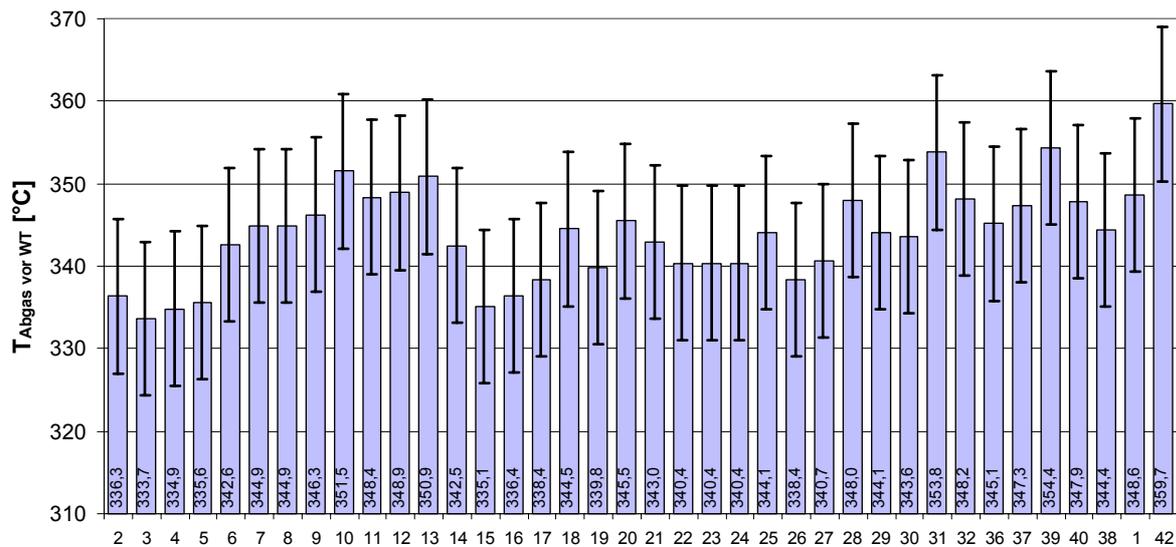


Abbildung 4.12: Abgastemperatur vor dem Wärmetauscher $T_{\text{Abgas vor WT}}$

Die höchste Temperatur tritt bei Tierfettmethylester (42) mit 359,7 °C auf. Die elektrische Leistung wurde von der Regelung des BHKW konstant gehalten, weshalb die hohe Temperatur auf eine erhöhte eingebrachte Brennstoffleistung und damit auf einen schlechteren Wirkungsgrad hindeutet. Biodiesel (3) hat mit einer Temperatur von 333,7 °C den niedrigsten Wert.

Der **Brennstoffmassenstrom** in kg/h ist vor allem vom Heizwert des verwendeten Brennstoffs und der abgegebenen elektrischen Wirkleistung abhängig. Aufgrund des Heizwertes der beiden verwendeten synthetischen Kraftstoffe (31, 32) ergibt sich auch ein großer Brennstoffmassenstrom, wie in Abbildung 4.13 ersichtlich. Wegen des hohen Heizwertes der beiden Dieselmotorkraftstoffe (1, 38) ist der Brennstoffmassenstrom am niedrigsten.

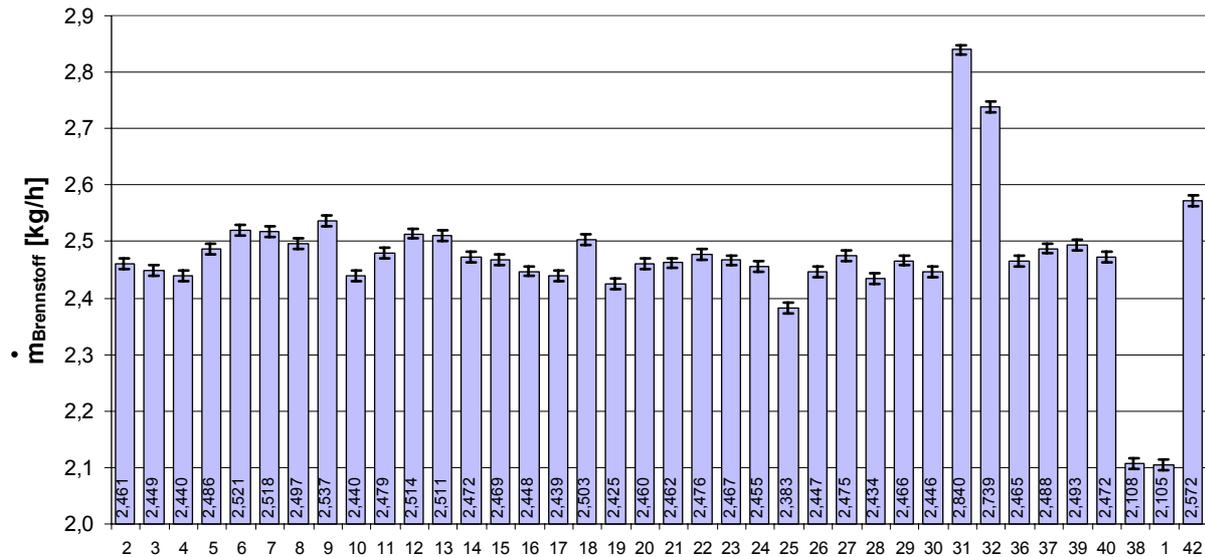


Abbildung 4.13: Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{Kraftstoff}}$

Die in Abbildung 4.14 dargestellte **thermische Leistung** berechnet sich aus der Differenz von Kühlwassereintritts- und austrittstemperatur, multipliziert mit dem Kühlwassermassenstrom und der Wärmekapazität des Wassers. Je größer die abgegebene thermische Leistung ist, desto mehr Kraftstoffwärme wird über Reibung und Wärmeverluste dem Kühlkreislauf zugeführt und um so niedriger ist der elektrische Wirkungsgrad. Es zeigt sich für TME (42) der höchste Wert. Für einen Serieneinsatz des Kraftstoffes müssen noch Optimierungen vorgenommen werden. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die beiden synthetischen Kraftstoffe, die ebenfalls eine Erhöhung der abgegebenen thermischen Leistung des BHKW bewirken. Die niedrigsten Werte weisen die Dieselmischungen auf. Die verschiedenen Mischungen aus AME und Zusatzstoffen (28 - 30) zeigen keine Auswirkung auf die abgegebene thermische Leistung im Vergleich zu reinem AME (2).

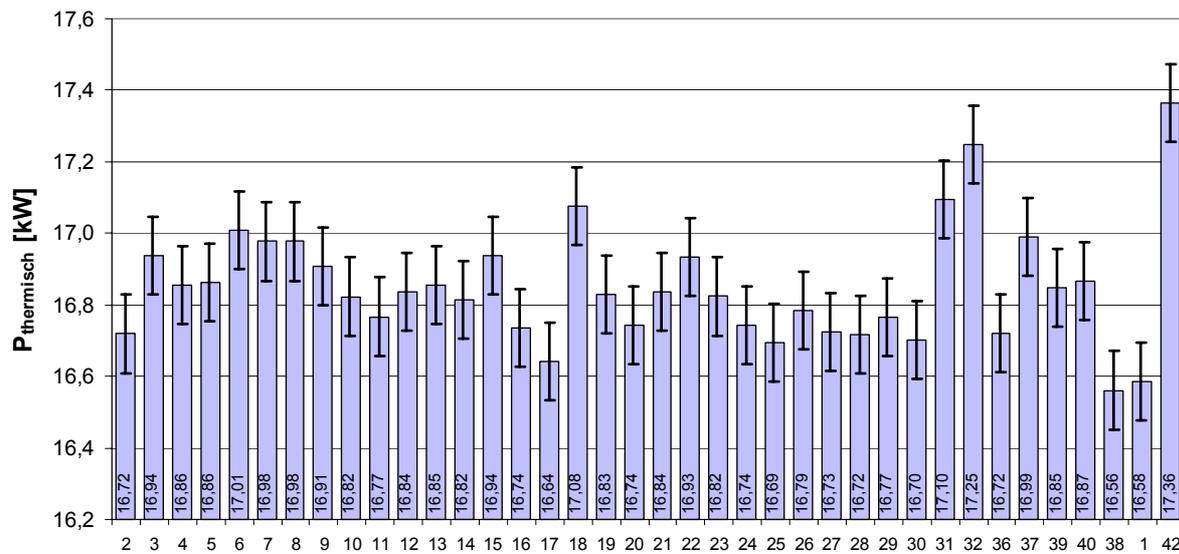
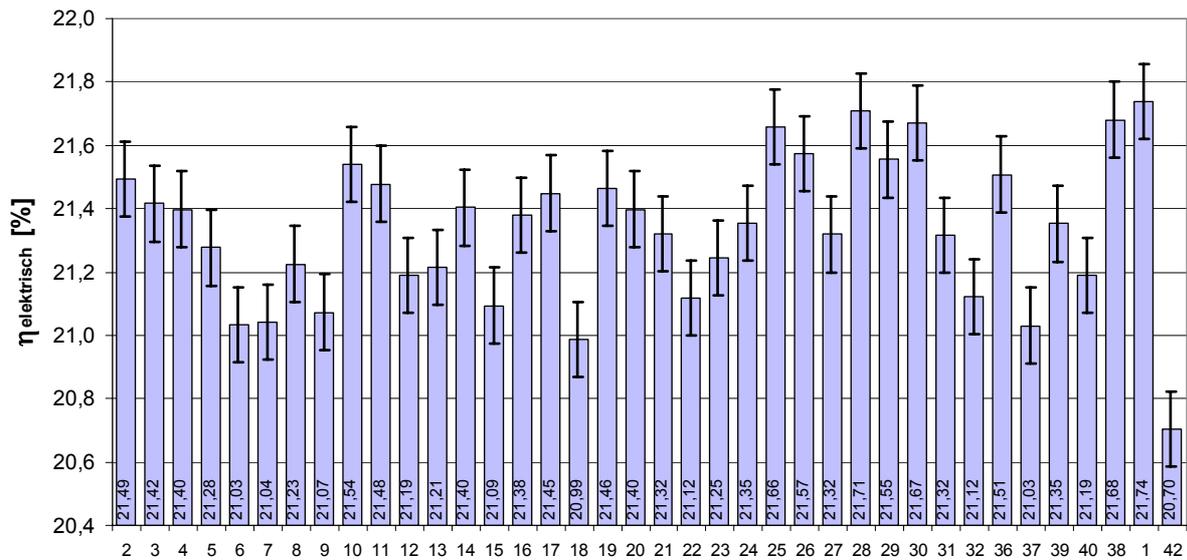
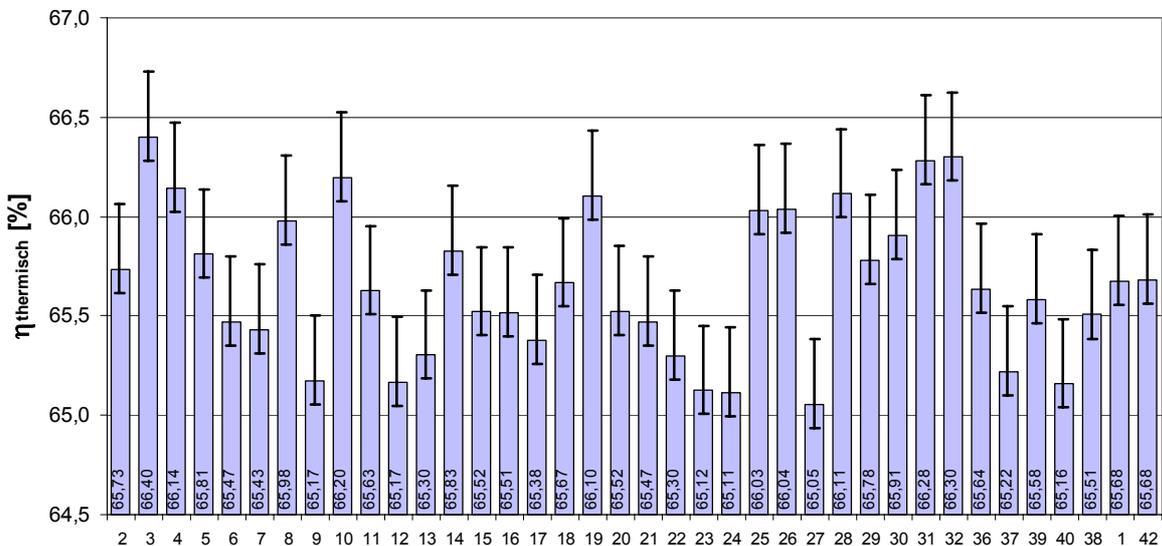


Abbildung 4.14: Thermische Leistung $P_{\text{thermisch}}$

In Abbildung 4.15 ist der **elektrische Wirkungsgrad** der Anlage gezeigt. Die elektrische Leistung wurde konstant geregelt, so daß dieser Wert in erster Linie vom Heizwert und dem Brennstoffmassenstrom, also der eingebrachten Brennstoffleistung abhängig ist. Der elektrische Wirkungsgrad ist ein Hinweis auf die Schmier-eigenschaften des verwendeten Kraftstoffs im Motor. Die beiden Dieselmotoren zeigen die höchsten Werte, was auf eine niedrige Motorreibung rückschließen läßt. Aufgrund der hohen abgegebenen thermischen Leistung hat TME (42) den niedrigsten elektrischen Wirkungsgrad.

Abbildung 4.15: Elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{elektrisch}}$

Biodiesel (3) erzielt den höchsten **thermischen Wirkungsgrad** (Abbildung 4.16), Synthetik I (31) den niedrigsten.

Abbildung 4.16: Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{thermisch}}$

In Abbildung 4.17 ist die Addition von thermischem und elektrischem Wirkungsgrad (**Gesamtwirkungsgrad**) aufgezeigt. Der Wirkungsgrad bewegt sich generell auf einem hohen Niveau von über 86 %, was auf eine gute Auslegung der Gesamtanlage

schließen läßt. Der niedrigste Wert wird von Euphorbia Lathyrus (9), der höchste von Biodiesel (3) erzielt.

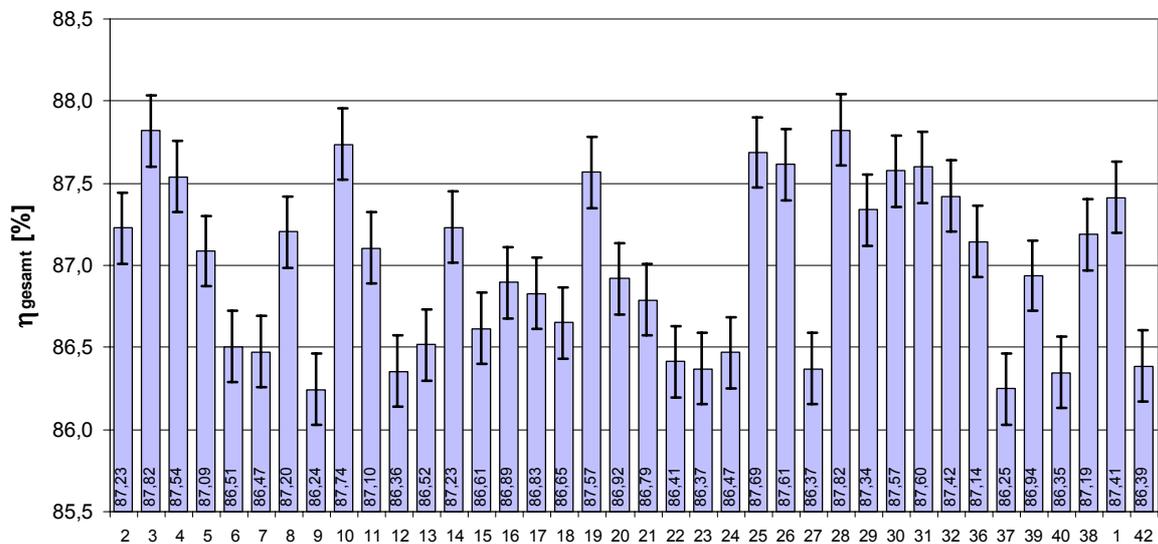


Abbildung 4.17: Gesamtwirkungsgrad η_{gesamt}

In Abbildung 4.18 sind die **prozentualen Abweichungen der Wirkungsgrade** bezogen auf Dieseldraftstoff dargestellt. Alle untersuchten Kraftstoffe liegen in einem relativ engen Bereich. Bei den Pflanzenölen ist zu beobachten, daß sich der Wirkungsgrad geringfügig verschlechtert. Dies dürfte von der erhöhten Pumparbeit der Einspritzpumpe und der erhöhten Reibung im Brennraum herrühren. Auch ein zeitlich veränderter Verbrennungsverlauf kann den Wirkungsgrad beeinflussen.

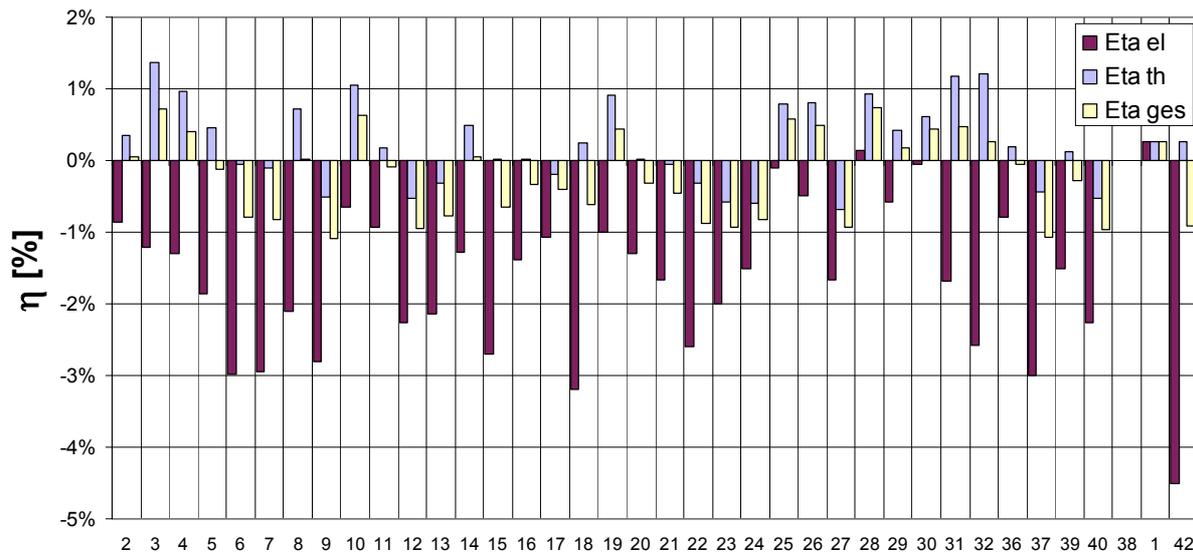


Abbildung 4.18: Prozentuale Abweichungen der Wirkungsgrade bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

4.4.4 Emissionsuntersuchungen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen zusammengestellt.

In Abbildung 4.19 sind die **Stickoxidemissionen** angegeben als Stickstoffdioxid (NO_2) gezeigt. Es ergibt sich folgendes Bild: Die höchsten Emissionen weist Lackleinöl (11) auf, die niedrigsten Emissionen haben die synthetischen Öle (31, 32).

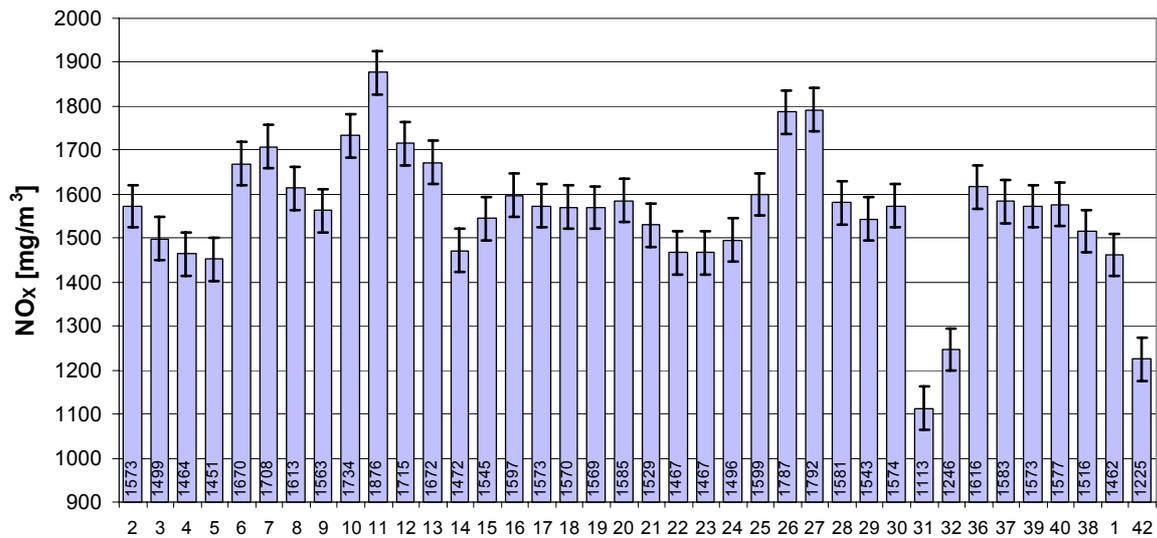


Abbildung 4.19: Stickoxidemissionen umgerechnet nach TA Luft* angegeben als NO₂

Die **Kohlenmonoxidemissionen** bewegen sich generell auf einem niedrigen Niveau (Abbildung 4.20). Die höchsten Emissionen treten bei den Dieselkraftstoffen, die niedrigsten bei den Methylestern auf. Dieser Zusammenhang wird bei dem Vergleich der Kraftstoffgruppen in Kapitel 4.5 noch näher verifiziert.

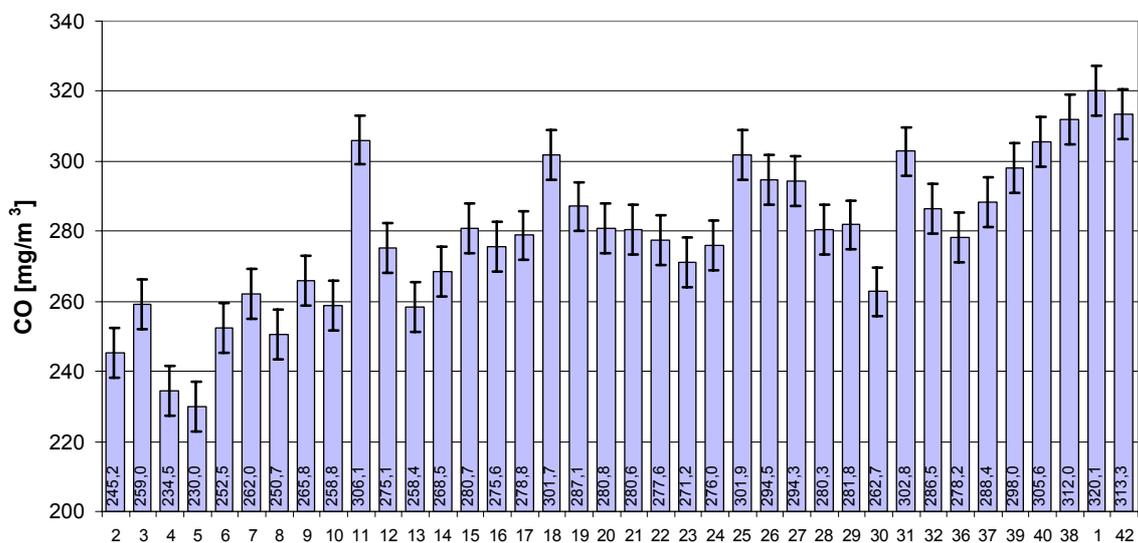


Abbildung 4.20: Kohlenmonoxidemissionen umgerechnet nach TA Luft

* TA Luft /20/: Umrechnung auf trockenes Abgas im Normzustand (0 °C, 1013 mbar) und 5 Vol.-% O₂

Die **prozentualen Abweichungen** der beiden Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff sind in Abbildung 4.21 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, daß die regenerativen Kraftstoffe die CO-Emissionen im Vergleich zu Diesel senken können. Die NO_x-Emissionen steigen bei fast allen Pflanzenölen zum Teil deutlich an. Bei einem Einsatz der synthetischen Öle sowie der Methylester können sowohl die CO- als auch die NO_x-Emissionen gesenkt werden.

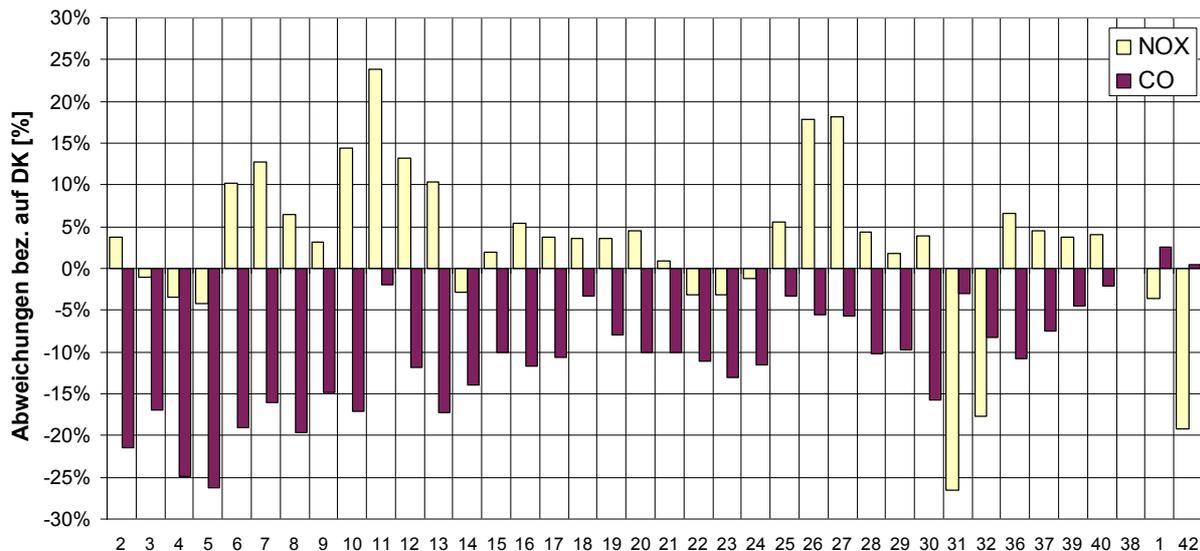


Abbildung 4.21: Prozentuale Abweichungen der CO- und NO_x-Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Die **Kohlendioxidemissionen** in Abbildung 4.22 spiegeln aufgrund der konstant vorgegebenen Last das C/H-Verhältnis und die eingesetzte Brennstoffleistung der Kraftstoffe wider. Je größer das C/H-Verhältnis ist, desto höher ist die CO₂-Emission. Dementsprechend weisen die Dieselkraftstoffe die niedrigsten und die synthetischen Kraftstoffe die höchsten Emissionen auf.

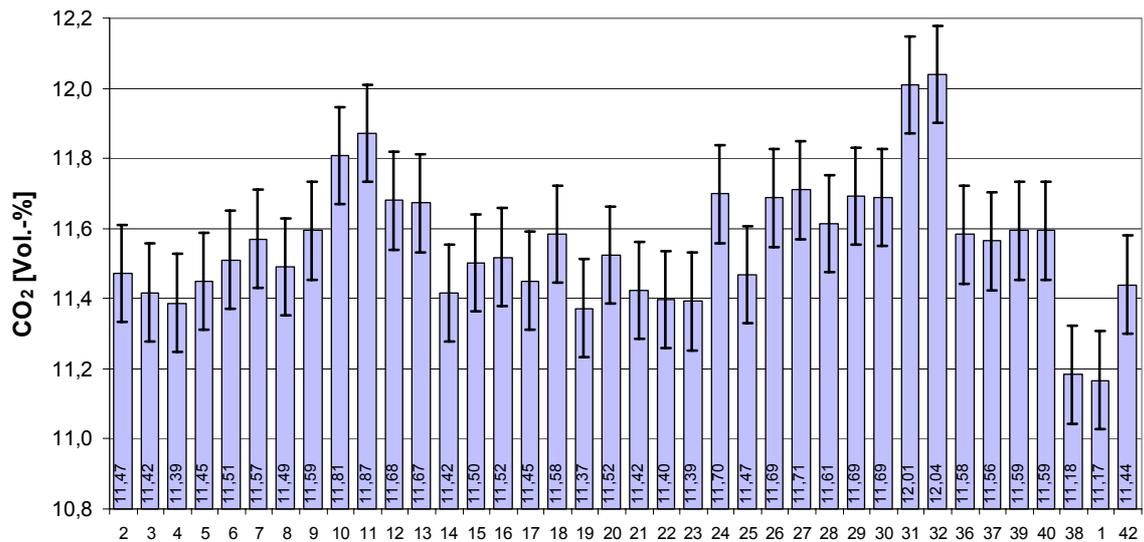


Abbildung 4.22: Kohlendioxidemissionen umgerechnet nach TA Luft

In Abbildung 4.23 sind die **Kohlenwasserstoffemissionen** dargestellt, die im wesentlichen von kurzkettigen und leichtflüchtigen Kraftstoffbestandteilen abhängig sind. Die gemessenen Werte für die Dieselmotorkraftstoffe liegen mit bis zu 96 mg/m^3 verglichen mit den regenerativen Kraftstoffen fast doppelt so hoch. Innerhalb der untersuchten Kraftstoffgruppen zeigen sich nur relativ geringe Abweichungen. Den niedrigsten Wert erreicht Erdnußöl (8) mit einem Wert von $29,3 \text{ mg/m}^3$.

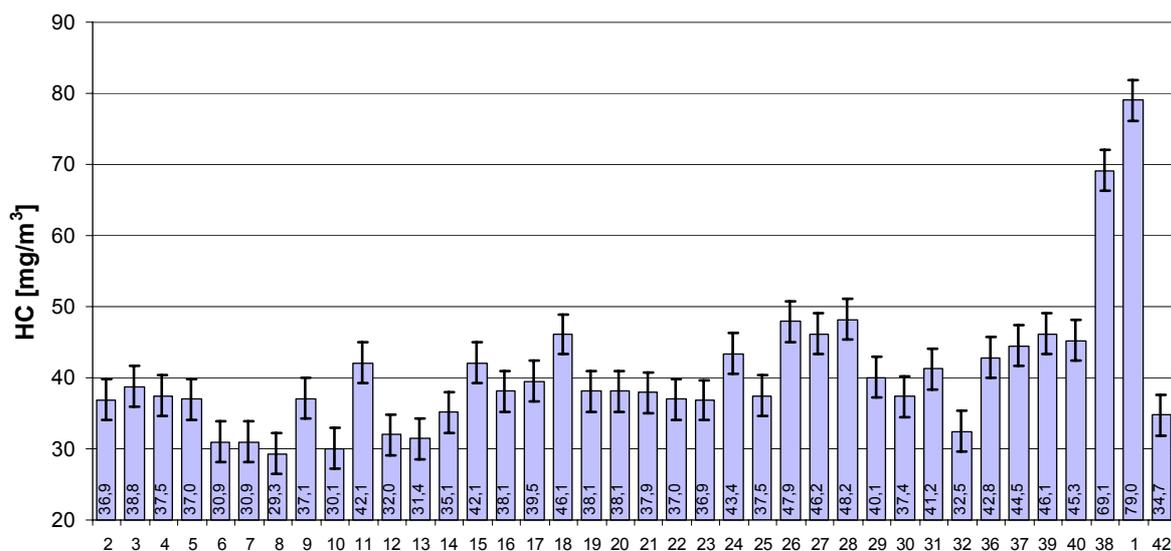


Abbildung 4.23: Kohlenwasserstoffemissionen umgerechnet nach TA Luft

Aus Abbildung 4.24 sind die **prozentualen Abweichungen der CO₂- und HC-Emissionen** bezogen auf Dieselkraftstoff zu entnehmen. Alle regenerativen Kraftstoffe emittieren geringfügig mehr CO₂, aber deutlich weniger HC als Dieselkraftstoff.

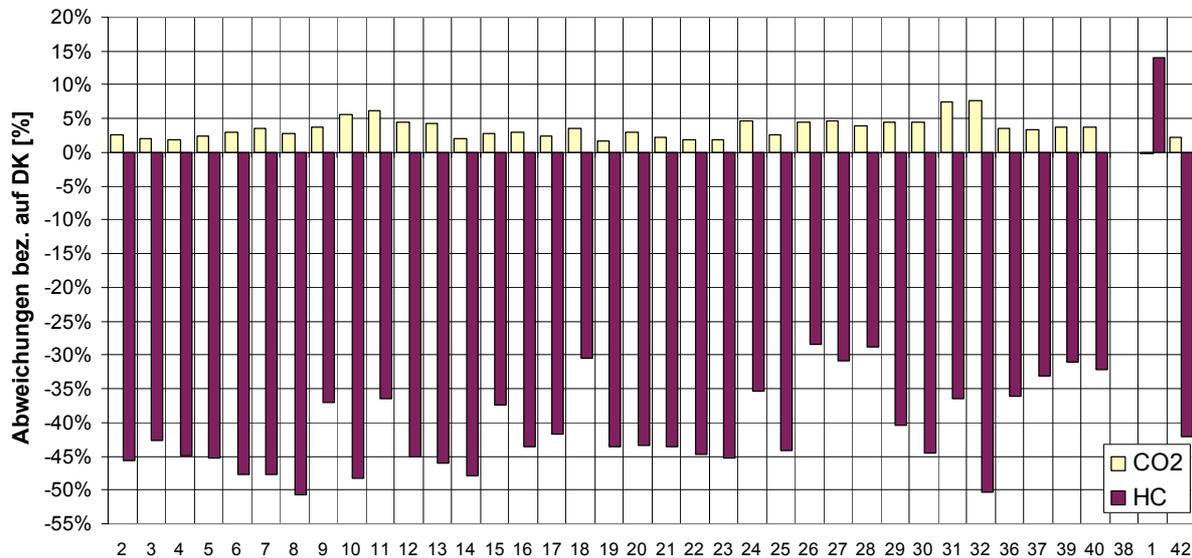


Abbildung 4.24: Prozentuale Abweichungen der CO₂- und HC-Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Mit einem speziell optimierten Gaschromatograph wurden auch die **N₂O-Emissionen** analysiert. Lachgas kann beispielsweise an Dreiwegkatalysatoren in nennenswerten Mengen gebildet werden /36//51//92/. Im Gegensatz dazu lagen die gemessenen Emissionen aller untersuchten Kraftstoffe unter der Nachweisgrenze von 2 ppm.

Mit verantwortlich für den „Sauren Regen“ und andere Umweltschäden sind die von Verbrennungsmotoren emittierten **Schwefeldioxidemissionen**. Die regenerativen Kraftstoffe sind von Natur aus fast schwefelfrei, ein großer Vorteil im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Bei den regenerativen Kraftstoffen zeigt nur der Kraftstoff Pflanzenölmix (15) mit 4,5 mg/m³ geringe Emissionen oberhalb der Fehlertoleranz, was auf eine Verunreinigung mit mineralischen Kraftstoffen schließen läßt.

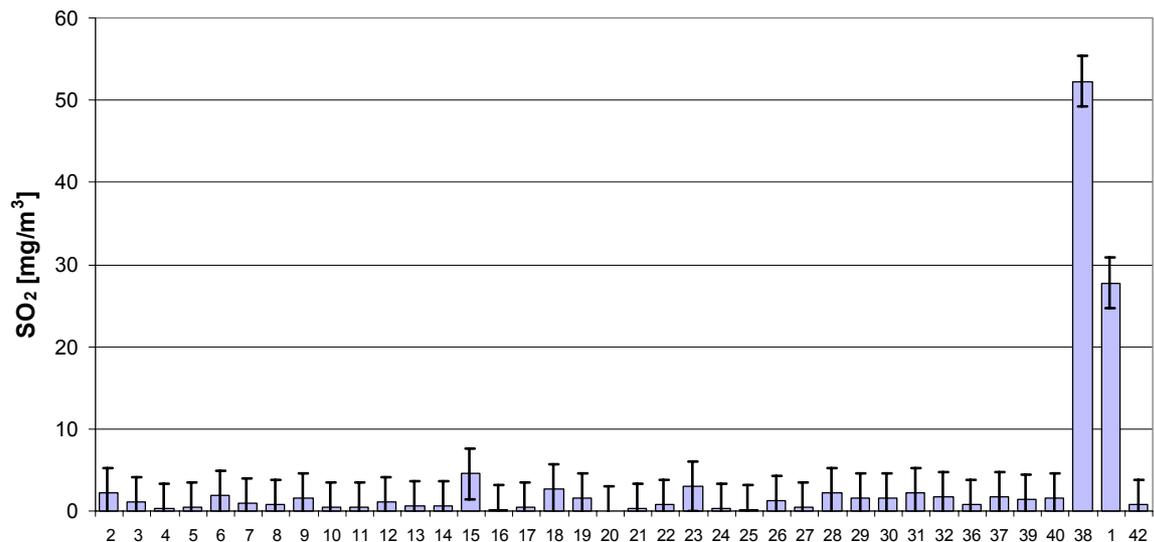


Abbildung 4.25: Schwefeldioxidemissionen umgerechnet nach TA Luft

Der **Sauerstoffgehalt** der Abgase der untersuchten Kraftstoffe ist im wesentlichen von der Menge der angesaugten Verbrennungsluft sowie dem C/H-Verhältnis und dem Sauerstoffgehalt der Kraftstoffe abhängig (Abbildung 4.26). Die gemessenen Werte werden dabei für den Bezug der Emissionen auf den in der TA Luft festgelegten Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-% verwendet /20/.

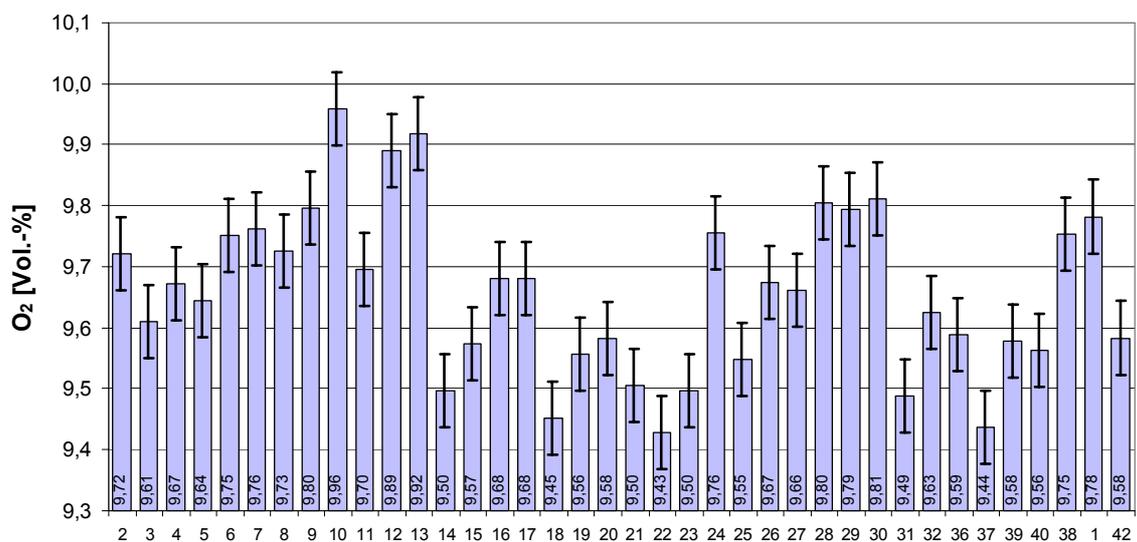


Abbildung 4.26: Sauerstoffgehalt der Abgase (Rohemissionen)

Die in Abbildung 4.27 aufgeführten Werte für die **Partikelemissionen** schwanken deutlich, weshalb sich ein uneinheitliches Bild ergibt. Aus verschiedenen Meßreihen ist bekannt, daß die Partikelkonzentration in erster Linie von der Kraftstoffart abhängig ist. So haben Dieselmotoren generell hohe und Methylester niedrige Emissionswerte /14/. Da das vorliegende BHKW bereits an Pflanzenöl angepaßt worden ist, sind die Emissionen der Methylester in etwa gleich hoch wie die der naturbelassenen Pflanzenöle. Aus diesem Muster fallen jedoch einige Öle heraus. Die höchsten Partikelemissionen haben TME (42) mit 79 mg/m^3 , Euphorbiaöl (9) mit $65,5 \text{ mg/m}^3$ und Safloröl (18) mit $61,5 \text{ mg/m}^3$.

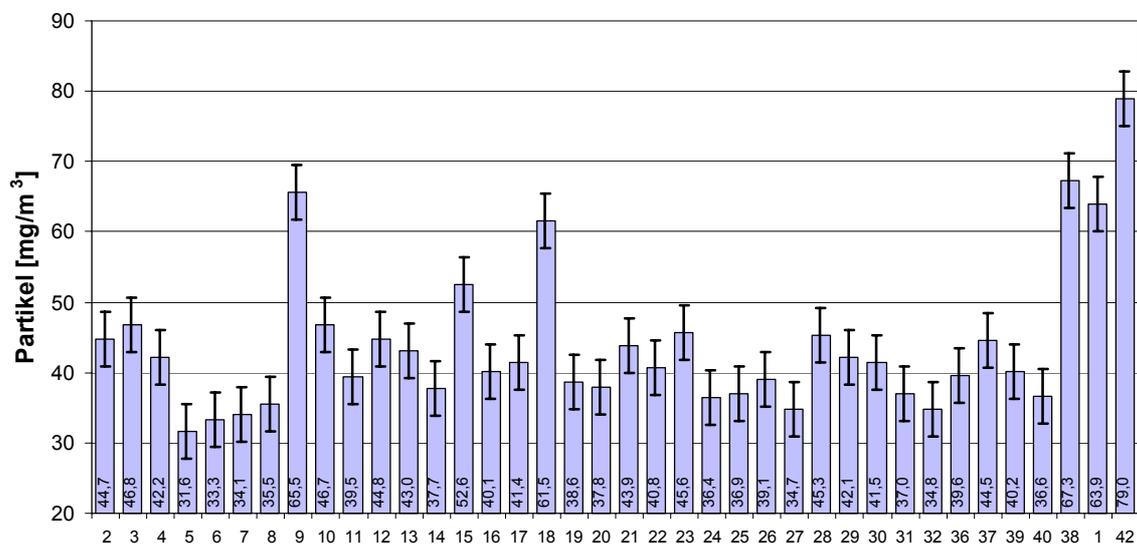


Abbildung 4.27: Partikelemissionen umgerechnet nach TA Luft

In Abbildung 4.28 sind die mit einem Massenspektrometer gemessenen **Acetonemissionen** dargestellt. Aufgrund der relativ großen Schwankungsbreite der Meßwerte sind nur Tendenzen auszumachen. Die Emissionen der Dieselmotoren (38, 1) liegen am höchsten, die für Hanföl (10) am niedrigsten. Es ist zu berücksichtigen, daß die Schwankungsbreite der Meßwerte relativ groß ist, weshalb sich quantitative Aussagen schwierig gestalten.

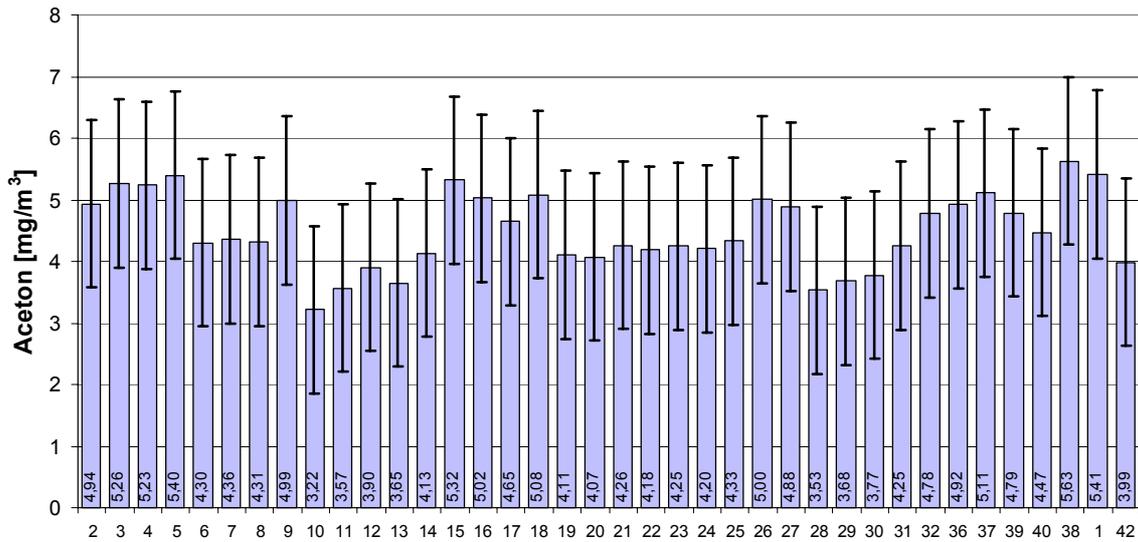


Abbildung 4.28: Acetonemissionen umgerechnet nach TA Luft

Bei der Betrachtung der **prozentualen Abweichungen der Partikel- und Acetonemissionen** bezogen auf Dieselkraftstoff kann man feststellen, daß alle Öle mit Ausnahme von TME (42) weniger Partikel emittieren als Dieselkraftstoff. Die Acetonemissionen bewegen sich auf niedrigem Niveau unterhalb des Meßwertes für Dieselkraftstoff.

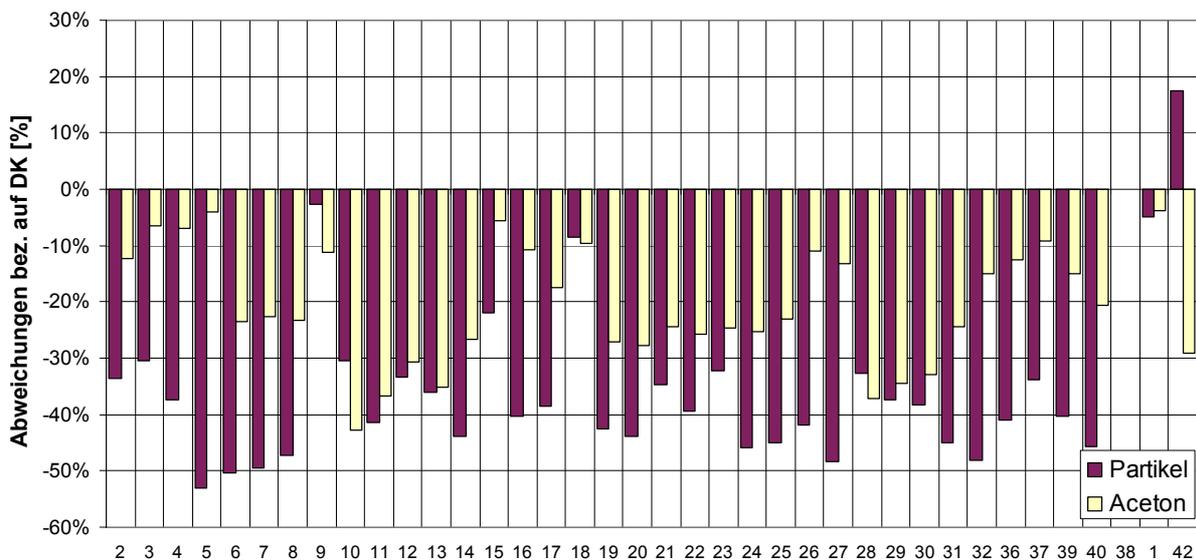


Abbildung 4.29: Prozentuale Abweichungen der Partikel und Aceton-Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Die in Abbildung 4.30 gezeigten **Butyraldehydemissionen** weisen die niedrigsten Werte für die beiden Dieselkraftstoffe (38, 1) und die höchsten für Purgiernußöl (32) auf. Analog zu Aceton verhindern die niedrigen Meßwerte bei gleichzeitig großen Fehlergrenzen eine quantitative Auswertung.

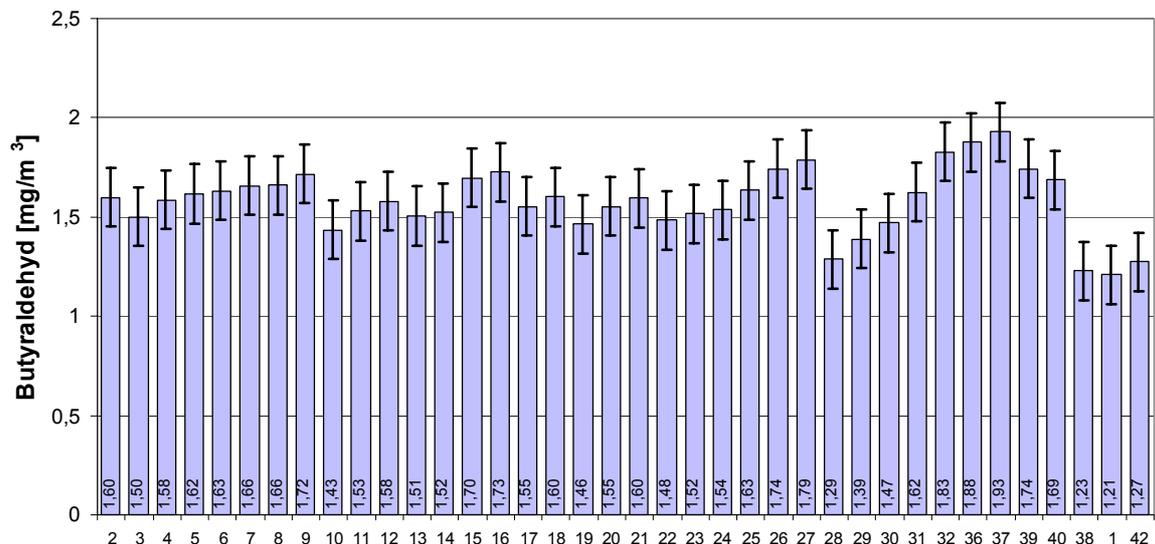


Abbildung 4.30: Butyraldehydemissionen umgerechnet nach TA Luft

Acrolein ist sehr geruchsintensiv und wird vor allem bei der Verbrennung von naturbelassenen Pflanzenölen emittiert. Für die Dieselkraftstoffe (38, 1) liegen die Meßwerte mit $1,3 \text{ mg/m}^3$ am niedrigsten. Die Emissionen aller regenerativen Kraftstoffe sind höher als die für Diesel, die Fehlergrenzen überlappen sich jedoch zum Teil, was eine quantitative Auswertung behindert (Abbildung 4.31).

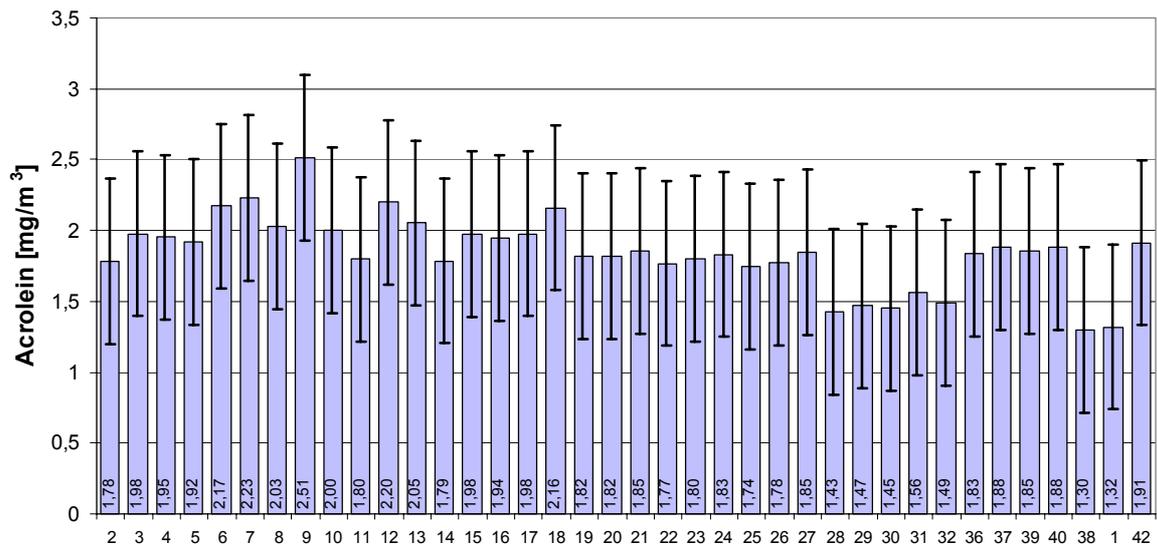


Abbildung 4.31: Acroleinmissionen umgerechnet nach TA Luft

In der Auftragung der **prozentualen Abweichungen der Butyraldehyd- und Acroleinmissionen** bezogen auf Dieselkraftstoff (38) in Abbildung 4.32 zeigt sich, daß von allen regenerativen Kraftstoffen mehr Emissionen ausgestoßen werden, als bei Dieselkraftstoff, wobei der Zusammenhang aufgrund der großen Fehlergrenzen noch weiter verifiziert werden müßte.

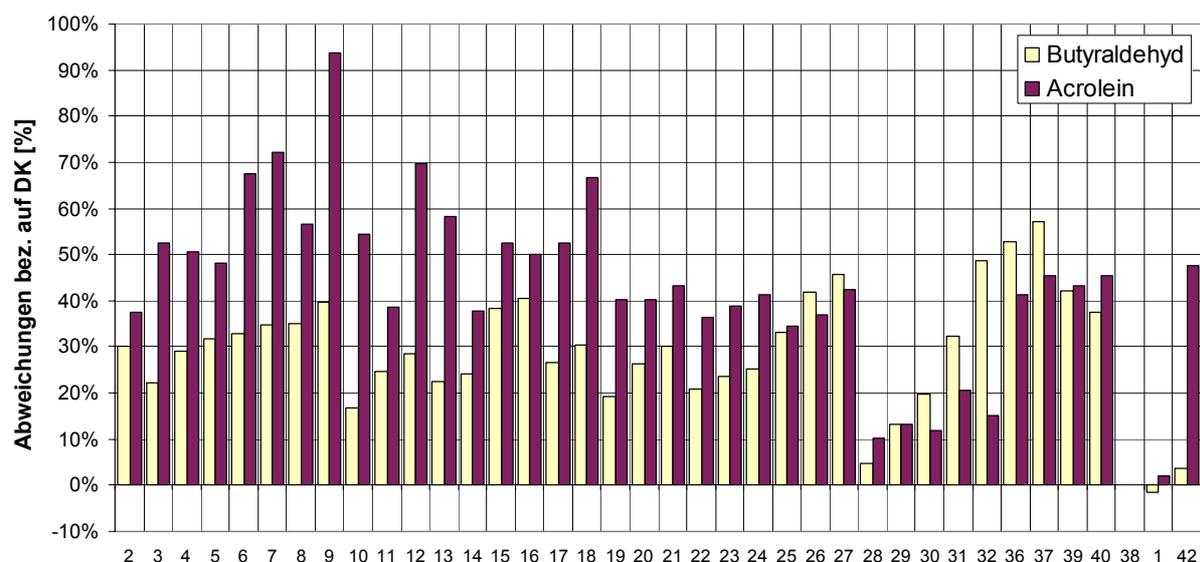


Abbildung 4.32: Prozentuale Abweichungen der Butyraldehyd und Acrolein-Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

In den folgenden Diagrammen (siehe Abbildung 4.33 bis Abbildung 4.37) sind die als kanzerogen eingestuft **PAH-Emissionen** abgebildet. Es zeigt sich bei allen Emissionen, daß die Werte der Dieselkraftstoffe (1, 38) die Werte der regenerativen Kraftstoffe deutlich übersteigen. Die Fehlerindikatoren der Kraftstoffe signalisieren die in Kapitel 4.3.5 ermittelten Fehlergrenzen.

Pyren ist in jeder Abgaszusammensetzung enthalten (Abbildung 4.33). Die höchsten Werte weisen die Dieselkraftstoffe (38, 1) auf. Dabei erkennt man, daß sich alle Ergebnisse nicht signifikant unterscheiden, da die Meßwerte innerhalb der Grenzen der Standardabweichungen der Referenzkraftstoffe liegen. Die Ergebnisse sind somit nur qualitativ zu werten.

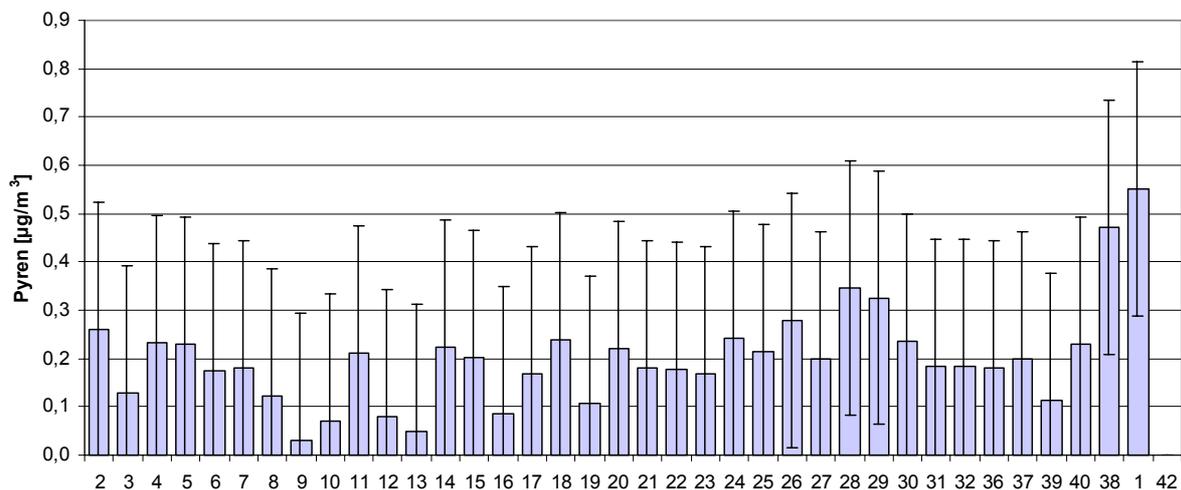


Abbildung 4.33: Pyrenemissionen umgerechnet nach TA Luft

Benz(a)antracen ist nur in sehr geringen Mengen ($< 0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$) im Abgas enthalten und liefert keinen nennenswerten Beitrag zu den gesamten PAH-Emissionen (Abbildung 4.34). Bei einigen Kraftstoffen war Benz(a)antracen nicht mehr nachweisbar (im Diagramm kein Balken enthalten).

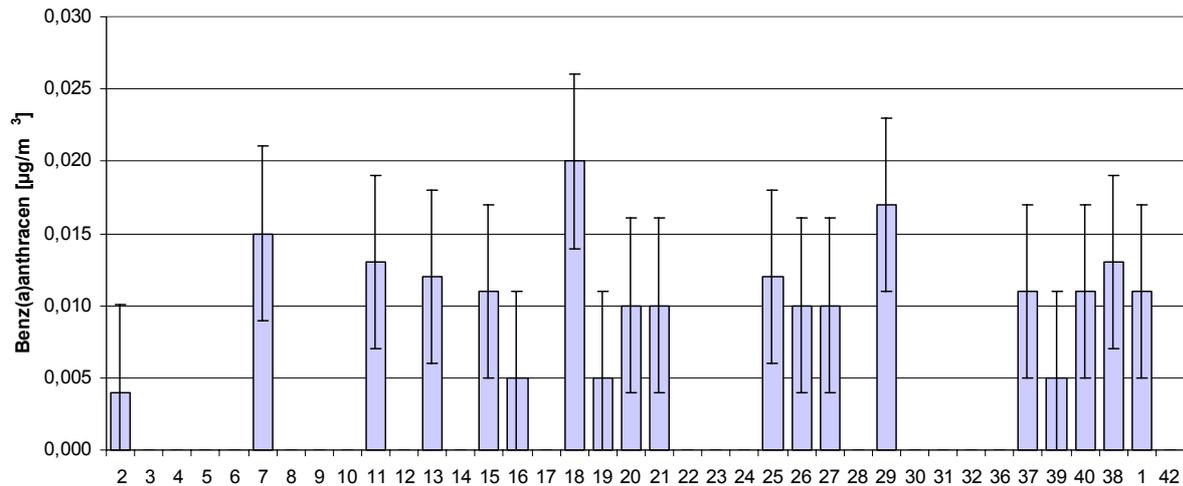


Abbildung 4.34: Benz(a)anthracenemissionen umgerechnet nach TA Luft

Crysen ist zwar in mehreren Kraftstoffen enthalten, aber ebenfalls nur mit sehr geringen Werten ($< 0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die höchsten Emissionen treten bei den Dieselmotorkraftstoffen auf (Abbildung 4.35)

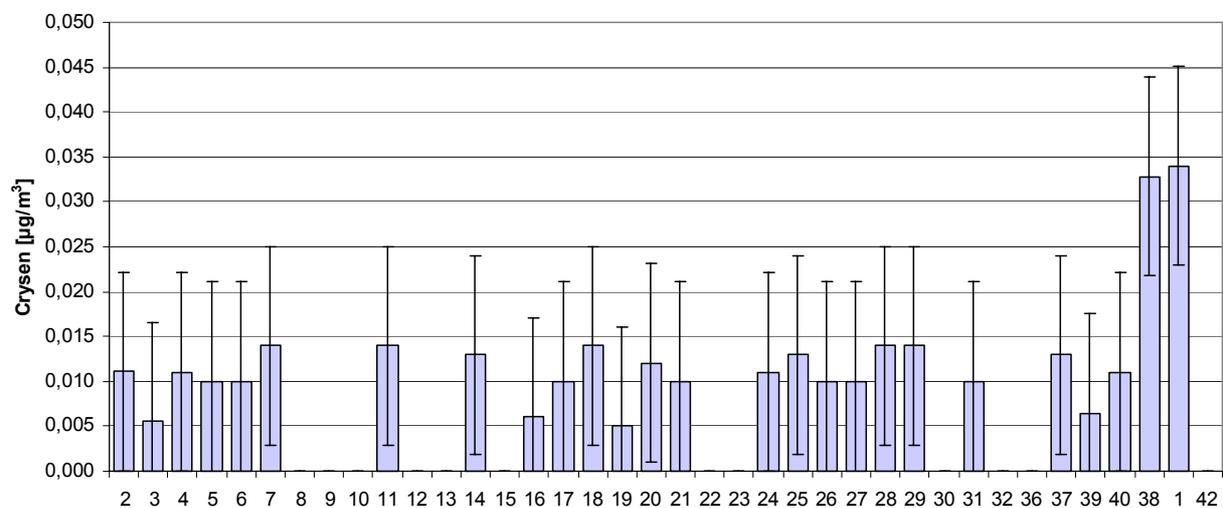


Abbildung 4.36: Crysenemissionen umgerechnet nach TA Luft

Abschließend sind die **Indeno[1,2,3-cd]pyrenemissionen** dargestellt, wobei nur Maiskeimöl (13) nennenswerte Mengen emittiert (Abbildung 4.37).

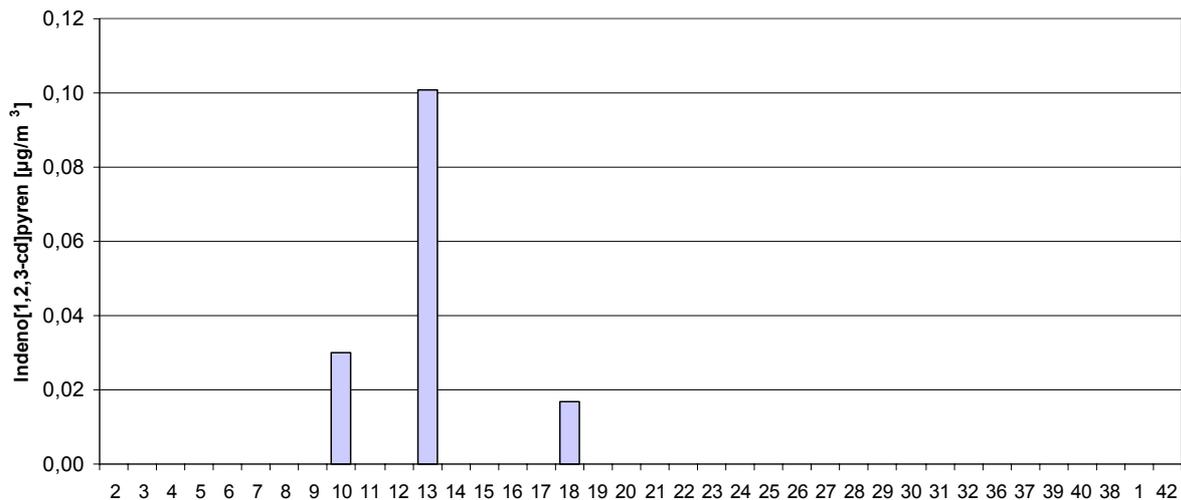


Abbildung 4.37: Indeno[1,2,3-cd]pyrenemissionen umgerechnet nach TA Luft

In der **Summenauswertung der PAH** in Abbildung 4.38 und dem Vergleich der prozentualen Abweichung bezogen auf Dieselkraftstoff (Abbildung 4.39) zeigt sich ein einheitlicheres Bild. Die Dieselkraftstoffe emittieren deutlich mehr PAH als die regenerativen Kraftstoffe. Die Gruppe der Methylester und die Gruppe der synthetischen Kraftstoffe sind dabei nicht deutlich von den naturbelassenen Pflanzenölen zu unterscheiden. Auffällig ist auch, daß der Kraftstoff mit den höchsten Partikelemissionen (TME) die niedrigsten PAH-Emissionen besitzt. Zu beachten sind wiederum die großen maximalen Abweichungen vom Mittelwert der untersuchten Kraftstoffe, dargestellt durch die Fehlerindikatoren. Gründe hierfür sind die niedrigen Konzentrationen der zu analysierenden Stoffe und die aufwendige Analytik. Unter diesem Gesichtspunkt kann nur die qualitative Aussage gemacht werden, daß die regenerativen Kraftstoffe weniger PAH und weniger kanzerogene PAH emittieren als die Dieselkraftstoffe.

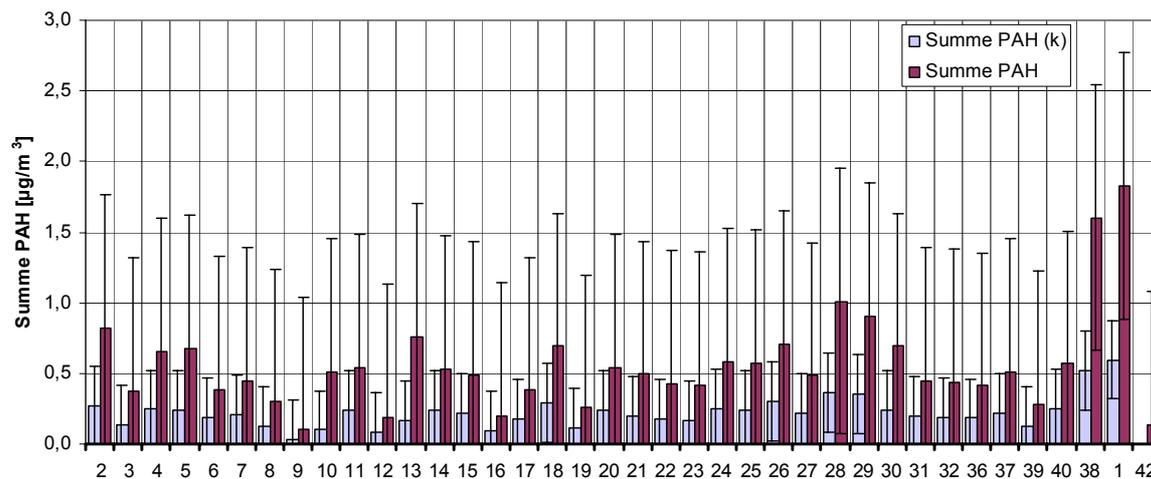


Abbildung 4.38: Summe der PAH-Emissionen (Summe kanzerogen (k) und Summe gesamt) umgerechnet nach TA Luft

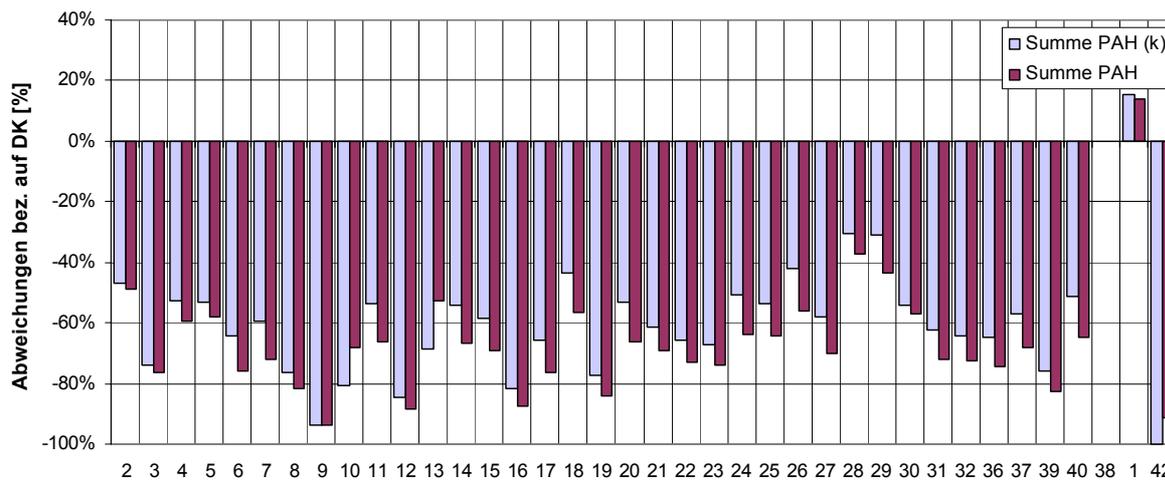


Abbildung 4.39: Prozentuale Abweichungen der PAH-Emissionen (Summe kanzerogen (k) und Summe gesamt) bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

4.5 Vergleich der Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen

Nachfolgend werden die Mittelwerte der Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen miteinander verglichen. Dabei werden die Kraftstoffe in folgende Gruppen eingeteilt:

- Dieselkraftstoffe (*Proben 1 und 38*)
- Methylester (*Proben 2, 3, 4, 5*)
- Synthetische Öle (*Proben 31 und 32*)
- Pflanzenöle (*Proben 5 bis 27 und 36 bis 40*).

Jede Gruppe ist durch die spezifischen Eigenschaften Viskosität, C/H-Verhältnis, Dichte und Heizwert eindeutig charakterisiert, weshalb die oben aufgeführte Einteilung als sinnvoll erscheint. Für die nachfolgende Ergebnisdarstellung wurden alle Werte auf Diesel bezogen, um die Abweichung der regenerativen Kraftstoffe sichtbar zu machen.

In Abbildung 4.40 wird ersichtlich, daß die Gruppe der Methylester insgesamt weniger **NO_x**-, **CO**- und **HC-Emissionen** verursacht als Dieselkraftstoff. Einzig die Pflanzenöle emittieren geringfügig mehr NO_x als Dieselkraftstoff.

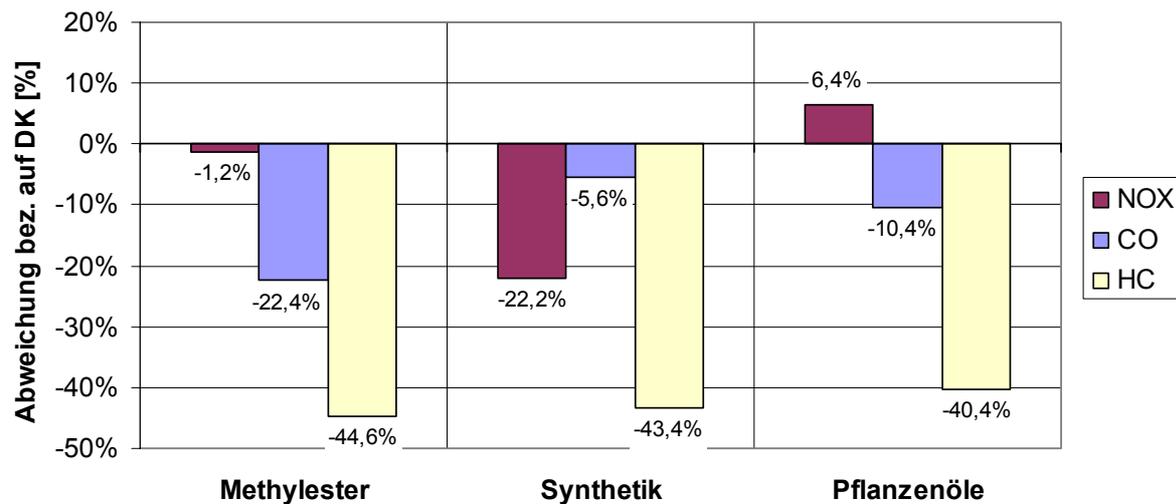


Abbildung 4.40: Prozentuale Abweichungen der NO_x-, CO- und HC-Emissionen (TA Luft) verschiedener Kraftstoffgruppen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Abbildung 4.41 zeigt die prozentuale Abweichung der **Kohlendioxid- und Sauerstoff-Emissionen**. Je größer das C/H-Verhältnis eines Kraftstoffs ist, desto mehr Kohlendioxid wird emittiert und desto weniger Sauerstoff wird verbraucht bei gegebener elektrischer Wirkleistung. ($H_U(C) = 33\,830 \text{ kJ/kg C}$, $H_U(H_2) = 119\,970 \text{ kJ/kg H}_2$)

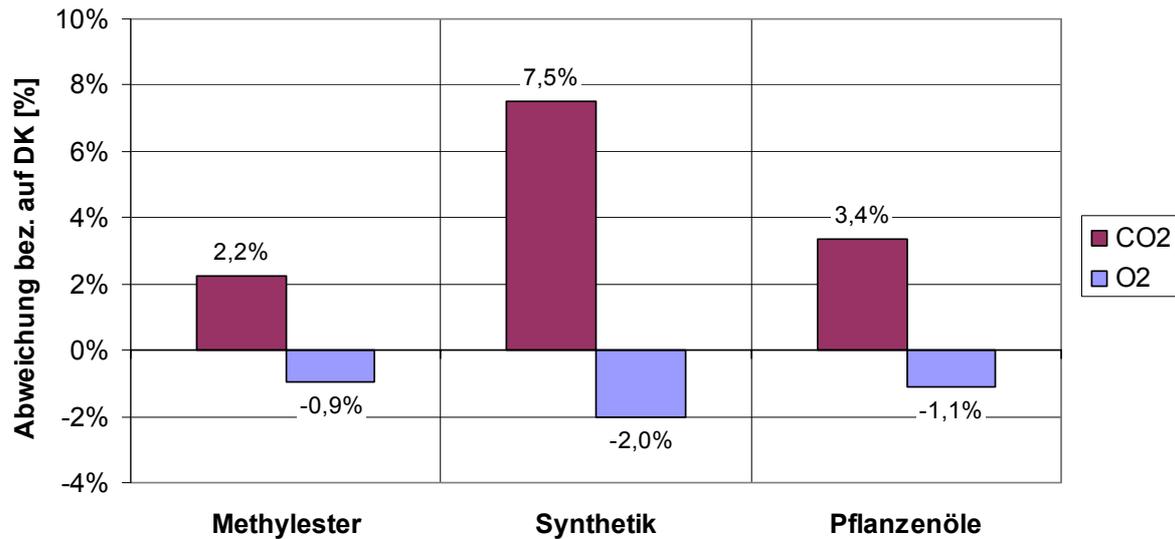


Abbildung 4.41: Prozentuale Abweichungen der CO₂- und O₂-Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Bei den **Aceton-, Butyraldehyd- und Acrolein**emissionen ergibt sich, daß alle regenerativen Kraftstoffe weniger Aceton, aber mehr Butyraldehyd und Acrolein emittieren als Dieselkraftstoff.

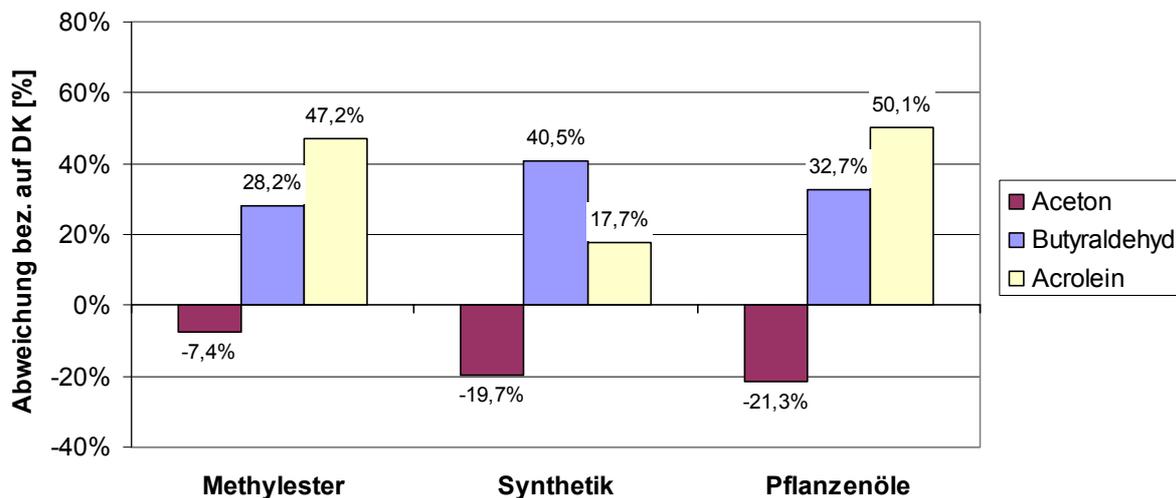


Abbildung 4.42: Prozentuale Abweichungen der Aceton-, Butyraldehyd und Acrolein-Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

Bei den in Abbildung 4.43 aufgeführten prozentualen Abweichungen der Partikel- und PAH-Emissionen bezogen auf Dieselkraftstoff zeigt sich ein einheitliches Bild. Sowohl die Mittelwerte der Partikelemissionen als auch die kanzerogenen und nicht kanzerogenen Emissionen sind im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff deutlich reduziert.

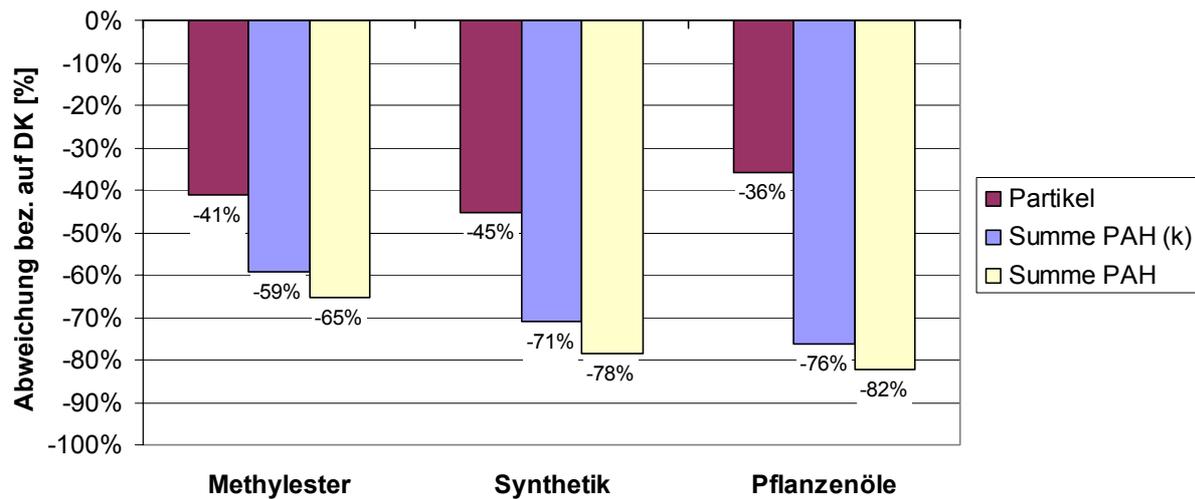


Abbildung 4.43: Prozentuale Abweichungen der Partikel und PAH-Emissionen verschiedener Kraftstoffgruppen (Summe kanzerogen (k) und Summe gesamt) bezogen auf Dieselkraftstoff (38)

4.6 Beimischungen zu AME

Die Ergebnisse der Beimischung von allein nicht zur Verbrennung tauglichen Substanzen (Orangenketon, Rizinusöl und Styropor) sind nachfolgend ersichtlich. Angedacht war ein mögliches Recycling dieser Substanzen.

In Abbildung 4.43 sind die prozentualen Änderungen der **elektrischen Leistung**, sowie der **Wirkungsgrade** umgerechnet nach AME (2) dargestellt. Die Wirkungsgrade variieren nur sehr gering, wobei die Mischung aus AME und Orangenketon (28) den höchsten Wirkungsgrad erreicht.

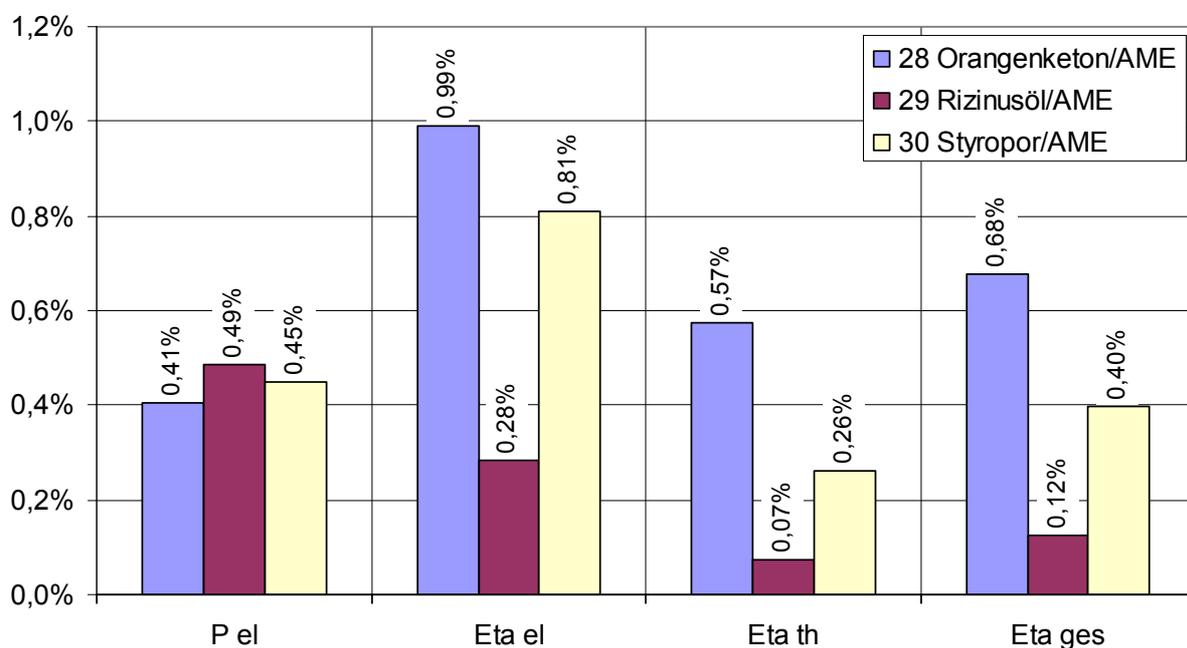


Abbildung 4.44: Prozentuale Abweichungen der elektrischen Last und der Wirkungsgrade verschiedener Kraftstoffmischungen umgerechnet nach AME (2)

In Abbildung 4.45 sind die **Emissionen** der Kraftstoffe abgebildet. Deutliche Unterschiede ergeben sich vor allem bei den HC-Emissionen. Das Gemisch aus Orangenketon und AME weicht mit 23,6 % am stärksten von reinem AME ab. Die Mischung von AME und Rizinusöl weist geringfügig niedrigere NO_x-Emissionen als AME auf. Die CO-Emissionen steigen bei allen Mischungen deutlich an, was auf eine schlechte Verbrennung schließen läßt.

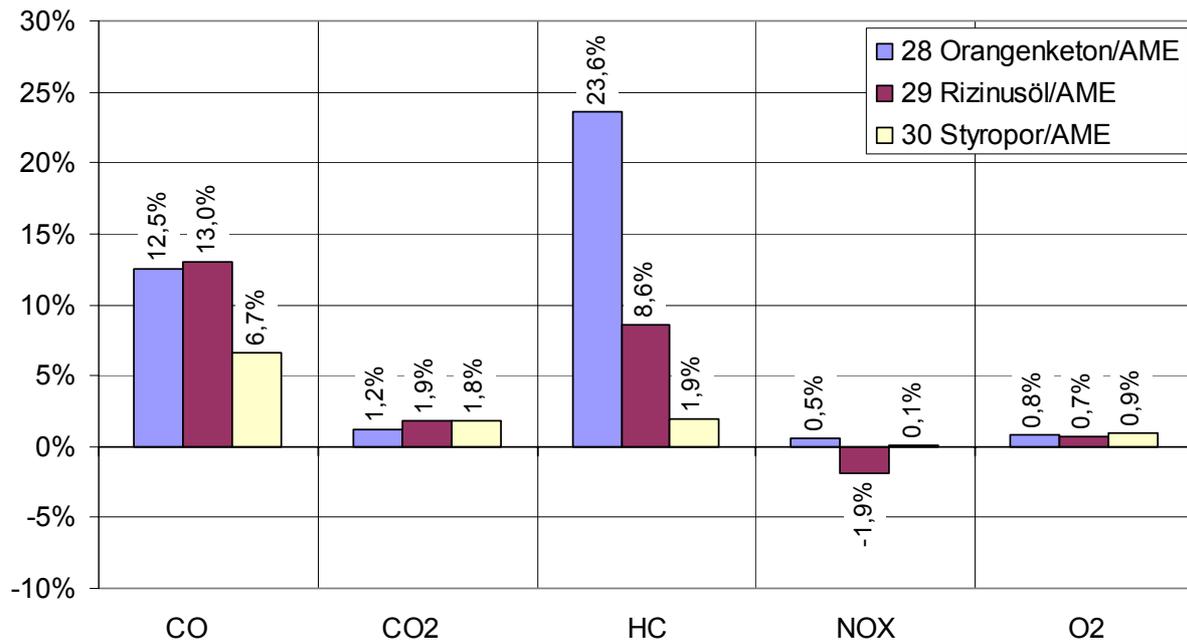


Abbildung 4.45: Prozentuale Abweichungen der CO-, CO₂-, HC-, NO_x- und O₂-Emissionen verschiedener Kraftstoffmischungen umgerechnet nach AME (2)

Die **Partikel-, Aceton-, Butyraldehyd- und Acrolein-Emissionen** der Kraftstoffmischungen sind niedriger als der AME Vergleichswert (Abbildung 4.46). Besondere Beachtung verdient das Styropor/AME Gemisch (30). Die Partikelemissionen reduzieren sich im Vergleich zu reinem AME (2) um 21 %. Die **PAH-Emissionen** steigen bei einer Mischung von AME und Orangenketon (28) leicht an und sinken bei der Polystyrol/AME Mischung um bis zu 84 % ab. Das beigemischte Styropor trägt also nicht in vermehrtem Maß zur PAH-Bildung bei. Allerdings unterliegen die genannten Emissionen großen Abweichungen (vgl. Kapitel 4.3).

Abschließend kann festgestellt werden, daß eine Beimischung von zur Verbrennung allein ungeeigneten Substanzen (Orangenketon, Rizinusöl, Styropor) das Emissionsverhalten des Verbrennungsmotors verschlechtern. Dies zeigt sich durch die erhöhten CO- und HC-Emissionen. Die NO_x-Emissionen bleiben annähernd konstant. Die Reduktion der Partikel- und PAH-Emissionen des Styropor/AME-Gemischs (30) im Vergleich zu reinem AME (2) sollte in einer eigenen Meßreihe mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen weiter verifiziert werden.

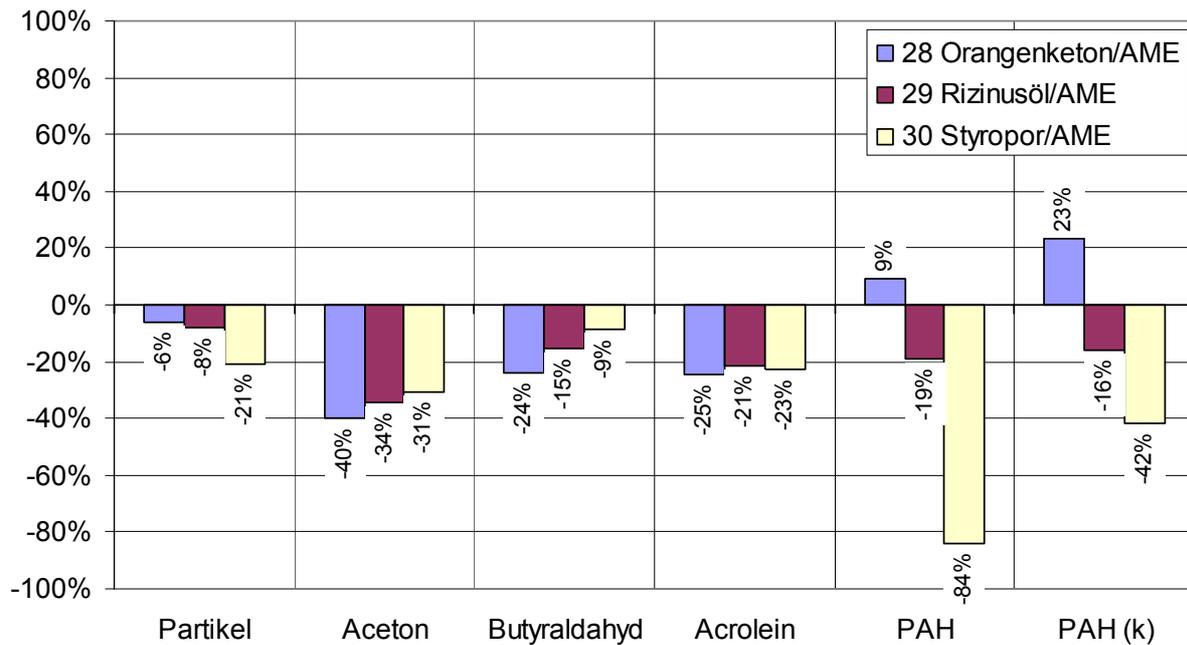


Abbildung 4.46: Prozentuale Abweichungen der Partikel-, Aceton-, Butyraldehyd-, Acrolein-, PAH- und kanzerogenen PAH-Emissionen verschiedener Kraftstoffmischungen umgerechnet nach AME (2)

4.7 Einsatz eines Oxidationskatalysators an einem BHKW der Vereinigten Werkstätten Pflanzenöltechnologie (VWP)

Das BHKW der VWP (Abbildung 4.47) besteht aus einem Lombardini 3-Zylinder-Vorkammermotor mit 0,9 l Hubraum bei einer Nenndrehzahl von 1800 U/min. Die maximale elektrische Leistung beträgt 5 kW. Im Unterschied zum ersten Versuchsträger kann dieses Blockheizkraftwerk (BHKW) direkt mit Rapsöl gestartet werden. Abbildung 4.47 zeigt das BHKW ohne und mit Schallschutzhaube..

Ursprünglich war geplant, die erzielten Ergebnisse des Panda BHKW am VWP-BHKW zu verifizieren. Im Verlauf der Untersuchung erwiesen sich die Messungen am VWP-BHKW jedoch nur zum Teil als auswertbar. Das VWP-BHKW arbeitete netzparallel, dadurch konnten Spannungsschwankungen die Leistungsregelung beeinflussen. Diese Schwankungen vergrößerten die Fehlerbereiche der Messungen derart, daß diese nicht als Vergleichsmessungen auswertbar waren.



Abbildung 4.47: BHKW der Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie

Die unterschiedlichen Emissions-Reduktionsraten eines Oxidationskatalysators in Abhängigkeit vom eingesetzten Kraftstoff zeigt Tabelle 4.7. Interessant ist eine leichte Reduktion der Stickoxide (NO_x) die normalerweise durch einen Oxidationskatalysator nicht beeinflusst werden. Die geringe Reduktion von NO_x läßt sich durch einen höheren Abgasgegendruck im Oxidationskatalysator erklären. Kohlenmonoxid (CO) läßt sich fast vollständig zu CO_2 oxidieren, wohingegen die Gesamtkohlenwasserstoffe (HC) zwischen 53 und 62% vermindert werden. Durch eine Vergrößerung der Katalysatorlänge könnte diese Reduktionsrate sicher vergrößert werden, aber bauliche Erfordernisse standen in diesem Anwendungsfall dagegen.

Tabelle 4.7: Reduktionsraten bei Einsatz eines Oxidationskatalysators

	NO_x	CO	HC
AME (2)	30%	99%	53%
Rapsöl (22)	30%	98%	69%
Diesekraftstoff (38)	26%	99%	62%

5 Diskussion der Versuchsergebnisse

5.1 Versuchsauswertung

Um den Einfluß einzelner Kraftstoffeigenschaften auf das Emissionsverhalten des untersuchten Verbrennungsmotors beurteilen zu können, werden nachfolgend die in Kapitel 4.4 gewonnenen Versuchsergebnisse statistisch ausgewertet. Dazu werden der Pearsonsche Korrelationskoeffizient und das Bestimmtheitsmaß zur qualitativen Beurteilung verwendet. Entscheidend dabei ist, daß nicht beliebige Kraftstoffe untereinander verglichen werden können, da sich sonst viele verschiedene Kraftstoffeigenschaften überlagern. Aus diesem Grund sind mehrere Kraftstoffe jeweils in einer Gruppe zusammengefaßt und werden innerhalb dieser verglichen. Es wurden fünf Einzelgruppen ausgewählt, die aufgrund ihrer Eigenschaften eindeutig unterscheidbar sind:

- Methylester (ME) (*Proben 2, 3, 4, 5*)
- Sonnenblumenöle (*Proben 21, 22, 23, 24, 25, 39, 40*)
- Pflanzenöle (*Proben 6 bis 27 und 36 bis 40*)
- Alle Kraftstoffe (*Proben 1 bis 42*)
- Kraftstoffgruppen (Methylester (*Proben 2, 3, 4, 5*), Pflanzenöle (*Proben 6 bis 27 und 36 bis 40*), synthetische Kraftstoffe (*Proben 31, 32*), Diesel (*Proben 1, 38*)).

Das Ziel des Vergleichs ist, bekannte Erkenntnisse zu verifizieren und dabei neue Erkenntnisse über einzelne Einflußgrößen auf Abgasemissionen zu erhalten. In den Diagrammen sind die in den Kapitel 4.1 bis 4.3 ermittelten Reproduzierbarkeiten als Fehlerindikatoren abgebildet. Zudem ist in jedem Diagramm die Gleichung der Trendlinie und das Bestimmtheitsmaß der Berechnung angegeben.

5.2 Einflußgrößen auf Emissionen

5.2.1 Zahlenwerte der Korrelationskoeffizienten

Die in den Diagrammen angegebenen Zahlenwerte für den Pearsonschen Korrelationskoeffizienten werden im Anschluß diskutiert.

5.2.2 Einfluß auf Stickoxidemissionen

Die Stickoxidemissionen zeigen eine deutliche kraftstoffabhängige Variation. In der Literatur werden bei der dieselmotorischen Verbrennung verschiedene Gründe angegeben. Nach Warnatz /108/ ist ein entscheidender Einfluß auf die Entstehung von thermischen NO die Verbrennungstemperatur der Kraftstofftröpfchen im Brennraum. Promptes NO wird über die Anwesenheit von CH-Radikalen gebildet, und Brennstoff-NO entsteht bei einer Verbrennung des Kraftstoffe aus darin gebundenem Stickstoff. In der vorliegenden Untersuchung ist es nicht möglich, die beiden Prozesse zu trennen, da die Verbrennungstemperatur im Brennraum nicht gemessen werden konnte. Ebenso liegen keine Kenntnisse über den Stickstoffgehalt der Kraftstoffe vor.

In Abbildung 5.1 ist die Bildung von thermischem NO in Abhängigkeit der **Abgastemperatur vor dem Wärmetauscher** am Beispiel der Sonnenblumenöle abgebildet. Es ist zwar ein positiver Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 50 % erkennbar, jedoch unterscheiden sich die Temperaturen nicht signifikant. Die gemessenen Werte der NO_x-Emissionen liegen ebenfalls nahe beieinander. Um genauere Aussagen über die Bildung von thermischem NO machen zu können, wäre es notwendig, die Temperatur im Brennraum während der Verbrennung zu bestimmen, da die Überlagerung durch andere Faktoren zu groß ist.

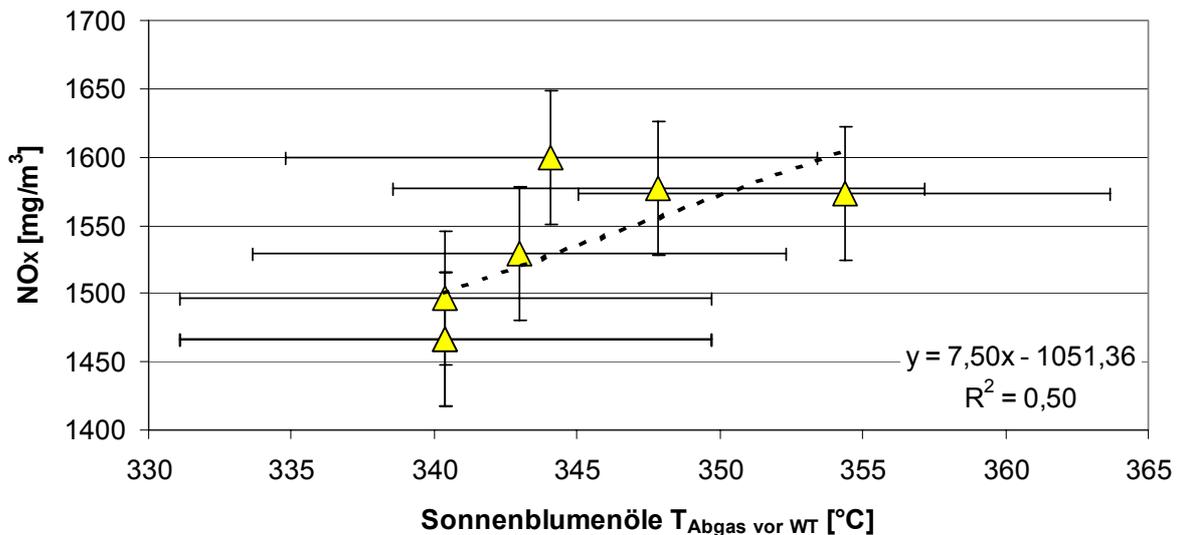


Abbildung 5.1: Einfluß des Abgastemperatur vor Wärmetauscher auf die NO_x -Emission bei Sonnenblumenölen

Vergleicht man den Fettsäuregehalt mit der NO_x -Bildung, so lassen sich einige signifikante Zusammenhänge ableiten. In Abbildung 5.2 ist der Einfluß des **Linolsäuregehalts** bei der Gruppe der Methyl ester auf die Stickoxidemissionen dargestellt. Es kann dabei ein Anstieg der Emissionen bei einem Anstieg des Linolsäuregehalts festgestellt werden. Gründe hierfür liegen in der Struktur der doppelt ungesättigten Linolsäure, deren Bindungen leichter in kurzkettige HC-Bestandteile aufbrechen. Dadurch wird die Bildung von promptem NO begünstigt, das maßgeblich von der gebildeten Menge an HC-Radikalen abhängt /108/.

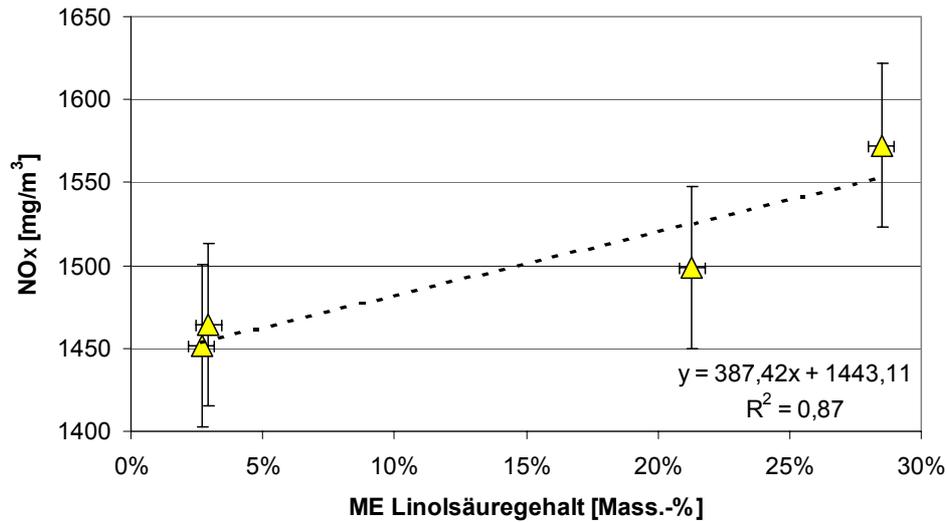


Abbildung 5.2: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die NO_x -Emission bei Methylestern

Der Einfluß kann in Abbildung 5.3 bei der Gruppe der Sonnenblumenöle noch weiter verifiziert werden. Das Bestimmtheitsmaß für einen linearen Zusammenhang liegt dabei bei 93 %.

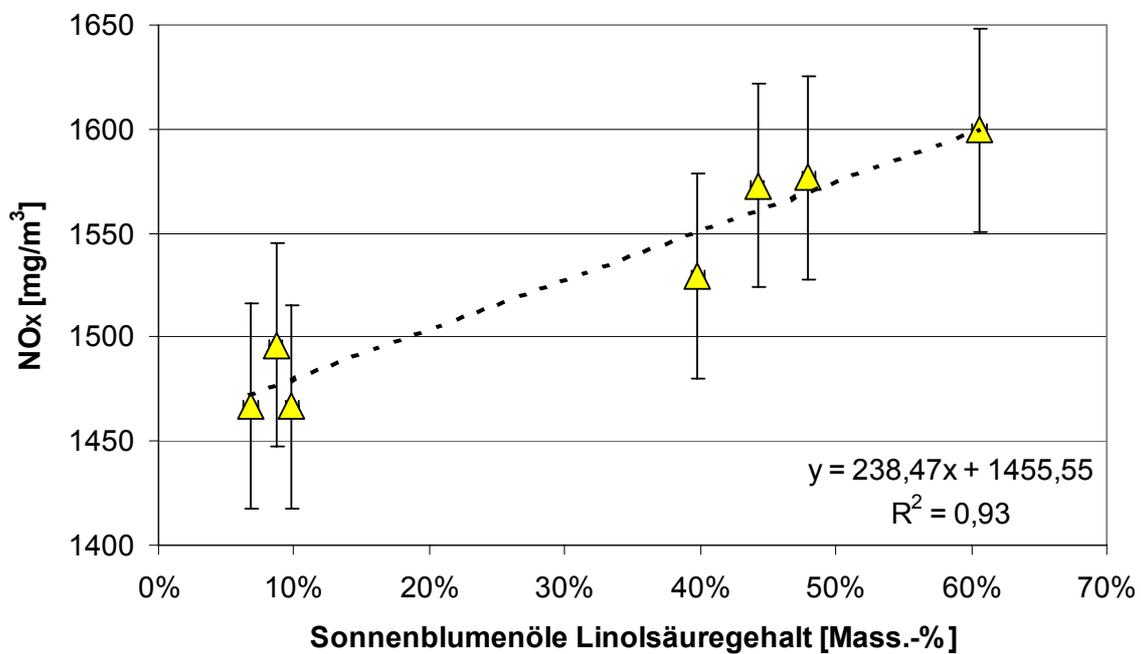


Abbildung 5.3: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die NO_x -Emission bei Sonnenblumenölen

Vergleicht man den Einfluß des Linolsäuregehalts bei der Gruppe der Pflanzenöle auf die Stickoxidemissionen, so setzt sich der Trend zu einer steigenden Emission bei einem steigenden Linolsäuregehalt weiter fort. Dabei ist zu beachten, daß die Stickoxidemissionen bei allen Pflanzenölen von vielen weiteren Faktoren überlagert sind, wie zum Beispiel dem Linolensäuregehalt (Lackleinöl weist die höchste NO_x -Emission auf). Das Bestimmtheitsmaß liegt deshalb nur bei 25 %. Betrachtet man das Bestimmtheitsmaß ohne Berücksichtigung von Lackleinöl, so liegt der Wert bei ca. 50 %.

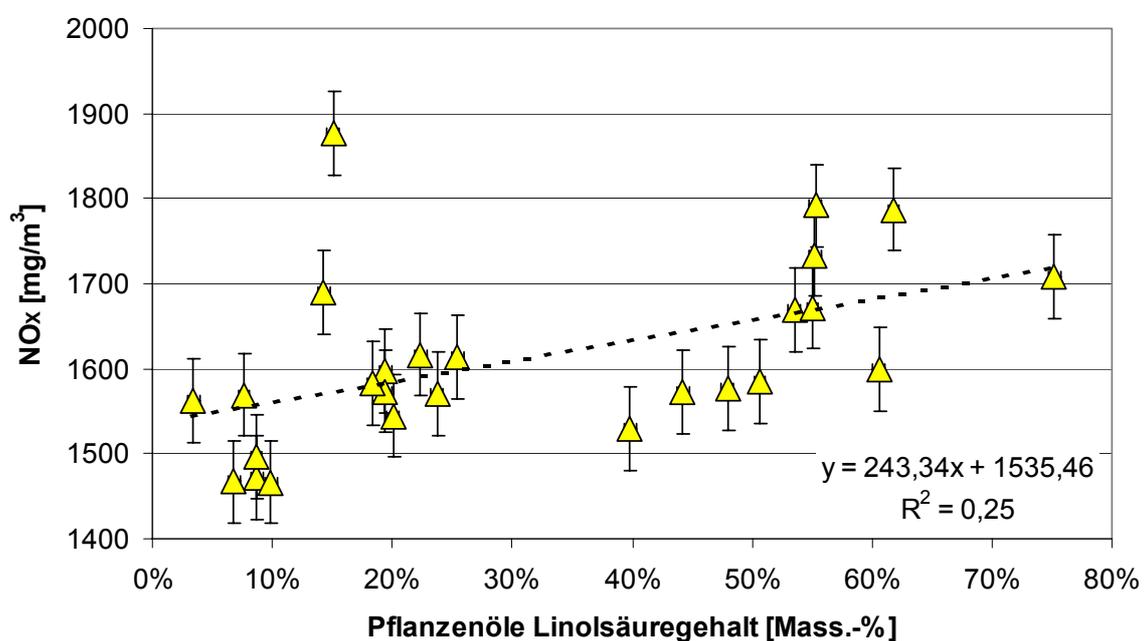


Abbildung 5.4: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die NO_x -Emission bei Pflanzenölen

Abbildung 5.5 zeigt die Korrelation von NO_x -Emission und Linolsäuregehalt aller Öle. Die Emissionen sind dabei von dem Einfluß des Zusammenhangs von NO_x -Emission und Linolensäuregehalt überlagert, zeigen aber immer noch ein Bestimmtheitsmaß von 38 %.

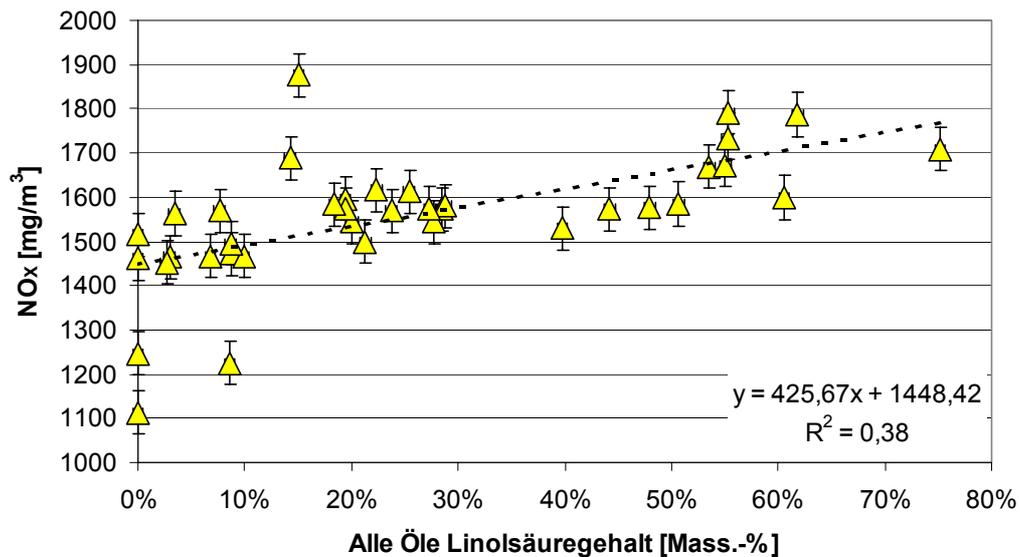


Abbildung 5.5: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die NO_x-Emission bei allen Ölen

Ein weiterer Einfluß einer Fettsäure auf die NO_x-Emissionen ist der Gehalt an **Linolensäure**, wie am Beispiel aller Pflanzenöle sichtbar wird (Abbildung 5.6). Auch hier ist ein Steigen der NO_x-Emissionen bei einer Zunahme des Linolensäuregehalts festzustellen. Der Zusammenhang ist dabei wieder von anderen Größen überlagert, weshalb das Bestimmtheitsmaß nur 55 % beträgt.

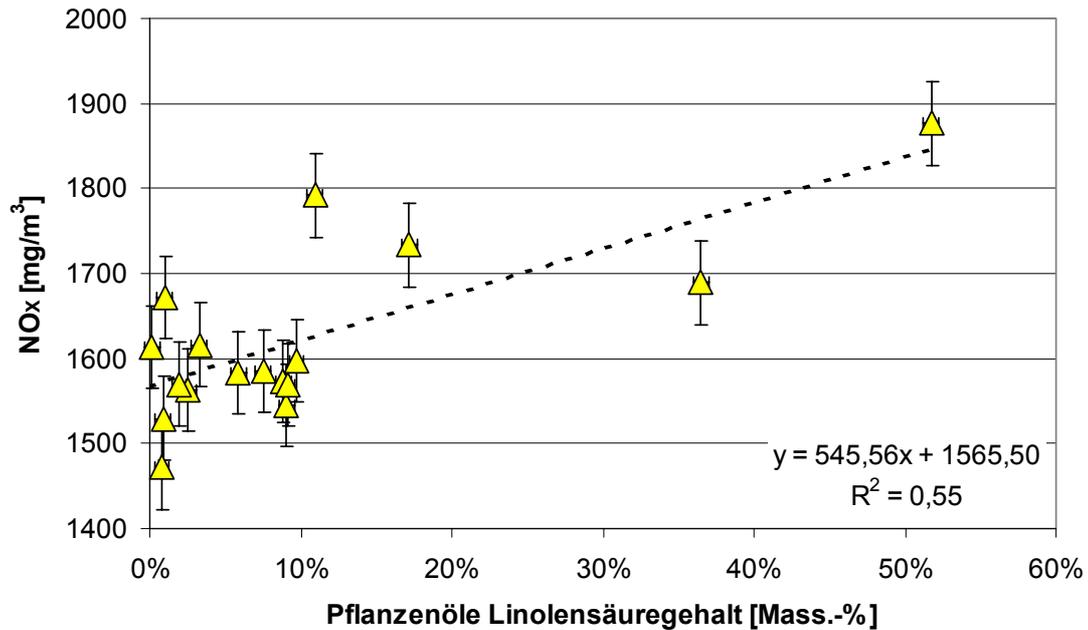


Abbildung 5.6: Einfluß des Linolensäuregehalts auf die NO_x-Emission bei Pflanzenölen

Im Gegensatz dazu emittieren Öle mit einem hohen Gehalt an **Ölsäure** weniger Stickoxide, wie am Beispiel der Methylester in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Ölsäure weist zwar ebenfalls eine Doppelbindung auf, doch ein Ansteigen des Ölsäuregehalts ist mit einer Verringerung der Anteile an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Linol- und Linolensäure) verbunden, weshalb die NO_x-Emissionen insgesamt sinken.

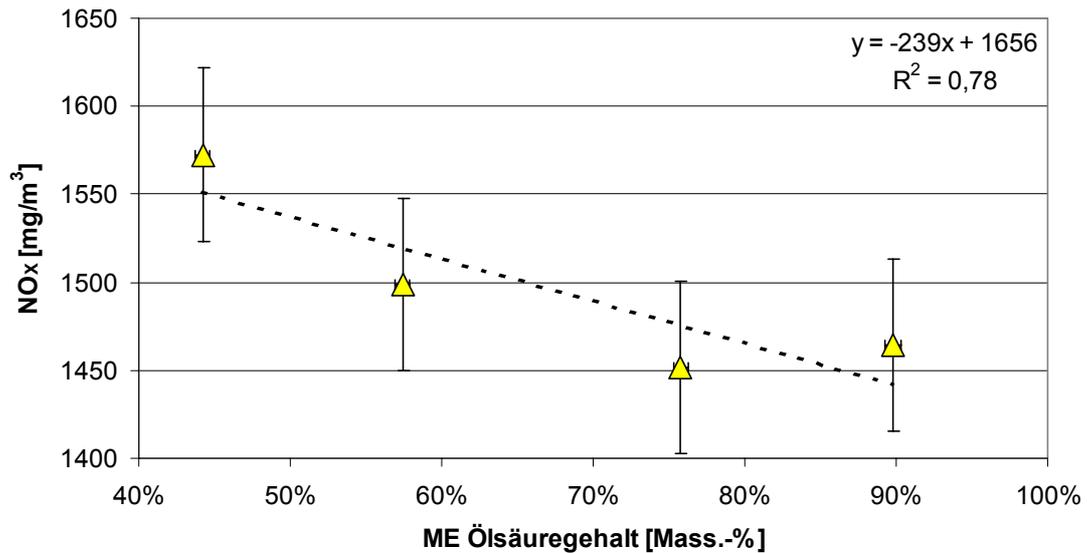


Abbildung 5.7: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die NO_x-Emission bei Methylestern

Das Bestimmtheitsmaß für einen linearen Zusammenhang beträgt dabei 78 % bei jedoch relativ großen Fehlerschranken. Eine weitere Verifizierung der Korrelation von Stickoxidemission und Ölsäuregehalt wird am Beispiel der Sonnenblumenöle deutlich (Abbildung 5.8) mit einer Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes auf 89 %.

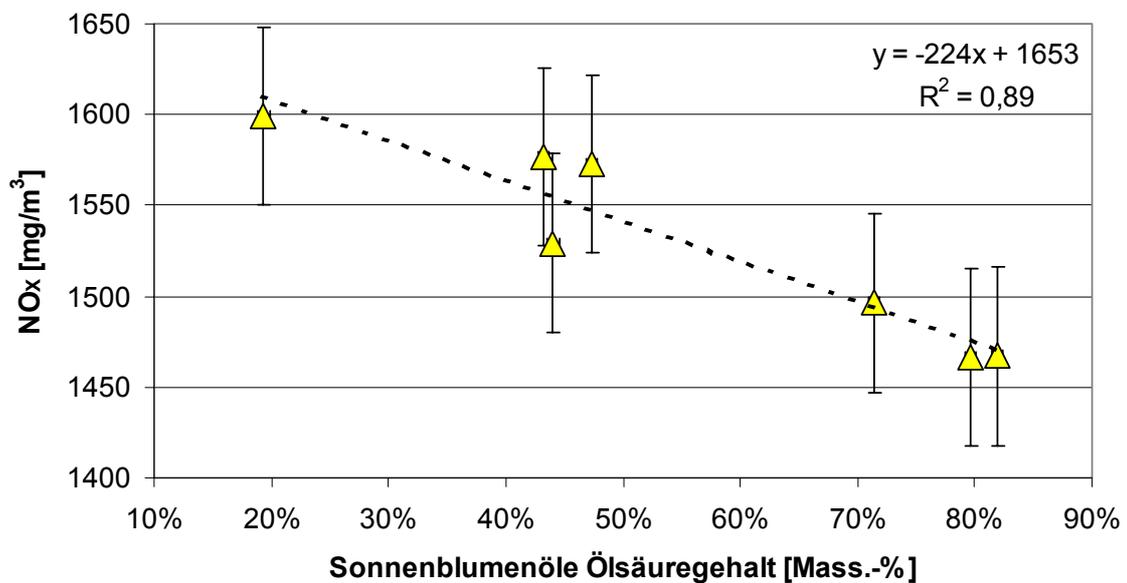


Abbildung 5.8: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die NO_x-Emission bei Sonnenblumenölen

Werden die Stickoxidemissionen aller Pflanzenöle betrachtet, so ist auch eine fallende NO_x -Emission bei steigendem Ölsäuregehalt zu sehen.

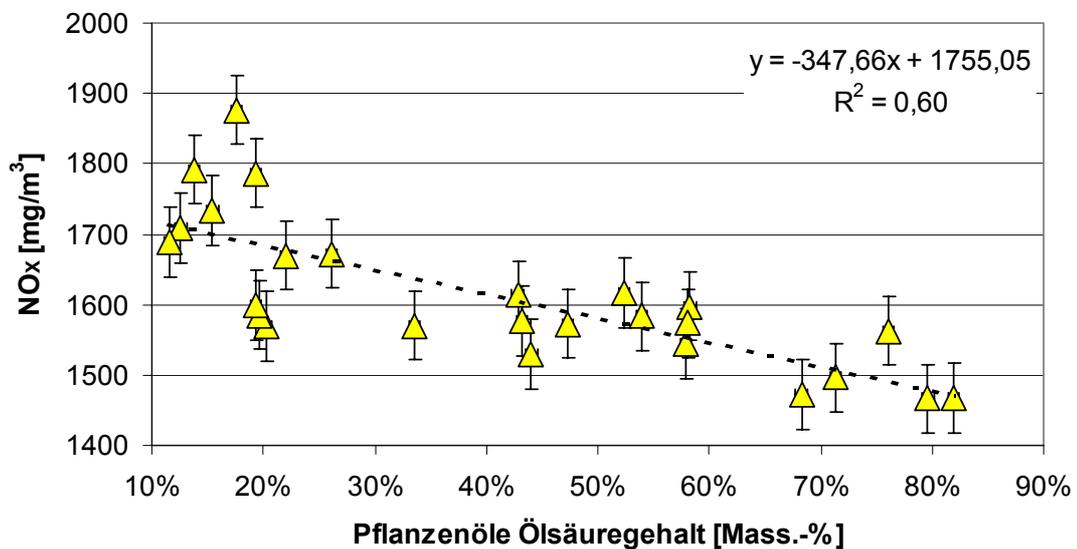


Abbildung 5.9: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die NO_x -Emission bei Pflanzenölen

Ein hoher Gehalt an Doppelbindungen wird durch eine hohe **Jodzahl** symbolisiert, weshalb sich bei einem Vergleich mit den NO_x -Emissionen ein steigender Zusammenhang mit einer Bestimmtheit von 59 % ergibt (Abbildung 5.10).

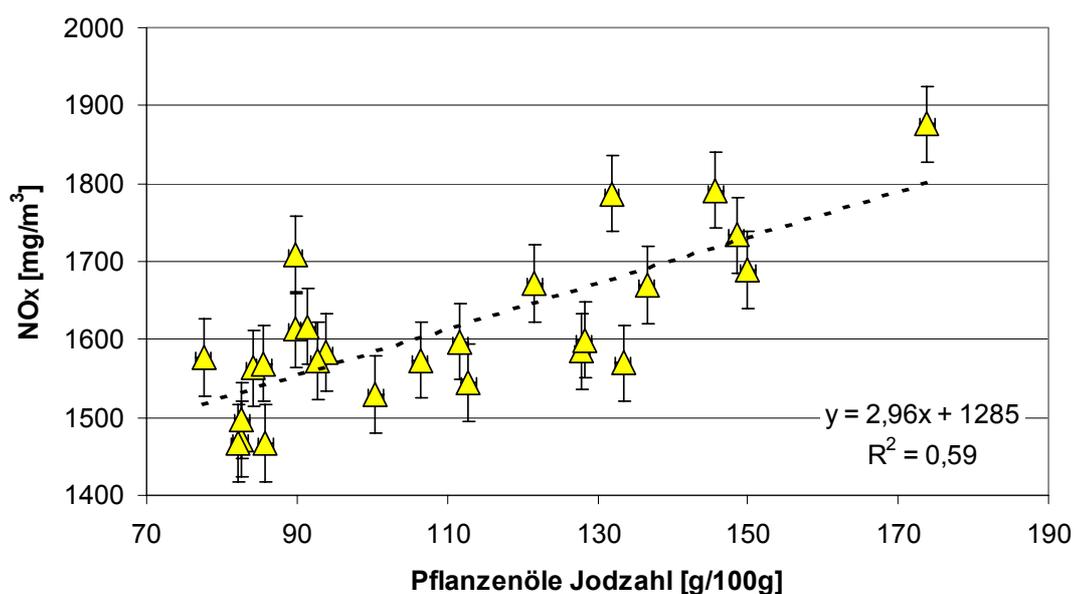


Abbildung 5.10: Einfluß der Jodzahl auf die NO_x -Emission bei Pflanzenölen

Die Fettsäurezusammensetzung bestimmt neben der Jodzahl auch die **Viskosität**. Daher bewirkt eine zunehmende Viskosität sinkende NO_x-Emissionen.

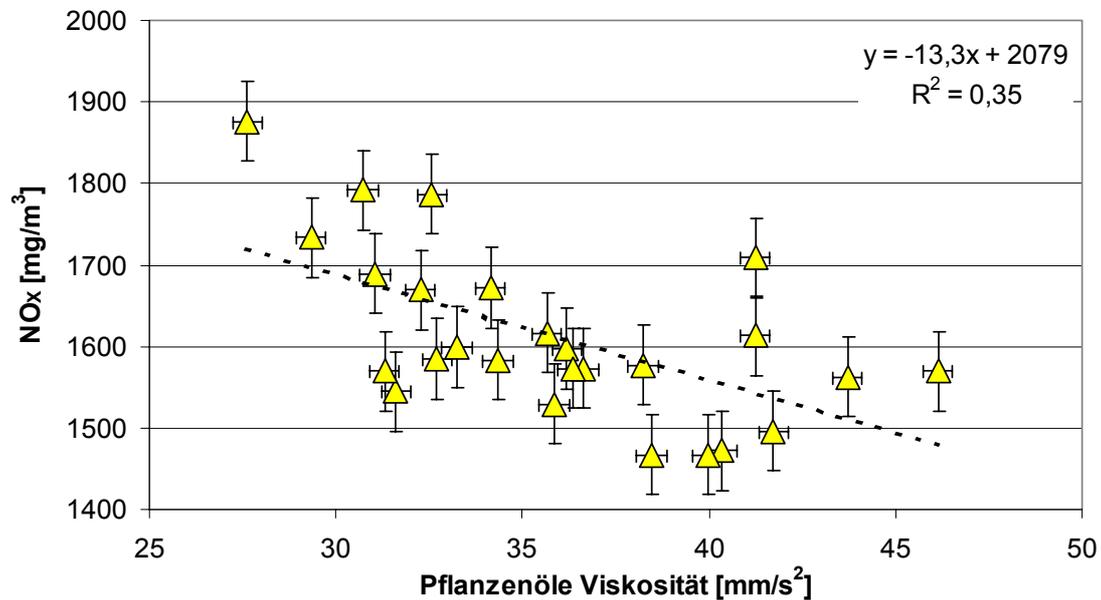


Abbildung 5.11: Abhängigkeit der NO_x-Emission von der Viskosität bei Pflanzenölen

5.2.3 Einfluß auf Kohlenmonoxidemissionen

Einflußgrößen auf die Kohlenmonoxidemissionen sind neben motorischen Parametern die Kraftstoffzerstäubung, die lokalen Verbrennungstemperaturen und der Sauerstoffgehalt der Kraftstoffe /88/. Die Fettsäurezusammensetzung der regenerativen Brennstoffe beeinflusst alle kraftstoffspezifischen Parameter. So ist die Jodzahl ein Indikator für CC-Doppelbindungen, die in vermehrtem Maß zur CO-Bildung beitragen können /108/. Die Dichte und der Heizwert sind maßgeblich vom C/H-Verhältnis abhängig /106/, das den CO-Anteil steuert.

In Abbildung 5.12 ist der Einfluß des **Linolsäuregehalts** am Beispiel der Sonnenblumenöle aufgezeigt. Ein steigender Gehalt der zweifach ungesättigten Linolsäure bewirkt mit einer Bestimmtheit von 80 % eine steigende CO-Emission.

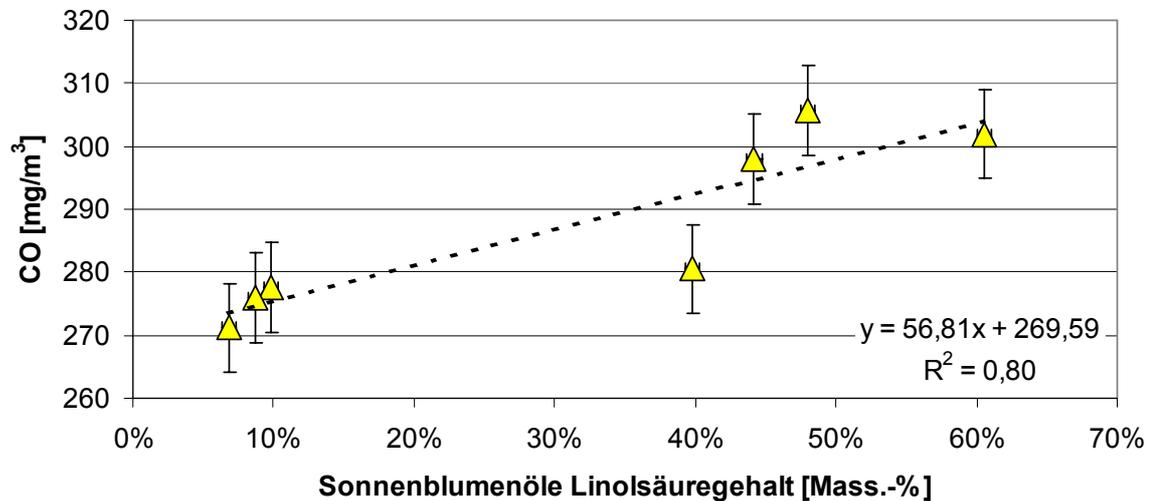


Abbildung 5.12: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die CO-Emission bei Sonnenblumenölen

Verifiziert man diesen Zusammenhang am Beispiel der Methylester, so ergibt sich noch eine Korrelation von 60 %, wie in Abbildung 5.13 dargestellt.

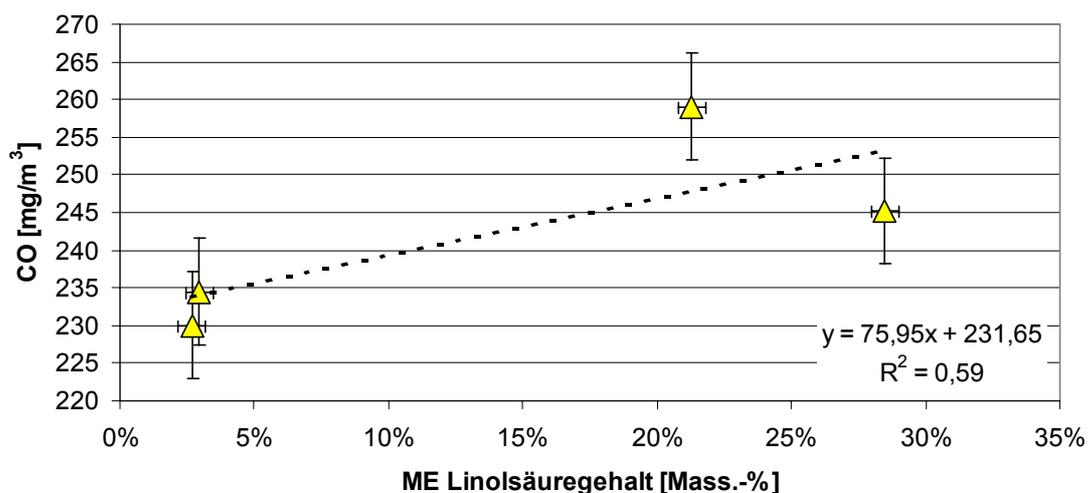


Abbildung 5.13: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die CO-Emission bei Methylestern

Im Gegensatz dazu reduziert sich die CO-Emission bei einem steigenden **Ölsäuregehalt**. Dies ist am Beispiel der Sonnenblumenöle in Abbildung 5.14 aufgezeigt.

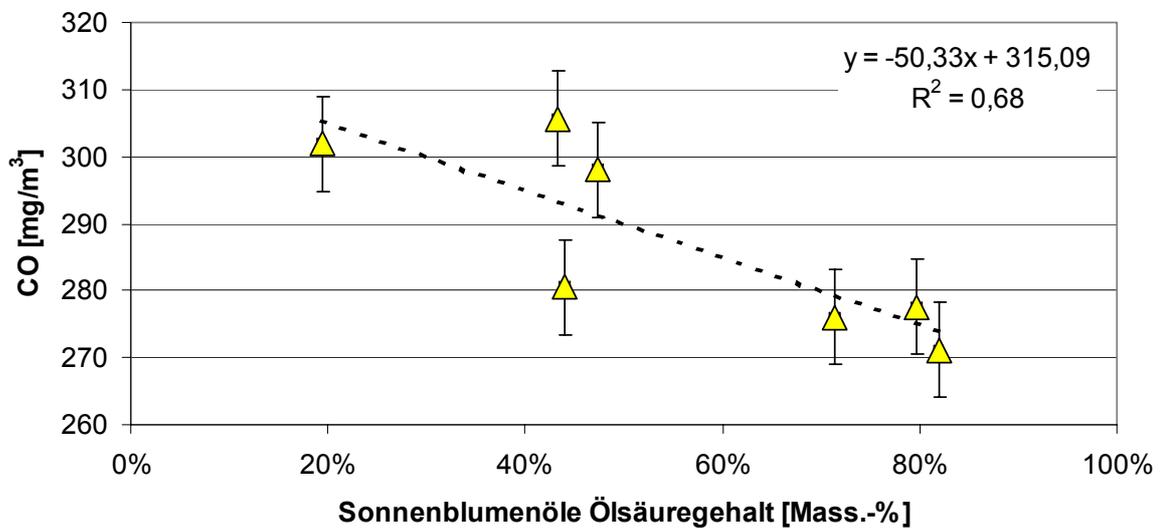


Abbildung 5.14: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die CO-Emission bei Sonnenblumenölen

Abschließend ist der Ölsäuregehalt über den Mittelwert der CO-Emissionen aller Kraftstoffgruppen in Abbildung 5.15 dargestellt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 88 % sinkt der CO Ausstoß bei steigendem Ölsäuregehalt.

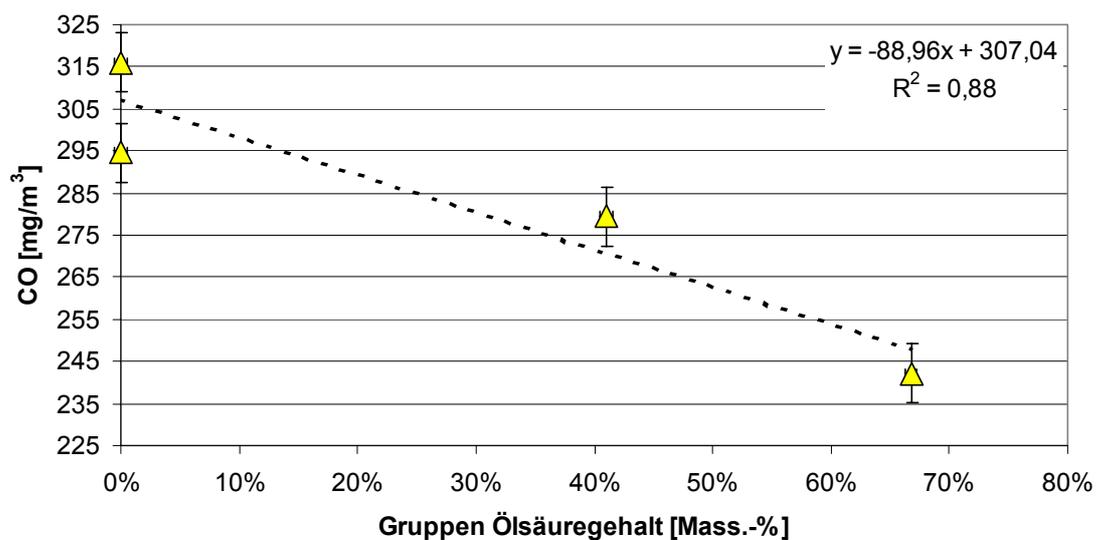


Abbildung 5.15: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die CO-Emission bei den Kraftstoffgruppen

Ob dieser Effekt von der Ölsäure ausgeht oder vollständig mit dem gleichzeitig sinkenden Linolsäuregehalt zusammenhängt kann anhand der bisherigen Versuche noch nicht eindeutig geklärt werden. Ein weiterer Einfluß einer Fettsäure wird am Beispiel der dreifach ungesättigten **Linolensäure** ersichtlich. So bedingt ein steigender Gehalt an Linolensäure analog zu dem Gehalt an Linolsäure bei den Methylestern eine erhöhte CO-Emission (Abbildung 5.15).

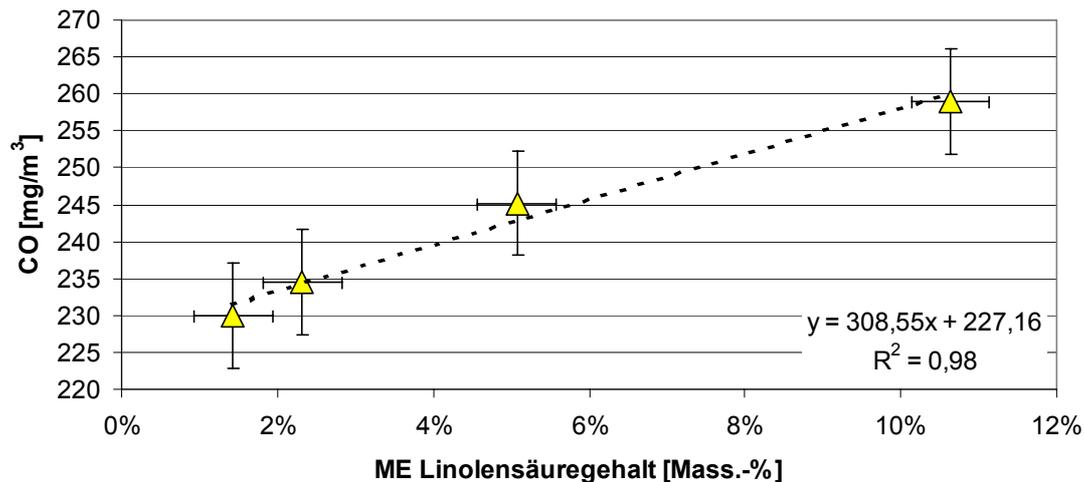


Abbildung 5.16: Einfluß des Linolensäuregehalts auf die CO-Emission bei den Methylestern

Eine weitere Bestätigung für einen Zusammenhang von CO-Emission und Linolensäuregehalt ist, daß Lackleinöl (11) die höchste CO-Emission (306 mg/m^3) und den höchsten Linolensäuregehalt (51,8 Mass.-%) aller Pflanzenöle besitzt.

Weiterhin kann ein Einfluß des **Koksrückstandes nach Conradson** auf die CO-Emissionen nachgewiesen werden. Ein möglicher Grund hierfür kann in dem bekannten Zusammenhang von Koksrückstand und Jodzahl liegen. Öle mit einem hohen Gehalt an Doppelbindungen neigen zur Bildung von Ruß und vielatomigen Rückständen [108]. Der Zusammenhang ist am Beispiel der Methylester in Abbildung 5.17 graphisch veranschaulicht.

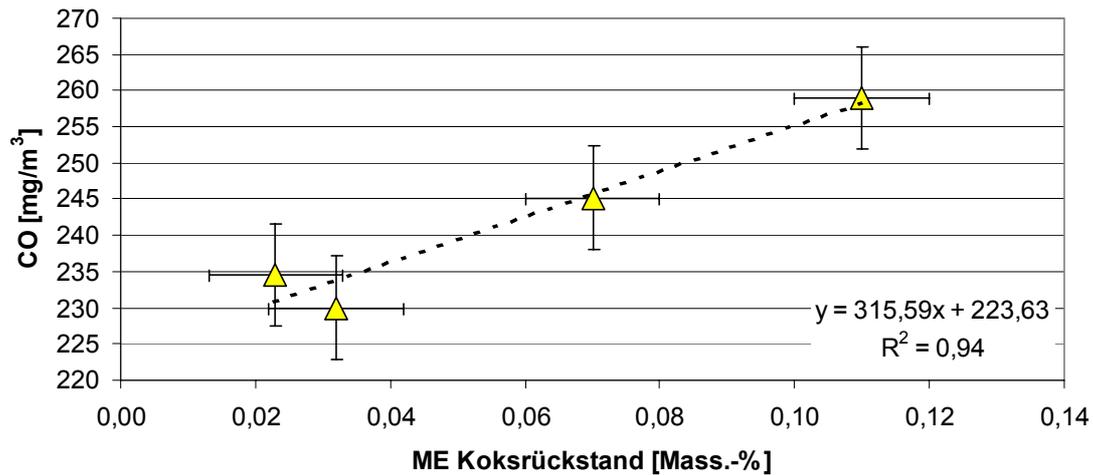


Abbildung 5.17: Einfluß des Koksrückstandes nach Conradson auf die CO-Emission bei den Methylestern

Dieser Zusammenhang kann bei den anderen Kraftstoffen nicht beobachtet werden, weshalb er vor einer abschließenden Bewertung noch weiter verifiziert werden muß.

5.2.4 Einfluß auf Kohlenwasserstoffemissionen

Die Kohlenwasserstoffemissionen bei Verbrennungsmotoren bestehen vor allem aus unverbrannten Kraftstoffresten. Je heterogener ein Kraftstoff ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß auch leicht flüchtige oder gekrackte Bestandteile im Abgas analysiert werden können /66/. Dieseldieselkraftstoff besteht aus einer großen Anzahl verschiedener Paraffine und ist dadurch heterogener als Pflanzenöl.

5.2.5 Einfluß auf Partikel-Emissionen

Die ermittelten Partikelemissionen variieren nur über die Grenzen der Kraftstoffgruppen hinweg signifikant. Innerhalb der einzelnen Gruppen, wie zum Beispiel den Sonnenblumenölen, sind keine deutlichen Unterschiede meßbar. Das bedeutet, daß die Partikelemissionen im wesentlichen von dem verwendeten Motor und der verwendeten Kraftstoffart (Diesel oder regenerativer Kraftstoff) abhängen. Eine weitere Einflußgröße ist der Schwefelgehalt der Kraftstoffe. Der enthaltene Schwefel wird zum Teil in oxidierte Form am Partikelfilter abgeschieden.

Der Zusammenhang von Heizwert und Partikel wird deutlich, wenn man die Partikelemissionen der Kraftstoffgruppen über dem **Heizwert** aufträgt, der ja ein eindeutiges

Kriterium für die Unterscheidung verschiedener Kraftstoffe ist (Abbildung 5.18). Das Bestimmtheitsmaß ist mit 94 % dabei relativ hoch, die Schwankungen in den einzelnen Gruppen jedoch nicht unerheblich.

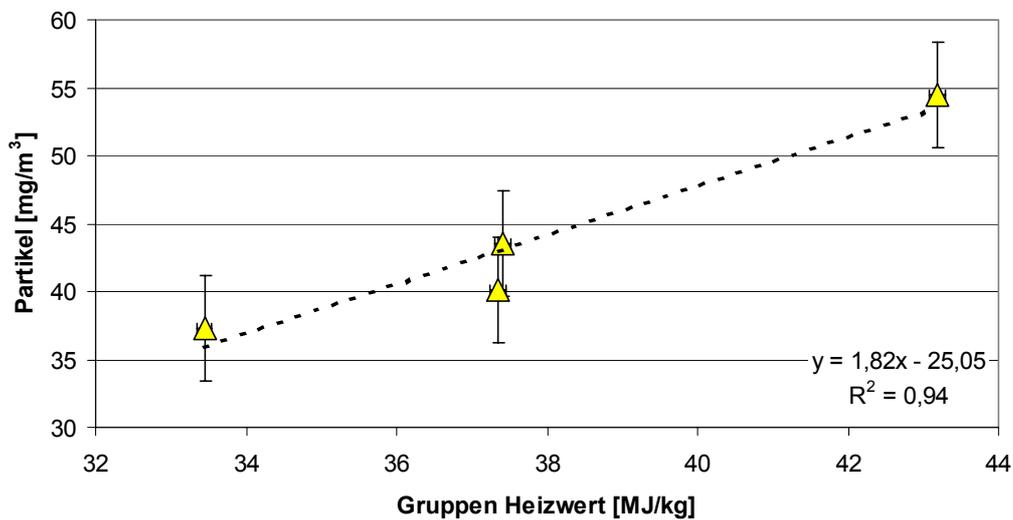


Abbildung 5.18: Einfluß des Heizwertes auf die Partikel-Emission bei den Kraftstoffgruppen

Nach Warnatz /108/ ist die Bildung von PAH für die Rußbildung verantwortlich. Die PAH werden an den CC-Brücken gebildet. Je mehr Doppelbindungen ein Pflanzenöl hat, desto größer ist die Menge an CC-Bindungen, die für eine Partikelbildung zur Verfügung stehen. Dieser Zusammenhang ist am Beispiel der Methyl ester für Linolsäure (Abbildung 5.19) und Ölsäure (Abbildung 5.20) abgebildet. Je größer die Menge an Ölsäure ist, desto niedriger sind die Mengen an Linol- und Linolensäure und damit sinken die Partikel-Emissionen.

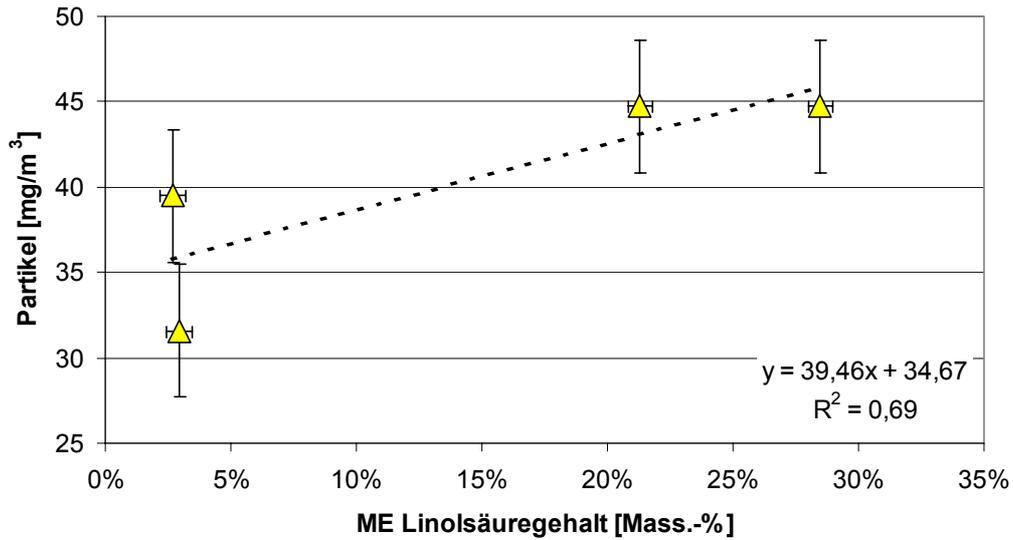


Abbildung 5.19: Einfluß des Linolsäuregehalts auf die Partikel-Emission bei den Methylestern

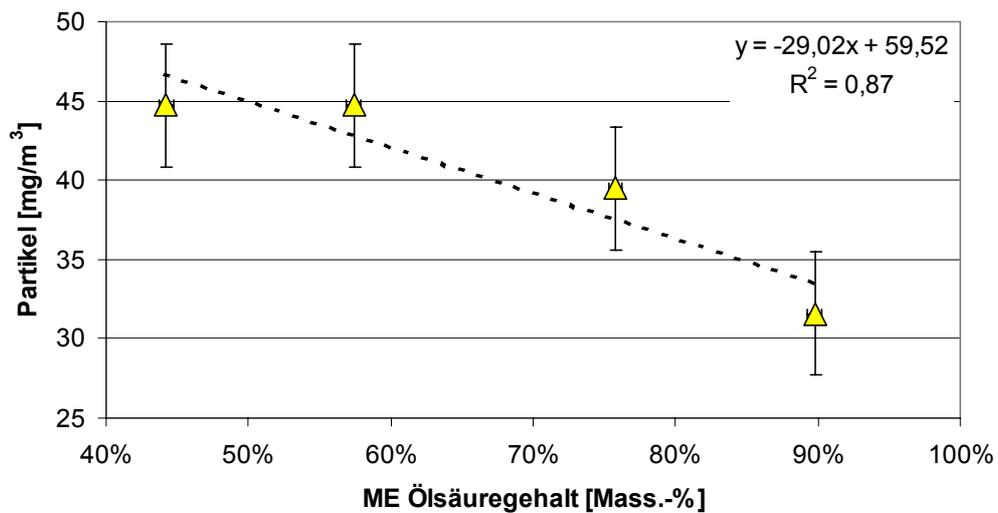


Abbildung 5.20: Einfluß des Ölsäuregehalts auf die Partikel-Emission bei den Methylestern

5.2.6 Einflüsse auf Acteon-, Butyraldehyd- und Acrolein-Emissionen

Die untersuchten Kraftstoffe emittieren nur sehr wenige Aldehyde und Ketone. Zudem sind aufgrund des Meßverfahrens deutliche Abweichungen bei der Reproduzierbarkeit festgestellt worden. Signifikante Zusammenhänge zwischen Kraftstoffeigenschaften und Emissionen lassen sich daher nicht ableiten. Die emittierten Stoffe können bei einer Verwendung eines Oxidationskatalysators noch weiter abgesenkt werden /79/.

5.2.7 Einfluß auf PAH-Emissionen

Bei den **PAH-Emissionen** sind aufgrund der großen Schwankungsbreiten der Untersuchungsergebnisse nur relativ vage Aussagen über die Einflußgrößen möglich. Die PAH-Emissionen gelten als Vorläufersubstanzen bei der Rußbildung /108/. Abbildung 5.21 verdeutlicht diesen Zusammenhang bei den Kraftstoffgruppen. Wenn die Menge der emittierten Partikel ansteigt, steigen bei den Kraftstoffgruppen mit einer Bestimmtheit von 60 % auch die PAH-Emissionen an. Je mehr PAH emittiert werden, desto mehr Partikel werden bei der Verbrennung gebildet.

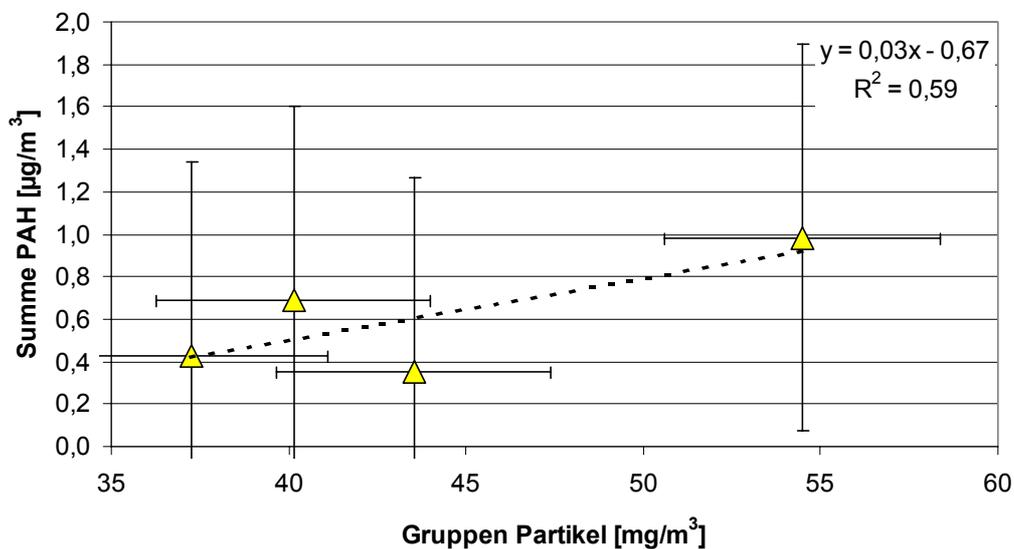


Abbildung 5.21: Einfluß der Partikel-Emissionen auf die PAH-Emissionen bei den Kraftstoffgruppen

5.2.8 Einfluß auf kanzerogene PAH-Emissionen

Analog zu den PAH-Emissionen streuen die Meßwerte der kanzerogenen PAH-Emissionen ebenfalls deutlich. Aus diesem Grund sind keine zusätzlichen Erkenntnisse für diese Emissionsgruppe ableitbar. Einzig die **Partikelemission** kann, wie in Abbildung 5.22 ersichtlich, mit den Werten der kanzerogenen PAH-Emissionen mit einer Bestimmtheit von 46 % korreliert werden. Die Fehlerschranken übersteigen dabei die Meßwerte deutlich, so daß dieser Zusammenhang vor einer quantitativen Bewertung noch weiter untersucht werden muß.

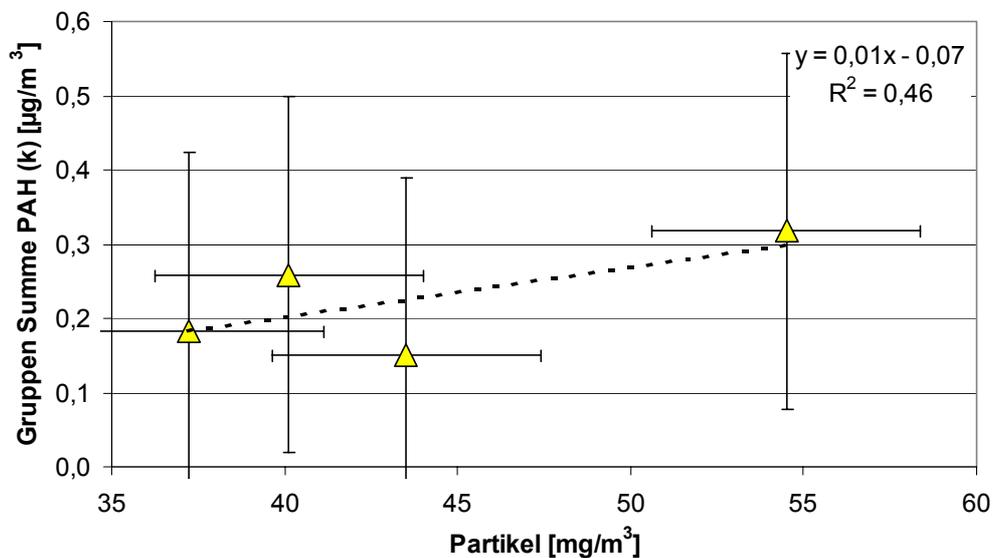


Abbildung 5.22: Einfluß der Partikel-Emissionen auf die kanzerogenen (k) PAH-Emissionen bei den Kraftstoffgruppen

6 Zusammenfassung

Bisherige Untersuchungen der Emissionen von mit regenerativen Kraftstoffen betriebenen Verbrennungsmotoren beschränken sich meist auf einen Vergleich von Rapsöl oder Rapsölmethylester zu Dieselkraftstoff. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, wesentlich detaillierter als bisher die Einflüsse einzelner kraftstoffspezifischer Eigenschaften auf die Emissionen zu untersuchen, um somit Rückschlüsse über den Einfluß einzelner Pflanzenölinhaltsstoffe (insbesondere der Fettsäuren) auf das Emissionsverhalten ziehen zu können. Hierfür wurde am Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie der TU München ein geeigneter BHKW-Versuchsstand aufgebaut und die vorhandene Meßtechnik zur Analyse von energetischen Kenngrößen und Abgasemissionen integriert. Zudem wurde ein hochauflösendes Massenspektrometer mit chemischer Ionisation zur Bestimmung der Aceton-, Butyraldehyd- und Acrolein-Emissionen in den Versuchsstand eingebunden und optimiert. Die Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen am Versuchsstand wurde quantifiziert. Im Anschluß wurden 38 verschiedene Kraftstoffe (naturbelassene Pflanzenöle, Methylester, synthetische Triglyceride, Dieselkraftstoff) ausgewählt und deren Kraftstoffeigenschaften untersucht. Die Kraftstoffe wurden daraufhin im BHKW verbrannt und deren Abgas-Emissionen analysiert. Eine Auswertung der PAH-Emissionen erfolgte bei der BlfA GmbH in Augsburg. Zur Diskussion der Versuche wurden die gemessenen Kraftstoffeigenschaften, Fettsäuremuster und Emissionen mittels des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten verglichen. Der Gesamtwirkungsgrad des BHKW (elektrisch + thermisch) lag bei der Untersuchung, bei allen verwendeten Brennstoffen, auf einem hohen Niveau.

Aus den Untersuchungen können folgende allgemeine Schlüsse abgeleitet werden:

- Die CO-, HC-, Aceton-, Partikel- und PAH-Emissionen aller regenerativen Kraftstoffe sind niedriger als bei Dieselkraftstoff.
- Die NO_x-Emissionen steigen bei der Nutzung von Pflanzenöl geringfügig an. Sie bleiben etwa gleich bei den Methylestern und sinken stark bei synthetischen Triglyceriden.

- Butyraldehyd- und Acrolein-Emissionen steigen deutlich gegenüber Dieselkraftstoff an.
- Bezüglich der Zusammensetzung der regenerativen Kraftstoffe, konnte ein eindeutiger Einfluß der ungesättigten Fettsäuren (Gehalt an CC-Doppelbindungen) auf das Emissionsverhalten festgestellt werden. Bei einer steigenden Jodzahl (steigende Anzahl an ungesättigten Fettsäuren) nehmen die NO_x-, CO, und HC-Emissionen zu.
- Je höher die Partikelemissionen sind, desto höher sind die PAH-Emissionen.
- Eine Beimischung von allein zur Verbrennung ungeeigneten Substanzen (Orangenketon, Rizinusöl, Styropor) verschlechtert die Verbrennung, und es erhöhen sich die CO- und HC-Emissionen.
- Ein Zusammenhang zwischen erhöhtem Koksrückstand des eingesetzten Treibstoffs und höheren NO- und CO-Emissionen konnte bei Methylestern festgestellt werden.
- Zudem konnte gezeigt werden, daß regenerative Kraftstoffe mit einer niedrigen Viskosität weniger Stickoxide emittieren.

Als emissionsarmer Kraftstoff kann nach Auswertung der Untersuchungsergebnisse ein Öl mit einem hohen Ölsäuregehalt bezeichnet werden, das zudem einen niedrigen Koksrückstand und ein niedrige Jodzahl aufweist.

7 Literaturverzeichnis

- /1/ Ahlborn Mess- und Regelungstechnik: Handbuch Almemo 5590-2. Holzkirchen, 1996
- /2/ ASTM D 3231-94: Prüfung von Mineralölen und anderen brennbaren Flüssigkeiten, Bestimmung des Phosphorgehaltes
- /3/ Baumbach, Günter: Luftreinhaltung: Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen – Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften. Springer, Berlin, 1992
- /4/ Bayer Diagnostics: Handbuch COMPUR FID. Leverkusen, 1990
- /5/ Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft, Teil 3: Begriffe der Fernwärmewirtschaft. VDEW, 5. Ausgabe, 1981
- /6/ Behmel, U.: Die Verwertung von Rohglycerin aus der Methylesterproduktion aus Altspeiseölen und -fetten. Hausinterne Mitteilung. Technische Universität München, 1998
- /7/ Belitz, H.D.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- /8/ Belting, T.: Blockheizkraftwerke: Ein Informationspaket. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1993
- /9/ Bericht des Bundes und der Länder über Nachwachsende Rohstoffe 1995. Hrsg. vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 3. Auflage, Bonn, 1995
- /10/ Birkner, C. M.: Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenwesen, 1995
- /11/ Bock, J.: Thermo-ökonomische Analyse der Kraft-Wärme-Kopplung mit Klein-Blockheizkraftwerken für die dezentrale Wärmeversorgung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- /12/ Bockisch, M.: Nahrungsfette und -öle; Handbuch der Lebensmitteltechnologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1993
- /13/ Breton, H.: Emissionsmessung mit einem Mehrkomponenten-Infrarot-Meßsystem. Staub-Reinhaltung der Luft 52 (1992), S.195-200

- /14/ Breuer, Claus: Beitrag zur Verbrennung von Rapsöl und Rapsölmethylester in direkteinspritzenden Dieselmotoren. VDI Verlag, Düsseldorf, 1994
- /15/ Bronstein, I.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun, 1989
- /16/ Budzikiewicz, H.: Massenspektrometrie. 2. Aufl., Weinheim: Verlag Chemie 1980
- /17/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energie, Daten 1999 (Nationale und internationale Entwicklung), Bonn. 1999
- /18/ Connemann, J.: Workshop "Biodiesel" der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) am 14. Februar 1997, Frankfurt am Main, 1997
- /19/ Conzelmann, R.: Erfolgsfaktoren der Innovation am Beispiel Pflanzenölmotor. Peter Lang-Verlag, Frankfurt am Main, 1995
- /20/ Davids, P.: Die TA Luft '86 - Technischer Kommentar. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986
- /21/ DIN 51755 03.74 (DIN EN ISO 22 179): Prüfung von Mineralölen und anderen brennbaren Flüssigkeiten, Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Abel-Pensky
- /22/ DIN 52900: Sicherheitsdatenblatt zum Transport und Lagerung von Gasen und Gasgemischen
- /23/ DIN 51419 06.83: Prüfung flüssiger Brennstoffe, Bestimmung der Gesamtverschmutzung von dünnflüssigen Mineralölerzeugnissen
- /24/ DIN 51551 Teil 1 04.93 (DIN EN ISO 10 370): Prüfung von Schmierstoffen und flüssigen Brennstoffen, Bestimmung des Koksrückstandes, Verfahren nach Conradson
- /25/ DIN 51558 Teil 1 01.83 (DIN EN ISO 3104): Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter (Normal-Ausführung)
- /26/ DIN 51562 Teil 1 07.79 (ISO 660): Prüfung von Mineralölen, Bestimmung der Neutralisationszahl, Farbindikator-Titration
- /27/ DIN 51575 11.84: Prüfung von Mineralölen, Bestimmung der Sulfatasche
- /28/ DIN 51773 07.71: Prüfung flüssiger Brennstoffe, Bestimmung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) von Dieselkraftstoffen
- /29/ DIN 51777 Teil 1 03.83 (DIN EN ISO 12 937): Prüfung von Mineralöl-Kohlenwasserstoffen und Lösemitteln, Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl Fischer, Direktes Verfahren
- /30/ DIN EN 116 01.83: Dieselkraftstoffe und Haushaltheizöle, Bestimmung des Temperaturgrenzwertes der Filtrierbarkeit

- /31/ DIN EN 590 05.93: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge, Dieselmotoren, Mindestanforderungen und Prüfverfahren
- /32/ Dobiasch, A.: Begleitmaterial zum Wärmetechnischen Praktikum. TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1999
- /33/ Dobiasch, A.: Einfluß der chemischen und physikalischen Eigenschaften von regenerativen Kraftstoffen auf das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren, Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 2000
- /34/ Dobiasch, A.: Instrumentierung und Inbetriebnahme einer Synthesegasversuchsanlage zur Reproduktion realer Konvertierungsprozesse an einem Dreiwegekatalysator. Diplomarbeit, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1996
- /35/ Dobiasch, A.; Behmel, U.; Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff, R.: Biodiesel aus gebrauchten Speiseölen und -fetten sowie aus Tierfetten - Rohstoffe - Aufbereitung – Verbrennung. VDI-Berichte Nr. 1457, Fortschrittliche Energiewandlung und –Anwendung, 16. - 17.3.1999, Garching
- /36/ Dobiasch, A.; Gifhorn, A.; Meyer-Pitroff, R.: N₂O als Sekundäremission am Dreiwegekatalysator. 2. Rumänisch-Deutsches Symposium „Thermische Prozesse im Umweltfreundlichen Maschinenbau und Industrielle Ausrüstungen“, Timisoara (Rumänien) 19.5. - 21.5.1997
- /37/ Dobiasch, A.; Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff R.: Einfluß der Einfluß der Pflanzenölart und -zusammensetzung auf das Emissionsverhalten eines BHKW - Prüfstandsergebnisse. In: Kongreßzeitschrift zur Fachtagung im Fortbildungszentrum des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz „Energetische Nutzung von Pflanzenölen“, Wackersdorf, 20.10.1998. Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. München: 1998
- /38/ Dobiasch, A.; Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff R.: Emission situation of regenerative-Powered Diesel Engines. In: Proceedings of Fisita 1998 World Automotive Congress, Paris, Sept. 27 - Oct. 1, 1998. Eds.: Fisita. Paris: 1998, (F98P515)
- /39/ Dobiasch, A.; Meyer-Pitroff, R.: Operating Diesel-Engines with Regenerative Fuels. 2. Rumänisch-Deutsches Symposium „Thermische Prozesse im Umweltfreundlichen Maschinenbau und Industrielle Ausrüstungen“, Timisoara (Rumänien) 19.5. - 21.5.1997
- /40/ Dobiasch, A.; Meyer-Pittroff, R.: Vergleich verschiedener Automatisierungslösungen der Getränkeindustrie. Brauwelt Nr. 15, 1999

- /41/ Dobiasch, A.; Meyer-Pittroff, R.: Welche Streiche kann das Jahr 2000 der Elektronik spielen? In: Tagungsband zur 44. Brauwirtschaftlichen Tagung in Weihenstephan, Herausgeber: Unternehmensberatung Weihenstephan GmbH, 26. und 27.4.1999
- /42/ Dobiasch, A.; Meyer-Pittroff, R.; Gifhorn, A.; Schöberl, H.: Emission Situation of Regenerative-Fuel-Powered Diesel Engines. In: Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 7th-10th July 1997, Lisbon – Portugal
- /43/ Dobiasch, A.; Negrea, V.D.; Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff, R.: Experimental researches concerning the emissions level to the vegetable oils working of the diesel engine, ESFA Bucuresti, Romania, 1998
- /44/ Espig, G.: Ölpflanzen tropischer und subtropischer Anbauggebiete. In: VDI-Tagung Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke am 4./5. Juli 1994, Würzburg, S. 41-52
- /45/ Fischer Rosemount GmbH & Co.: Handbuch Binos 1000, Sachnummer: 90000301. Weßling, Ausgabe 03/1992
- /46/ Fischer Rosemount GmbH & Co.: Handbuch Oxynos 100. Weßling, 1991
- /47/ Förster, U.: Umweltschutztechnik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993
- /48/ Fritz, U.: Distickstoffoxid und andere Sekundäremissionen bei der selektiven nicht-katalytischen Reduktion von Stickstoffoxiden. Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1994
- /49/ Gailfuß, M.: CO₂-Minderungspotentiale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland. Peter Lang-Verlag, Frankfurt am Main, 1998
- /50/ Gesellschaft für dezentrale Energieversorgung e.V.: Pflanzenöl-Technik 1 (Pflanzenöl - Kraftstoff aus der Sonne), Ingolstadt, 1992
- /51/ Gifhorn, A.: Einfluß der Abgaszusammensetzung auf die N₂O-Konvertierung an einem Dreiwegekatalysator mit Pd/Rh-Beschichtung. Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1997
- /52/ Grünau Illertissen GmbH: Produktkatalog DELIOS Serie, Illertissen 1998
- /53/ Hartmann, H.: Energie aus Biomasse. Landtechnik-Bericht Heft 18, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan, 1996

- /54/ Henning, R.: Produktion und Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff im Sahel, am Beispiel von Mali. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, 1992
- /55/ Herrmann, S.: Einsatz unveränderter alternativer Treibstoffe und ihrer Mischungen im direkteinspritzenden Dieselmotor. Diplomarbeit, Schweizerische Ingenieurschule für Landwirtschaft, Zollikofen, 1995
- /56/ Icemaster GmbH: Handbuch BHKW Fischer-Panda 10. Paderborn, 1995
- /57/ Iglhaut, L.; Behmel, U.; Meyer-Pittroff, R.: Circular running economy with vegetable oils. Proceedings 10th European Biomass Conference and Technology Exhibition, Würzburg, 8th - 11th June 1998
- /58/ Internet: <http://www.chemie.uni-halle.de/allg/chemikalien.html>; Berlin, 1999
- /59/ Internet: http://www.deutsche-shell.de/sug/entwck_f.htm, Deutsche Shell AG, 1998
- /60/ Internet: <http://www.muenchen.de/referat/rgu/frames/umb/aktuell/pakiii-iv.htm>, Landeshauptstadt München, 1999
- /61/ Internet: <http://www.ufop.de/>, UFOP Online, Statistik des Verbandes, 1999
- /62/ Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>, Umweltbundesamt, Berlin, 1999
- /63/ ISO 6245: Mineralölerzeugnisse - Bestimmung des Aschegehalts
- /64/ Jurisch, C.; Meyer-Pittroff R.: Verwertung von pflanzlichen und tierischen Altölen und -fetten zur Herstellung regenerativen Kraftstoffs. Schlußbericht, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, Freising, 1995
- /65/ Jurisch, C.; Meyer-Pittroff, R.: Pflanzenölgereignete Dieselmotoren deutscher Hersteller. VDI Berichte Nr. 1126, 1994
- /66/ Klingenberg, H.: Automobil-Meßtechnik, Band C: Abgasmeßtechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995
- /67/ Korte, V.; Hemmerlein N.: Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Abschlußbericht TV 8837; Weissach, 1991
- /68/ Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1989
- /69/ Kunz, D.: Abgasanalytik bei Dieselmotoren mit Anlagen zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Chemie, 1996
- /70/ Lachenmaier, J.: Die Reinigung von Abgasen regenerativer Kraftstoffe aus Dieselmotoren mit Oxi- und SCR- Katalysatoren, Dissertation, TU München-

- Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, (in Vorbereitung 2001)
- /71/ Lachenmaier, J.: Instrumentierung und Inbetriebnahme eines mit regenerativen Kraftstoffen betriebenen BHKW-Versuchsstandes zur Messung von Abgasemissionen. Diplomarbeit, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1998
- /72/ Lachenmaier, J.; Dobiasch, A.; Meyer-Pittroff, R.: Catalytic Emission Reduction of Regenerative Fuel Powered Co-Generation Plants. Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lissabon / Portugal, 12. - 15.07.1999, Proceedings
- /73/ Lachenmaier, J.; Dobiasch, A.; Meyer-Pittroff, R.: Emission Reduction of Regenerative Fuel Powered Co-Generation Plants with SCR- and Oxidation-Catalysts. Fifth International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control, Brüssel / Belgien, 12. - 14.04.2000, Proceedings
- /74/ Lachenmaier, J.; Dobiasch, A.; Ruß, W.; Meyer-Pittroff, R.: Vergleichende Untersuchungen der Abgasemissionen eines mit regenerativen Kraftstoffen betriebenen BHKW. OTTI-Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas, Kloster Banz, 24.11.1999, S. 193ff
- /75/ Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff, R.: Qualitätsanforderungen an Pflanzenölkraftstoffe. Fachkongress "Kraftstoffe aus Pflanzenöl" im Rahmen der Bayern Regenerativ 2000, Augsburg, 15.07.2000, Tagungsband
- /76/ Lachenmaier, J.; Negrea, V.D.; Meyer-Pittroff, R.; Dobiasch, A.; Russ, W.: Dieselmotor, eine energetische Gruppe in Blockheizkraftwerke und dessen Noxen. - In: Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Tomul 43 (57), Timisoara / Rumänien, 1998, S. 85-96
- /77/ Lembke, H.: Kompendium Raps 1992: Norddeutsche Ölpflanzenzucht. Hans Georg Lembke KG, Hohenheim, 1992
- /78/ Matissek, R.; Schnepel, F.; Steiner, G.: Lebensmittelanalytik. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1992
- /79/ May, H.; Hattingen, U.; Klee, P.; Spitz, M.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, „Untersuchungen zum vergleichenden Einsatz von Dieseldieselkraftstoff und Rapsölmethylester an verschiedenen Dieselmotoren“. Kaiserslautern, 1994
- /80/ May, R.: Neuere Untersuchungen über die Umweltverträglichkeit und Dauerstandfestigkeit von Vorkammer- und direkteinspritzenden Dieselmotoren bei Betrieb mit Rapsöl und Rapsmethylester. VDI Berichte Nr.1020, Aspekte alternativer Energieträger für Fahrzeugantriebe, Tagung Wolfsburg, 24.-26.11.1992, S.189-212

- /81/ Meyer-Pittroff, R.: Vorlesungsskriptum Kessel- Kraft- und Kälteanlagen. TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1998
- /82/ Mortimer, Charles E: Chemie: das Basiswissen der Chemie. Thieme, Stuttgart, 1996
- /83/ Müller & Weigert GmbH: Handbuch für das Wirkleistungsmeßgerät, Sachnummer: 2786688812. Nürnberg, 1997
- /84/ Negrea, V.D.; Dobiasch, A.; Lachenmaier, J.; Meyer-Pittroff, R.: Concerning the evaluation meanings of the environment pollution level for the diesel engines working with conventional and non-conventional fuels, ESFA Bucaresti, Romania, 1998
- /85/ Neumann, C. in „Eine ganze Branche lebt vom ranzigem Öl“. Süddeutsche Zeitung vom 17.06.99, S. L12
- /86/ Neumann, C. in „Wie die Laborratte ins Schweineschnitzel kommt“. Süddeutsche Zeitung vom 17.06.99, S. L12
- /87/ Perkin & Elmer Bodenseewerk: Handbuch MCS 100 Nr. 091188, SN213. Friedrichshafen 1994
- /88/ Pischinger, F.: Verbrennungsmotoren (Vorlesungsdruck). RWTH Aachen, 1994
- /89/ Precht, M.: Bio-Statistik. Oldenbourg Verlag, München, 1987
- /90/ Pröll, M.: Untersuchung homogener Gasreaktionen zur Reduzierung von Stickoxiden. Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1991
- /91/ Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard). LTV-Arbeitskreis „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ vom 23.05.2000, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan
- /92/ Rabl, H.P.: Vergleichende experimentelle Untersuchungen an Dreiwegekatalysatoren zur Ermittlung der Bildungsparameter von Distickstoffoxid (N_2O). Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, Freising, 1999
- /93/ Reinhardt, G.: Energie- und CO_2 -Bilanzierung Nachwachsender Rohstoffe: Theoretische Grundlagen und Fallstudie Raps. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1993
- /94/ Reiser, Wolfgang: Ermittlung von motor- und verbrennungstechnischen Kenndaten an einem Dieselmotor mit Direkteinspritzung bei Betrieb mit unterschiedlich aufbereitetem Rapsöl. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997

- /95/ Richter, F.: Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Abschlußbericht im Auftrag des BMFT, Weissach, 1991
- /96/ Römpp H.: Römpp Chemie Lexikon. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1995
- /97/ Schäfer, F., van Basshuysen R.: Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von PKW-Verbrennungsmotoren. Springer-Verlag Wien - New York, Altenburg 1993
- /98/ Schindler, Volker: Kraftstoffe für morgen: Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen. Springer, Berlin, 1997
- /99/ Schuster, W.: Ölpflanzen in Europa. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 1992.
- /100/ Strasburger, E; Noll, F; Schenk, H; Schimper, A.F.W.: Lehrbuch der Botanik. Gustav Fischer Verlag, 1991
- /101/ Streit, A.: Emissionsuntersuchungen an einem stationären Rapsöl-Blockheizkraftwerk - Ergebnisse einer Grundsatzuntersuchung. In: Fachtagung Energetische Nutzung von Pflanzenölen am 20.10.1998, Wackersdorf, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
- /102/ Vellguth, G.: Emissionen bei Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schlepper-Dieselmotoren. In: Grundlagen der Landtechnik 37 (1987)
- /103/ Villinger, J.: Persönliche Mitteilungen, Villinger & Federer GmbH, Absam, Österreich.
- /104/ Villinger, J: SIMS 500- Rapid Low Energy Secondary Ion Mass Spectrometer for In-Line Analysis of Gaseous Compounds- Technology and Applications in Automotive Emission Testing. SAE Technical Paper Series 932017, 1993.
- /105/ Vorläufiger Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard). Protokoll des 3. LTV-Arbeitskreises „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ vom 29.04.1996, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan
- /106/ Vorläufiger Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard). Protokoll des 5. LTV-Arbeitskreises „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ vom 02.03.1999, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan
- /107/ VSE GmbH: Datenblatt VSE Axialturbinen-Durchflußsensor. Neuenrade, 1997
- /108/ Warnatz, J.; Mass, U.; Dibble, R.W.: Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung, und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. Springer Verlag, Berlin, 1997
- /109/ Wehinger, C.: Die Bildung der Sekundäremission Distickstoffoxid bei der katalytischen Schadstoffminderung. Dissertation, TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 1994

- /110/Weidmann, K.: Anwendung von Rapsöl in Fahrzeug-Dieselmotoren. Automobil-technische Zeitschrift 97 Heft 5, Kosmo-Verlag Stuttgart, 1995
- /111/Weizsäcker, E.-U. von, Lovins, A. B., Lovins, L. H.: Faktor Vier, Doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch. Knauer Verlag, München, 1997
- /112/Widmann, B. A.: Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung des Phosphorgehalts von Rapsöl bei der Gewinnung in dezentralen Anlagen. Dissertation an der Technischen Universität München, 1994
- /113/Widmann, B.: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen mit Dieselkraftstoff. Fachgespräch: Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Rimpar, 1994

Anhang (Meßwertliste)

	Öl-Art	mBr	Abgas vor	Kühl ein	P el	Pth	η el	η th	η ges
		[kg/h]	[°C]	[°C]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[%]
2	AME	2,46	336,3	39,6	5,467	16,7	21,5	65,7	87,2
3	Biodiesel	2,45	333,7	39,5	5,463	16,9	21,4	66,4	87,8
4	EME I	2,44	334,9	39,1	5,453	16,9	21,4	66,1	87,5
5	EME II	2,49	335,6	39,2	5,452	16,9	21,3	65,8	87,1
6	Distelöl I	2,52	342,6	39,3	5,464	17,0	21,0	65,5	86,5
7	Distelöl II	2,52	344,9	39,5	5,459	17,0	21,0	65,4	86,5
8	Erdnußöl	2,50	344,9	39,3	5,461	17,0	21,2	66,0	87,2
9	Euphorbia-lathyris-Öl	2,54	346,3	39,3	5,467	16,9	21,1	65,2	86,2
10	Hanföl	2,44	351,5	38,6	5,474	16,8	21,5	66,2	87,7
11	Lackleinöl	2,48	348,4	39,8	5,487	16,8	21,5	65,6	87,1
12	Leindotteröl	2,51	348,9	39,0	5,475	16,8	21,2	65,2	86,4
13	Keimöl	2,51	350,9	38,7	5,475	16,9	21,2	65,3	86,5
14	Olivenöl	2,47	342,5	39,1	5,467	16,8	21,4	65,8	87,2
15	Pflanzenölmix	2,47	335,1	39,3	5,453	16,9	21,1	65,5	86,6
16	Rapsöl I	2,45	336,4	39,0	5,462	16,7	21,4	65,5	86,9
17	Rapsöl II	2,44	338,4	39,1	5,460	16,6	21,4	65,4	86,8
18	Saflor	2,50	344,5	39,4	5,457	17,1	21,0	65,7	86,7
19	Senföl	2,42	339,8	38,9	5,465	16,8	21,5	66,1	87,6
20	Soja	2,46	345,5	39,1	5,468	16,7	21,4	65,5	86,9
21	Sonne I	2,46	343,0	38,6	5,483	16,8	21,3	65,5	86,8
22	Sonne II	2,48	340,4	38,8	5,477	16,9	21,1	65,3	86,4
23	Sonne III	2,47	340,4	38,7	5,488	16,8	21,2	65,1	86,4
24	Sonne IV	2,46	340,4	39,5	5,490	16,7	21,4	65,1	86,5
25	Sonne V	2,38	344,1	38,9	5,476	16,7	21,7	66,0	87,7
26	Traubenkernöl	2,45	338,4	39,6	5,484	16,8	21,6	66,0	87,6
27	Walnußöl	2,47	340,7	39,8	5,481	16,7	21,3	65,1	86,4
28	Orangenketon/AME	2,43	348,0	39,3	5,489	16,7	21,7	66,1	87,8
29	Rizinusöl/AME	2,47	344,1	39,4	5,493	16,8	21,6	65,8	87,3
30	Styropor/AME	2,45	343,6	39,3	5,491	16,7	21,7	65,9	87,6
31	Synthetik I	2,84	353,8	39,5	5,498	17,1	21,3	66,3	87,6
32	Synthetik II	2,74	348,2	38,5	5,495	17,2	21,1	66,3	87,4
36	Purgiernuß (Nicaragua)	2,47	345,1	39,5	5,479	16,7	21,5	65,6	87,1
37	Purgiernuß (Mali)	2,49	347,3	39,7	5,479	17,0	21,0	65,2	86,2
39	HO Sonne I	2,49	354,4	39,6	5,485	16,8	21,4	65,6	86,9
40	HO Sonne II	2,47	347,9	39,7	5,485	16,9	21,2	65,2	86,3
38	Sommerdiesel	2,11	344,4	39,4	5,481	16,6	21,7	65,5	87,2
1	Winterdiesel	2,11	348,6	39,1	5,490	16,6	21,7	65,7	87,4
42	TME	2,57	359,7	39,2	5,473	17,4	20,7	65,7	86,4

	Öl-Art	CO [mg/m ³]	CO ₂ [Vol.-%]	NOX [mg/m ³]	O ₂ [Vol.-%]	HC [mg/m ³]	SO ₂ [mg/m ³]	Partikel [mg/m ³]	Aceton [mg/m ³]	Butyraldehyd [mg/m ³]	Acrolein [mg/m ³]
2	AME	245,2	11,47	1572,5	9,72	36,9	2,2	44,7	4,9	1,6	1,8
3	Biodiesel	259,0	11,42	1499,1	9,61	38,8	1,1	46,8	5,3	1,5	2,0
4	EME I	234,5	11,39	1464,0	9,67	37,5	0,3	42,2	5,2	1,6	2,0
5	EME II	230,0	11,45	1451,5	9,64	37,0	0,5	31,6	5,4	1,6	1,9
6	Distelöl I	252,5	11,51	1669,6	9,75	30,9	1,9	33,3	4,3	1,6	2,2
7	Distelöl II	262,0	11,57	1708,4	9,76	30,9	1,0	34,1	4,4	1,7	2,2
8	Erdnußöl	250,7	11,49	1613,3	9,73	29,3	0,8	35,5	4,3	1,7	2,0
9	Euphorbia-lathyris-Öl	265,8	11,59	1563,0	9,80	37,1	1,5	65,5	5,0	1,7	2,5
10	Hanföl	258,8	11,81	1733,6	9,96	30,1	0,5	46,7	3,2	1,4	2,0
11	Lackleinöl	306,1	11,87	1876,2	9,70	42,1	0,4	39,5	3,6	1,5	1,8
12	Leindotteröl	275,1	11,68	1715,5	9,89	32,0	1,1	44,8	3,9	1,6	2,2
13	Keimöl	258,4	11,67	1671,9	9,92	31,4	0,6	43,0	3,6	1,5	2,1
14	Olivenöl	268,5	11,42	1472,0	9,50	35,1	0,6	37,7	4,1	1,5	1,8
15	Pflanzenölmix	280,7	11,50	1544,7	9,57	42,1	4,5	52,6	5,3	1,7	2,0
16	Rapsöl I	275,6	11,52	1597,2	9,68	38,1	0,2	40,1	5,0	1,7	1,9
17	Rapsöl II	278,8	11,45	1573,3	9,68	39,5	0,5	41,4	4,6	1,6	2,0
18	Safflor	301,7	11,58	1570,0	9,45	46,1	2,7	61,5	5,1	1,6	2,2
19	Senföl	287,1	11,37	1569,4	9,56	38,1	1,6	38,6	4,1	1,5	1,8
20	Soja	280,8	11,52	1584,9	9,58	38,1	0,0	37,8	4,1	1,6	1,8
21	Sonne I	280,6	11,42	1529,3	9,50	37,9	0,3	43,9	4,3	1,6	1,9
22	Sonne II	277,6	11,40	1466,8	9,43	37,0	0,8	40,8	4,2	1,5	1,8
23	Sonne III	271,2	11,39	1466,9	9,50	36,9	3,0	45,6	4,2	1,5	1,8
24	Sonne IV	276,0	11,70	1496,3	9,76	43,4	0,4	36,4	4,2	1,5	1,8
25	Sonne V	301,9	11,47	1599,4	9,55	37,5	0,1	36,9	4,3	1,6	1,7
26	Traubenkernöl	294,5	11,69	1787,0	9,67	47,9	1,3	39,1	5,0	1,7	1,8
27	Walnußöl	294,3	11,71	1791,7	9,66	46,2	0,4	34,7	4,9	1,8	1,8
28	Orangenketon/AME	280,3	11,61	1580,9	9,80	48,2	2,2	45,3	3,5	1,3	1,4
29	Rizinusöl/AME	281,8	11,69	1543,5	9,79	40,1	1,6	42,1	3,7	1,4	1,5
30	Styropor/AME	262,7	11,69	1574,0	9,81	37,4	1,5	41,5	3,8	1,5	1,5
31	Synthetik I	302,8	12,01	1113,1	9,49	41,2	2,2	37,0	4,3	1,6	1,6
32	Synthetik II	286,5	12,04	1246,4	9,63	32,5	1,7	34,8	4,8	1,8	1,5
36	Purgiernuß (Nicaragua)	278,2	11,58	1616,4	9,59	42,8	0,8	39,6	4,9	1,9	1,8
37	Purgiernuß (Mali)	288,4	11,56	1583,4	9,44	44,5	1,8	44,5	5,1	1,9	1,9
39	HO Sonne I	298,0	11,59	1572,9	9,58	46,1	1,5	40,2	4,8	1,7	1,9
40	HO Sonne II	305,6	11,59	1576,8	9,56	45,3	1,7	36,6	4,5	1,7	1,9
38	Sommerdiesel	312,0	11,18	1515,6	9,75	69,1	52,3	67,3	5,6	1,2	1,3
1	Winterdiesel	320,1	11,17	1461,9	9,78	79,0	27,8	63,9	5,4	1,2	1,3
42	TME	313,3	11,44	1224,7	9,58	34,7	0,7	79,0	4,0	1,3	1,9

	Öl-Art	Palmitin Mass.-%	Stearin Mass.-%	Öl Mass.-%	Linol Mass.-%	Linolen Mass.-%	Arachin Mass.-%	Behen Mass.-%	Eruca Mass.-%	Rest Mass.-%
2	AME	8,8%	3,9%	44,2%	28,5%	5,1%	1,0%	0,0%	0,0%	8,5%
3	Biodiesel	4,5%	1,7%	57,4%	21,3%	10,6%	1,6%	0,4%	0,0%	2,4%
4	EME I	1,6%	0,0%	89,8%	2,9%	2,3%	2,1%	0,1%	0,0%	1,1%
5	EME II	13,4%	1,3%	75,8%	2,7%	1,4%	0,6%	0,0%	0,0%	4,9%
6	Distelöl I	7,5%	4,7%	22,0%	53,5%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%	11,4%
7	Distelöl II	6,2%	2,5%	12,6%	75,2%	0,0%	0,4%	0,5%	0,0%	2,5%
8	Erdnußöl	9,5%	3,1%	42,8%	25,4%	0,2%	8,5%	2,9%	0,0%	7,5%
9	Euphorbia-lathyris-Öl	5,6%	1,7%	76,1%	3,4%	2,5%	1,5%	0,0%	0,0%	9,2%
10	Hanföl	5,9%	2,7%	15,4%	55,2%	17,2%	0,5%	0,0%	0,0%	3,1%
11	Lackleinöl	5,1%	3,0%	17,6%	15,1%	51,8%	0,2%	0,0%	0,0%	7,2%
12	Leindotteröl	4,8%	2,4%	11,6%	14,3%	36,5%	1,4%	0,0%	2,7%	26,2%
13	Keimöl	9,8%	1,8%	26,2%	55,0%	1,0%	0,3%	0,0%	0,0%	6,0%
14	Olivenöl	0,0%	2,5%	68,3%	8,7%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	19,7%
15	Pflanzenölmix	4,4%	1,4%	57,9%	20,1%	9,1%	1,3%	0,7%	0,0%	5,1%
16	Rapsöl I	4,3%	1,6%	58,3%	19,4%	9,7%	1,3%	0,0%	0,0%	5,4%
17	Rapsöl II	4,2%	1,6%	58,0%	19,4%	8,8%	1,3%	0,0%	0,0%	6,6%
18	Saflor	20,3%	9,5%	33,6%	23,8%	2,0%	3,3%	0,0%	4,2%	3,5%
19	Senföl	2,7%	1,4%	20,3%	7,6%	9,1%	11,5%	0,0%	38,5%	8,9%
20	Soja	9,0%	3,8%	19,6%	50,7%	7,5%	0,0%	0,0%	0,0%	9,4%
21	Sonne I	4,4%	3,3%	44,0%	39,8%	0,9%	0,3%	0,0%	0,0%	7,3%
22	Sonne II	2,8%	3,0%	79,6%	9,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%
23	Sonne III	2,4%	2,7%	81,9%	6,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%
24	Sonne IV	3,3%	2,0%	71,4%	8,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	14,7%
25	Sonne V	3,6%	3,4%	19,4%	60,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,1%
26	Traubenkernöl	5,9%	4,0%	19,3%	61,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%
27	Walnußöl	6,6%	2,4%	13,8%	55,3%	10,9%	0,0%	0,0%	0,0%	11,0%
28	Orangenketon/AME	8,1%	3,6%	45,6%	28,8%	4,5%	0,4%	0,0%	0,0%	8,9%
29	Rizinusöl/AME	8,1%	3,8%	44,8%	27,7%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	10,8%
30	Styropor/AME	7,9%	3,5%	45,2%	27,3%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	11,3%
31	Synthetik I	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	98,8%
32	Synthetik II	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
36	Purgiernuß (Nicaragua)	9,7%	7,6%	52,4%	22,3%	3,3%	0,0%	0,0%	0,0%	4,6%
37	Purgiernuß (Mali)	7,6%	8,2%	53,9%	18,4%	5,9%	0,0%	0,0%	0,0%	6,0%
39	HO Sonne I	2,5%	2,2%	47,3%	44,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%
40	HO Sonne II	1,8%	2,0%	43,2%	48,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,9%
38	Sommerdiesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
1	Winterdiesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
42	TME	28,1%	18,4%	40,9%	8,6%	1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%

	Öl-Art	Dichte [kg/l]	Heizwert [MJ/kg]	Viskosität [mm ² /s]	Koksrückstand [Mass.-%]	Schmutz [mg/kg]	Säurezahl [mg KOH/g]	Asche [Mass.-%]	Jodzahl [g/100g]	Phosphor [mg/kg]
2	AME	0,883	37,2	5,4	0,07	30,4	0,97	0,001	100	0
3	Biodiesel	0,880	37,5	4,8	0,11	30,8	1,11	0,002	107	0
4	EME I	0,878	37,6	4,9	0,02	32,4	0,97	0,000	88	0
5	EME II	0,885	37,1	4,7	0,03	48,0	1,93	0,000	71	0
6	Distelöl I	0,923	37,1	32,3	0,61	62,4	0,56	0,004	137	1
7	Distelöl II	0,917	37,1	41,2	0,43	29,2	0,55	0,001	90	1
8	Erdnußöl	0,917	37,1	41,2	0,43	29,2	0,55	0,001	90	1
9	Euphorbia-lathyris-Öl	0,918	36,8	43,7	0,89	39,6	9,99	0,032	84	66
10	Hanföl	0,926	37,5	29,3	0,60	111,6	2,63	0,010	149	22
11	Lackleinöl	0,929	37,1	27,6	0,79	56,4	0,94	0,008	174	21
12	Leindotteröl	0,923	37,0	31,1	0,68	42,0	6,56	0,004	150	6
13	Keimöl	0,921	37,0	34,1	0,75	68,0	0,69	0,002	122	0
14	Olivenöl	0,913	37,2	40,4	0,65	40,8	2,08	0,001	83	2
15	Pflanzenölmix	0,914	37,7	31,6	0,34	75,6	74,37	0,001	113	106
16	Rapsöl I	0,917	37,6	36,2	1,04	110,8	1,37	0,005	112	7
17	Rapsöl II	0,918	37,6	36,7	0,70	32,4	1,66	0,007	106	11
18	Safflor	0,923	37,4	31,3	0,59	26,0	15,51	0,030	133	39
19	Senföl	0,911	37,8	46,1	0,34	36,4	1,11	0,007	86	2
20	Soja	0,922	37,4	32,7	0,52	142,4	0,42	0,004	128	1
21	Sonne I	0,918	37,6	35,8	0,41	255,9	7,14	0,016	100	28
22	Sonne II	0,914	37,7	40,0	0,39	111,0	9,50	0,013	86	9
23	Sonne III	0,915	37,7	38,5	0,56	45,2	3,03	0,019	82	19
24	Sonne IV	0,915	37,7	41,7	0,30	52,0	0,83	0,007	83	2
25	Sonne V	0,922	38,2	33,2	0,46	128,8	0,83	0,009	128	2
26	Traubenkernöl	0,922	37,4	32,6	2,27	71,2	0,56	0,001	132	3
27	Walnußöl	0,923	37,4	30,7	2,33	81,2	1,24	0,004	146	1
28	Orangenketon/AME	0,880	37,4	4,5	0,06	17,2	1,26	0,001	127	2
29	Rizinusöl/AME	0,892	37,2	7,1	0,09	51,2	0,97	0,004	97	1
30	Styropor/AME	0,886	37,3	7,0	0,07	114,4	1,26	0,005	99	1
31	Synthetik I	0,945	32,7	16,0	0,09	34,4	0,70	0,002	0	1
32	Synthetik II	0,928	34,2	20,3	0,12	25,0	0,69	0,002	0	0
36	Purgiernuß (Nicaragua)	0,912	37,2	35,7	0,29	830,9	2,21	0,006	91	5
37	Purgiernuß (Mali)	0,915	37,7	34,3	0,38	824,5	11,47	0,022	94	20
39	HO Sonne I	0,915	37,1	36,3	0,25	145,1	8,74	0,004	93	1
40	HO Sonne II	0,915	37,7	38,2	0,24	109,3	8,78	0,012	78	12
38	Sommerdiesel	0,827	42,4	2,7	0,04	7,2	0,96	0,002	1	0
1	Winterdiesel	0,822	42,5	2,4	0,08	11,9	0,97	0,001	1	0
42	TME	0,876	37,0	4,3	0,03	305,0	0,23	0,039	97	0

	Öl-Art	Naphthalin [µg/m3]	Acenaphthylen [µg/m3]	Acenaphthen [µg/m3]	Fluoren [µg/m3]	Phenanthren [µg/m3]	Anthracen [µg/m3]	Fluoranthren [µg/m3]	Pyren [µg/m3]
2	AME	0,00	0,05	0,00	0,01	0,35	0,01	0,14	0,26
3	Biodiesel	0,00	0,02	0,00	0,00	0,14	0,01	0,08	0,13
4	EME I	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,24	0,00	0,14	0,23
5	EME II	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,26	0,00	0,15	0,23
6	Distelöl I	n.a.	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,12	0,17
7	Distelöl II	n.a.	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,12	0,18
8	Erdnußöl	n.a.	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,09	0,12
9	Euphorbia-lathyris-Öl	n.a.	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,03
10	Hanföl	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,07
11	Lackleinöl	0,00	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,21
12	Leindotteröl	n.a.	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,06	0,08
13	Keimöl	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,06	0,05
14	Olivenöl	0,00	0,02	0,00	0,00	0,13	0,00	0,15	0,22
15	Pflanzenölmix	0,00	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,12	0,20
16	Rapsöl I	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,05	0,08
17	Rapsöl II	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,11	0,17
18	Saflor	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,12	0,00	0,15	0,24
19	Senföl	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,00	0,07	0,11
20	Soja	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,13	0,00	0,15	0,22
21	Sonne I	n.a.	0,02	0,01	0,00	0,12	0,00	0,13	0,18
22	Sonne II	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,08	0,00	0,12	0,18
23	Sonne III	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,12	0,17
24	Sonne IV	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,13	0,00	0,17	0,24
25	Sonne V	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,15	0,00	0,16	0,21
26	Traubenkernöl	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,18	0,00	0,19	0,28
27	Walnußöl	n.a.	0,03	0,03	0,01	0,08	0,00	0,12	0,20
28	Orangenketon/AME	0,00	0,03	0,00	0,00	0,37	0,01	0,24	0,35
29	Rizinusöl/AME	n.a.	0,04	0,00	0,00	0,28	0,00	0,23	0,33
30	Styropor/AME	n.a.	0,03	0,03	0,01	0,21	0,00	0,17	0,24
31	Synthetik I	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,11	0,00	0,12	0,18
32	Synthetik II	n.a.	0,03	0,00	0,00	0,10	0,00	0,13	0,19
36	Purgiernuß (Nicaragua)	0,00	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,11	0,18
37	Purgiernuß (Mali)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,14	0,00	0,12	0,20
39	HO Sonne I	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,00	0,07	0,11
40	HO Sonne II	n.a.	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,15	0,23
38	Sommerdiesel	0,00	0,10	0,00	0,01	0,68	0,02	0,28	0,47
1	Winterdiesel	n.a.	0,07	0,00	0,00	0,76	0,02	0,38	0,55
42	TME	0,06	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00	0,03	0,00

	Öl-Art	Benz(a)anthracen [µg/m ³]	Chrysen [µg/m ³]	Benzo(b)fluoranthen [µg/m ³]	Benzo(k)fluoranthen [µg/m ³]	Benzo(e)pyren [µg/m ³]
2	AME	0,004	0,011	0,00	0,00	0,00
3	Biodiesel	0,000	0,006	0,00	0,00	0,00
4	EME I	0,000	0,011	0,00	0,00	0,00
5	EME II	0,000	0,010	0,00	0,00	0,00
6	Distelöl I	0,000	0,010	0,00	0,00	0,00
7	Distelöl II	0,015	0,014	0,02	0,02	0,02
8	Erdnußöl	0,000	0,000	0,00	0,00	0,01
9	Euphorbia-lathyris-Öl	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
10	Hanföl	0,000	0,000	0,02	0,03	0,04
11	Lackleinöl	0,013	0,014	0,01	0,01	0,02
12	Leindotteröl	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
13	Keimöl	0,012	0,000	0,05	0,06	0,06
14	Olivenöl	0,000	0,013	0,00	0,00	0,00
15	Pflanzenölmix	0,011	0,000	0,01	0,01	0,01
16	Rapsöl I	0,005	0,006	0,00	0,00	0,00
17	Rapsöl II	0,000	0,010	0,00	0,00	0,00
18	Saflor	0,020	0,014	0,02	0,02	0,03
19	Senföl	0,005	0,005	0,00	0,00	0,01
20	Soja	0,010	0,012	0,00	0,00	0,00
21	Sonne I	0,010	0,010	0,00	0,00	0,01
22	Sonne II	0,000	0,000	0,01	0,00	0,01
23	Sonne III	0,000	0,000	0,00	0,00	0,01
24	Sonne IV	0,000	0,011	0,00	0,00	0,00
25	Sonne V	0,012	0,013	0,00	0,00	0,00
26	Traubenkernöl	0,010	0,010	0,00	0,00	0,01
27	Walnußöl	0,010	0,010	0,00	0,00	0,00
28	Orangenketon/AME	0,000	0,014	0,00	0,00	0,00
29	Rizinusöl/AME	0,017	0,014	0,00	0,00	0,01
30	Styropor/AME	0,000	0,000	0,00	0,00	0,01
31	Synthetik I	0,000	0,010	0,00	0,00	0,00
32	Synthetik II	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
36	Purgiernuß (Nicaragua)	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
37	Purgiernuß (Mali)	0,011	0,013	0,00	0,00	0,01
39	HO Sonne I	0,005	0,007	0,01	0,01	0,01
40	HO Sonne II	0,011	0,011	0,01	0,01	0,02
38	Sommerdiesel	0,013	0,033	0,00	0,00	0,00
1	Winterdiesel	0,011	0,034	0,00	0,00	0,00
42	TME	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00

	Öl-Art	Benzo(a)pyren [µg/m ³]	Perylen [µg/m ³]	Indeno[1,2,3-cd]pyren [µg/m ³]	Dibenz(ah)anthracen [µg/m ³]	Benzo(ghi)perylen [µg/m ³]	Coronen [µg/m ³]
2	AME	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Biodiesel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	EME I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	EME II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Distelöl I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	Distelöl II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
8	Erdnußöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	Euphorbia-lathyris-Öl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	Hanföl	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,03
11	Lackleinöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	Leindotteröl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	Keimöl	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,12
14	Olivenöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	Pflanzenölmix	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	Rapsöl I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	Rapsöl II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	Saflor	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02
19	Senföl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	Soja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	Sonne I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	Sonne II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	Sonne III	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	Sonne IV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	Sonne V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	Traubenkernöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	Walnußöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	Orangenketon/AME	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	Rizinusöl/AME	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	Styropor/AME	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	Synthetik I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	Synthetik II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	Purgierruß (Nicaragua)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	Purgierruß (Mali)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	HO Sonne I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	HO Sonne II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
38	Sommerdiesel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	Winterdiesel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
42	TME	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Freising/Weihenstephan, 20.02.2001

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff