

# MATERIALIEN

---

Umwelt & Entwicklung Bayern

## Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

### Teil 1



Bayerisches Staatsministerium für  
Landesentwicklung und Umweltfragen



# MATERIALIEN

---

Umwelt & Entwicklung Bayern

## Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen -  
Literatur- und Technologieübersicht,  
Datenbank

---

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

- Juni 2002 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: TU München - Weihenstephan  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Vorstand: Prof. Dr. Dr.h.c. H. Schön

Projektleiter: Dr. B. A. Widmann  
Projektbearbeiter  
und Autoren: Dipl.-Ing.agr. K. Thuneke  
Dr. C. Kern

Auftraggeber: Bayerisches 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**

<b>1</b>	<b>Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Merkmale relevanter Pflanzenöle.....</b>	<b>4</b>
2.1	Vorgehen .....	4
2.2	Chemischer Aufbau und Eigenschaften pflanzlicher Öle und Fette.....	4
2.2.1	Aufbau .....	4
2.2.2	Eigenschaften .....	8
2.3	Chemische und physikalische Kenngrößen pflanzlicher Öle und Fette ....	9
2.3.1	Fettchemische Kenngrößen.....	9
2.3.2	Umsetzungsvorgänge in pflanzlichen Ölen.....	12
2.3.3	Physikalische Kenngrößen .....	13
2.4	Datenbank zu Inhaltsstoffen und Kenngrößen relevanter Pflanzenöle ...	24
<b>3</b>	<b>Technologieübersicht: Pflanzenöлтаugliche Verbrennungsmotoren.....</b>	<b>29</b>
3.1	Vorgehen .....	29
3.2	Verbrennungsverfahren .....	29
3.3	Pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren mit Vor- bzw. Wirbelkammerverfahren ...	31
3.4	Pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren mit Direkteinspritzung .....	33
3.5	Umrüstung von Serienmotoren für Pflanzenölbetrieb .....	36
3.6	Übersicht pflanzenöлтаuglicher BHKW .....	40
3.7	Übersicht Hersteller und Umrüster pflanzenöлтаuglicher Motoren .....	41
<b>4</b>	<b>Systeme zur Abgasnachbehandlung.....</b>	<b>44</b>
4.1	Abgasrückführung.....	44
4.2	Oxidationskatalysator.....	45
4.3	Denox-Katalysator.....	48
4.4	Partikelfilter .....	50
4.5	Kombinationen von Abgasreinigungssystemen .....	51
4.6	Anbieter von Abgasreinigungsanlagen .....	54

<b>5</b>	<b>Abgasemissionen.....</b>	<b>56</b>
5.1	Grundlagen der Verbrennung .....	56
5.2	Entstehung von Abgasemissionen.....	58
5.3	Zusammensetzung der Abgase .....	63
5.4	Einflussparameter von Dieselkraftstoff auf die Emissionen .....	65
5.5	Immissionsschutz.....	69
<b>6</b>	<b>Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren .....</b>	<b>74</b>
6.1	Vorgehen .....	74
6.2	Ergebnisse der Recherchen.....	74
6.2.1	Abgasemissionen beim Einsatz von Pflanzenöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff .....	74
6.2.2	Emissionen von BHKW-Motoren .....	85
<b>7</b>	<b>Bewertung der Untersuchungsergebnisse, Schlussfolgerungen .....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>Handlungsbedarf und weiteres Vorgehen .....</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>96</b>
<b>10</b>	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>99</b>

## 1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der Möglichkeiten zur Substitution fossiler Energieträger spielen Kraftstoffe auf Pflanzenölbasis, sei es durch Umesterung oder Raffinerieverfahren in umgewandelter Form in konventionellen Motoren oder in naturbelassenem Zustand in pflanzenöltauglichen Motoren, eine immer größere Rolle.

Durch die Verwendung von naturbelassenem Pflanzenöl als Kraftstoff in pflanzenöltauglichen Dieselmotoren wird ein Beitrag zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Eintrages in die Atmosphäre geleistet. Neben der Haupt-Emissionskomponente CO<sub>2</sub> sind jedoch Schadstoffe wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide, SO<sub>x</sub> und krebserregende Stoffe, die eine Schädigung der Umwelt bzw. der Gesundheit des Menschen nach sich ziehen können, von besonderem Interesse. Diese Stoffe müssen daher im Sinne der Luftreinhaltung minimiert werden.

Aufgrund eines hohen Gesamtwirkungsgrades und der Möglichkeit der Stromeinspeisung in das Elektrizitätsnetz werden in zunehmendem Maße Blockheizkraftwerke (BHKW) zur dezentralen Wärme- und Stromversorgung genutzt. Als Aggregate kommen häufig Dieselmotoren zum Einsatz, die keine zusätzlichen Umwandlungsprozesse für die Stromerzeugung erfordern (Dampferzeugung usw.) und im Vergleich zu Turbinen besser an einen wechselnden Leistungsbedarf angepasst werden können.

Als Einflussmöglichkeiten auf die Emissionen von Dieselmotoren sind die *Eigenschaften und Inhaltsstoffe* des Kraftstoffes, die *Motoren- und Verbrennungstechnologie*, der *Betriebszustand* sowie dem Motor nachgeschaltete *Abgasreinigungssysteme* zu nennen (vgl. Abbildung 1).

Speziell für naturbelassenen Pflanzenöl-Kraftstoff können sich aus den Inhaltsstoffen und ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften (z.B. Fettsäurezusammensetzung, Viskosität, Zündwilligkeit, Gesamtverschmutzung, Iodzahl, Wassergehalt) unterschiedliche Auswirkungen auf die Emissionen ergeben. Auch Brennraumgestaltung und Einspritztechnologie der pflanzenöltauglichen Motoren sowie die Veränderung von Verdichtungsverhältnis und Zündzeitpunkt können die

Zusammensetzung des Abgases entscheidend beeinflussen. Daneben spielt der Betriebszustand (Drehzahl/Last-Verhältnis, Kalt-/Warmlaufphase) eine wichtige Rolle. In Bezug auf die Abgasreinigung hat sich herausgestellt, dass Pflanzenölkraftstoffe aufgrund ihres im Vergleich zu Dieselmotoren niedrigen Schwefelgehaltes besonders gut für den Betrieb von Motoren mit Abgas-Katalysatoren geeignet sind (Schwefel vermindert die Umsetzungsrate und kann durch katalytische Umsetzung die Partikelmasse erhöhen [25]). Für BHKW-Motoren eröffnet sich zusätzlich die Möglichkeit, neben diesen Oxidationskatalysatoren auch moderne Systeme zur Verminderung der Partikel- und NO<sub>x</sub>-Emissionen einzusetzen (Partikelfilter und Denox-Katalysatoren), die bislang im Kfz-Bereich noch wenig Verwendung finden.

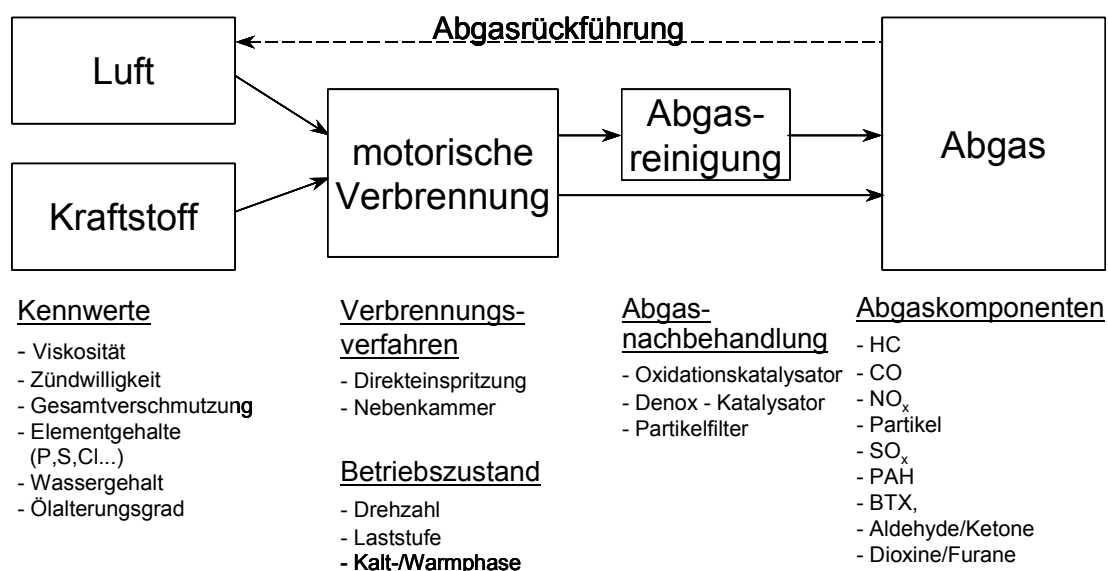


Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung von Abgasemissionen

Ziel des Vorhabens ist es, die Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Pflanzenölen, die eine Auswirkung auf den Verbrennungsablauf der damit betriebenen Dieselmotoren haben können, zusammenzustellen, Art und Stärke dieses Einflusses, soweit bekannt, darzustellen und den derzeitigen Stand der Motorentechnik für pflanzenölbetriebene BHKW-Motoren sowie die verfügbaren Abgasreinigungssysteme zu dokumentieren. Aus Literaturangaben zu bisherigen Untersuchungen soll das Abgasemissionsverhalten bei der Verwendung von Pflanzenöl als Moto-

rentreibstoff beschrieben sowie Zusammenhänge zwischen Kraftstoffeigenschaften und der Bildung von Schadstoffen dargestellt werden. Schließlich sollen die Ergebnisse bewertet, Kenntnislücken aufgezeigt und der künftige Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Der vorliegende Bericht wurde in einer ursprünglichen Fassung im Dezember 1998 erstellt. Aufgrund der sich deutlich verbesserten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen seit der Initiierung dieses Projektes und einer zunehmenden Nachfrage nach dieser Technologie, wurde nach Abschluss des Nachfolgeprojektes *„Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke, Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung“* auf Vorschlag des Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) dieser Bericht überarbeitet und aktualisiert. Das Kapitel 6 *„Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren“* bezieht sich dabei weiterhin auf die im Dezember 1998 abgeschlossene Literaturrecherche.



## 2 Merkmale relevanter Pflanzenöle

### 2.1 Vorgehen

Art und Qualität des Kraftstoffs haben einen wesentlichen Einfluss auf die dieselmotorische Verbrennung. Deshalb werden zunächst Pflanzenöle hinsichtlich Zusammensetzung, Kenngrößen und Eigenschaften näher charakterisiert. Die Recherche stützt sich auf Angaben und Ergebnisse bisheriger Arbeiten und beinhaltet ein Literaturstudium mit Hilfe einer Datenbank der Arbeitsgruppe „Pflanzenöle“ der Landtechnik Weihenstephan, die derzeit mehr als 5000 Literaturstellen zum Thema Pflanzenöl umfasst.

### 2.2 Chemischer Aufbau und Eigenschaften pflanzlicher Öle und Fette

#### 2.2.1 Aufbau

Pflanzliche Öle bzw. Fette bestehen vorwiegend aus Triglyceriden. Die Unterscheidung zwischen Ölen und Fetten wird lediglich durch ihren Aggregatzustand bei Zimmertemperatur bestimmt. Glyceride sind Ester aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin und in der Regel drei Fettsäuren (Triglyceride), in seltenen Fällen auch ein bis zwei Fettsäuren (Mono- und Diglyceride). Letztere stellen jedoch bereits Spaltprodukte dar. Das Schema eines Triglycerids ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die **Fettsäuren** (Carbonsäuren) bestehen aus Kohlenstoffketten mit gerader Anzahl an Kohlenstoffatomen und werden durch die Fettsäurebiosynthese der Pflanzen gebildet, in der nur Kohlenstoff-Zweiergruppen zusammengebaut werden. Die am häufigsten vorkommenden Fettsäuren in Ölsaaten oder Ölfrüchten unserer Breiten haben 16 oder 18 Kohlenstoffatome. Die Kohlenstoffatome sind jeweils an das benachbarte C-Atom gebunden. Damit sind zwei der vier Bindungsstellen belegt. Ist an den beiden anderen Bindungsstellen jeweils ein Wasserstoffatom gebunden („gesättigt“), so liegt eine Einfachbindung zwischen den C-Atomen vor. Daneben treten jedoch auch Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen

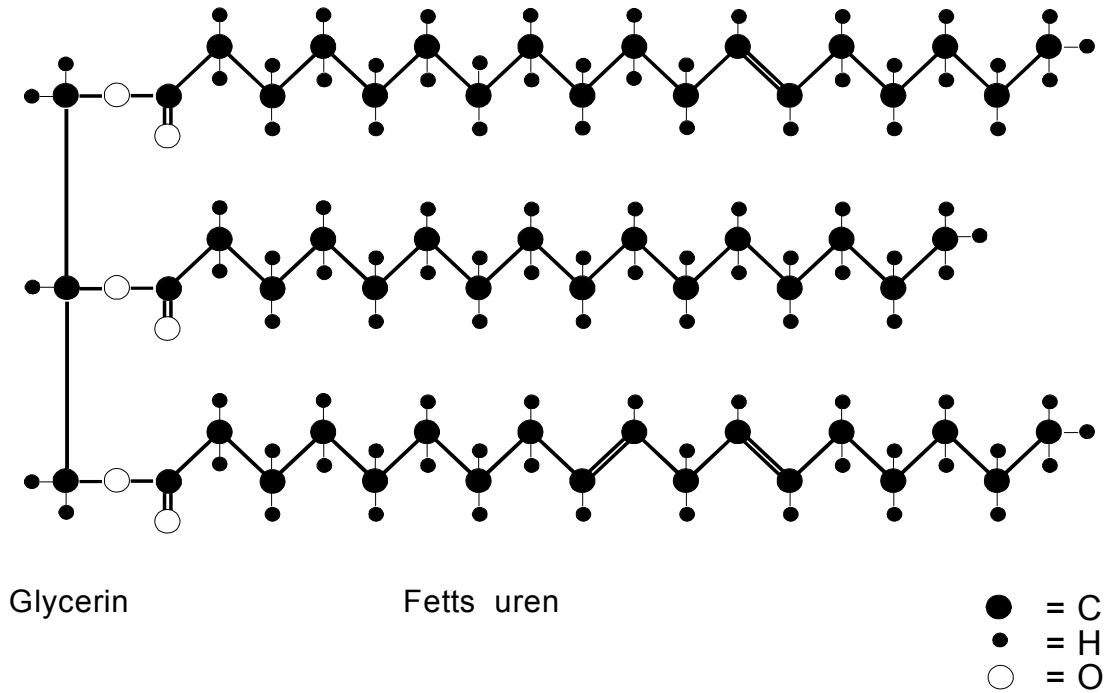


Abbildung 2: Aufbau eines Triglycerids

auf, wobei dann nur eine freie Bindungsstelle mit Wasserstoff gesättigt ist („unge-sättigt“). Fettsäuren ohne Doppelbindungen werden als gesättigte Fettsäuren, solche mit einer oder mehreren Doppelbindungen als einfach oder mehrfach un-gesättigte Fettsäuren bezeichnet. Fettsäuren unterscheiden sich also nach der Kettenlänge und nach dem Grad der Sättigung. Die Anteile der vorkommenden Fettsäuren an der gesamten Fettsäuremenge in einer Ölsaart, Ölfrucht, in einem Fett oder Öl ist weitgehend genetisch fixiert und wird als Fettsäurezusammen-setzung oder Fettsäuremuster bezeichnet (Tabelle 1).

Darüber hinaus können die Fettsäuren in unterschiedlicher Reihenfolge am Glyce-rin angeordnet sein. Neben den in Triglyceriden gebundenen Fettsäuren können auch sogenannte freie Fettsäuren in pflanzlichen Ölen und Fetten vorkommen; sie sind jedoch wie Di- und Monoglyceride in der Regel bereits Spaltprodukte des Fettabbaus (siehe Neutralisationszahl).

Tabelle 1: Fettsäuremuster wichtiger pflanzlicher Öle und Fette [5], [36], [92]

Fett/Öl	C8:0 <sup>1)</sup> Caprylsäure	C10:0 Caprinsäure	C12:0 Laurinsäure	C14:0 Myristinsäure	C16:0 Palmitinsäure	C16:1 Palmitoleinsäure	C18:0 Stearinsäure	C18:1 Ölsäure	C18:2 Linolinsäure	C18:3 Linolensäure	C20:0 Arachinsäure	C20:1& C20:2 Eicosens. Arachidons.	C22:0 Behensäure	C22:1 Eruca-säure
Rapsöl (00-Qualität)					4		1,5	63	20	9	0,5	1		0,5
Sonnenblumenöl					6,5		5	23	63	< 0,5	0,5	1		
Leinöl					6,5		3,5	18	14	58				
Leindotteröl					6,1	0,2	4,3	17,8	18,2	36,9	1,7			
Sojaöl					10		5	21	53	8	0,5	0,5		
Olivenöl					11,5	1,5	2,5	75,5	7,5	1,0	0,5			
Saffloröl					6		2,5	12	78	0,5	0,5	0,5		
Weizenkeimöl					17		1	20	52	10				
Maiskeimöl					10,5	0,5	2,5	32,5	52	1	0,5			
Kürbiskernöl					16	0,5	5	24	54	0,5				
Korianderöl								78,5	16,7	0,8		4,0		
Euphorbia lathyris-Öl					7		2	84	3	3		1		
Hanfsaatöl					4,5-10			6-20	14-28	14-28				
Sesamöl					8,5		4,5	42	44,5		0,5			
Walnußöl					8		2	16	59	12	1			
Mohnöl					9,5		2	10,5	76	1				
Erdnußöl					10		3	41	35,5		1,5	1	3	
Kakaobutter					25		37	34	3					
Baumwollsaatöl				1,5	22	1,5	5	16	55		1			
Palmöl				1	43,8	0,5	5	39	10	0,2	0,5			
Palmkernfett	6	4	47	16	8		2,5	14	2,5					
Kokosfett	8	6	47	18	9		2,5	7	2,5					

<sup>1)</sup> CX:Y = Fettsäure mit X Kohlenstoffatomen und Y Doppelbindungen

Nach dem Fettsäuremuster lassen sich Fette und Öle in folgende Gruppen einteilen:

- hoher Gehalt an gesättigten Fettsäuren (z.B. Kokosfett)
- hoher Gehalt an einfach ungesättigten Fettsäuren (Monoensäuren, z.B. Erdnussöl, Olivenöl, Rapsöl)
- hoher Gehalt an zweifach ungesättigten Fettsäuren (Diensäuren, z.B. Baumwollsaamenöl, Sojabohnenöl, Maiskeimöl, Sonnenblumenöl, Saffloröl)
- hoher Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Polyensäuren, z.B. Leinöl)

Neben den Glyceriden sind in den Fetten und Ölen einige Fettbegleitstoffe, wie zum Beispiel Phospholipide, Tocopherole, Wachse oder Chlorophylle enthalten; nur die Wichtigsten seien hier genannt.

**Phospholipide** sind eine vielfältige Stoffgruppe, zu der auch das Lecithin zählt. Sie wirken im Samen stabilisierend auf das als Energiereserve gespeicherte Öl. In gewonnenen Pflanzenölen setzen sie jedoch die Oxidationsstabilität herab und verursachen vor allem in technischen Prozessen Störungen durch die Hydratisierbarkeit (Quellung mit Wasser) der meisten Phospholipide. Deshalb sollte der Phosphorgehalt technisch genutzter Öle so niedrig wie möglich sein (derzeit empfohlener maximaler Grenzwert für Rapsölkraftstoffe: 15 mg/kg [66]).

**Kohlenwasserstoffe** wie Aliphate und Terpenoide kommen in Fetten natürlicherweise vor. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) entstehen bei der Verbrennung von organischem Material. Eine Kontamination kann erfolgen durch Fall-out z.B. in Industriegebieten oder durch direkte Trocknung der Ölsaaten mit Verbrennungsabgasen [5].

**Sterine** stellen den Hauptanteil des „Unverseifbaren“ an Fetten dar. Sie sind polyzyklische Alkohole und leiten sich vom Steran ab. Das bekannteste Sterin ist Cholesterin. Der in pflanzlichen Fetten enthaltene Anteil an Cholesterin ist mit <50 ppm anzusetzen. Pflanzliche Fette gelten damit nach Übereinkunft als „cholesterinfrei“.

**Lipochrome** wie Carotinoide und Chlorophyll sind u.a. die natürlichen Farbstoffe der Pflanze. Carotinoide lassen sich durch hydrolytische Spaltung in Vitamin A umwandeln.

**Tocopherole (Vitamin E)** liegen in zahlreichen Verbindungen vor und stellen einen natürlichen Oxidationsschutz der Öle dar.

### 2.2.2 Eigenschaften

Die Zusammensetzung pflanzlicher Öle und Fette, vor allem die oben beschriebene Fettsäurezusammensetzung, bestimmt wesentlich die chemischen und physikalischen Eigenschaften:

- Öle sind wasserunlöslich.
- Wasser ist grundsätzlich nur in geringem Maße in Fetten und Ölen löslich. Öle mit kurzkettigen Fettsäuren weisen eine stärkere Löslichkeit von Wasser auf. Liegen in Ölen Hydroxygruppen (z.B. Rizinusöl) vor, steigt die Löslichkeit für Wasser stark an. Bei 20 °C lösen sich etwa 0,1 % Wasser im Fett, wobei die Löslichkeit mit der Temperatur zunimmt.
- Öle sind löslich in Petrolether, Hexan, Benzol, Trichlorethylen, Tetrachlorkohlenstoff und anderen lipophilen Lösungsmitteln.
- ein hoher Anteil ungesättigter Fettsäuren im Öl hat einen niedrigen Schmelzpunkt zur Folge, d.h. Öle mit einem hohen Anteil ungesättigter Fettsäuren sind bei Zimmertemperatur flüssig, mit einem hohen Anteil gesättigter Fettsäuren halbfest oder fest.
- Öle mit einem hohen Anteil gesättigter Fettsäuren sind an der Luft relativ beständig. Autoxidation durch den Einfluss von Licht, Luft, Wasser, Wärme und Mikroorganismen führt zur Bildung von Peroxiden, Aldehyden, Ketonen und Säuren, es schließen sich Isomerisierungs- und Polymerisationsvorgänge an. Dem „Trocknen“ oder „Verharzen“ liegt die sekundäre Knüpfung von C—C- und C—O—C-Bindungen zugrunde. Pflanzenöle neigen weniger zur Autoxidation als tierische Öle, da Pflanzenöle einen höheren Anteil antioxidativ wirkender Tocopherole aufweisen. Nach der „Verharzungsneigung“ werden Öle in trocknende, halbtrocknende und nicht trocknende Öle eingeteilt. Im technischen Bereich werden trocknende Öle zur Gewinnung von Firnissen, Lacken und Dickölen verwendet, im Lebensmittelbereich zur Geschmacksveredlung und zur Herstellung von Emulgatoren eingesetzt.
- Mit Hilfe von Katalysatoren können ungesättigte Fettsäuren Wasserstoff anlagern. Der Vorgang wird als Fetthärtung bezeichnet.

## 2.3 Chemische und physikalische Kenngrößen pflanzlicher Öle und Fette

### 2.3.1 Fettchemische Kenngrößen

Die **Elementarzusammensetzung** wichtiger Pflanzenöle ist in Tabelle 2 zusammengestellt. Wie schon erwähnt, ist das **Fettsäuremuster** eines der entscheidenden Kriterien zur Charakterisierung pflanzlicher Öle und Fette (siehe Kapitel 2.2 und Tabelle 1).

Tabelle 2: Elementarzusammensetzung wichtiger Pflanzenöle  
(nach APFELBECK 1988)

	<b>Kohlenstoff C</b> [%]	<b>Wasserstoff H</b> [%]	<b>Sauerstoff O</b> [%]
Rapsöl	77,7	12,0	10,9
Sonnenblumenöl	77,6	11,7	11,1
Sojaöl	77,8	11,8	10,7

Die **Neutralisationszahl** (Säurezahl) ist ein Maß für den Gehalt an freien Fettsäuren im Pflanzenöl oder Fettsäuremethylester (FAME) und beschreibt die Menge Kalilauge, die für die Neutralisation der freien Fettsäuren erforderlich ist. Die Säurezahl ist stark vom Raffinationsgrad und dem Alterungsgrad des Öles abhängig. Durch Wasser im Öl sowie Mikroorganismen und Enzyme kann eine hydrolytische Spaltung der Triglyceride auftreten und zu einem Anstieg der Neutralisationszahl führen. Saure Verbindungen im Kraftstoff führen zu Korrosion, Verschleiß und Rückstandsbildung im Motor. Freie Fettsäuren können außerdem mit basischen Komponenten des Motorenöls reagieren und dessen Schmierfähigkeit beeinträchtigen.

Die **Iodzahl** ist ein Maß für die Anzahl an Doppelbindungen. Sie gibt an, wie viel Gramm Jod von 100 g Öl gebunden werden. Je niedriger die Iodzahl ist, desto höher ist der Sättigungsgrad des Pflanzenöls. Die Iodzahl ist somit zur Charakterisierung von Pflanzenölen (z.B. Abgrenzung zwischen Rapsöl und Sonnenblumen-

öl) geeignet. Sie gibt außerdem Aufschluss über die mögliche Bildung von Ablagerungen an Einspritzdüsen und im Brennraum, über die Lagerfähigkeit und insbesondere über die Neigung des Öles zu verharzen (z. B. Leinöl). Bei Rapsöl kann die Iodzahl sorten- und standortbedingt von ca. 100 bis 120 g/100 g schwanken [93]. Die Iodzahl von Sonnenblumenöl liegt bei ca. 132 g/100 g. Bei Werten über 120 g/100 g können verstärkt Verkokungen auftreten.

Die **Verseifungszahl** beschreibt die Menge Kalilauge in Milligramm, welche zur Neutralisation der freien Säuren und zur Hydrolyse der Ester von 1 Gramm Öl erforderlich ist. Bei Ölen mit einem hohen Anteil an niedrigen Fettsäuren als Esterkomponenten treten hohe Verseifungszahlen auf und umgekehrt. Die Verseifungszahl ist seitens der Motorentechnik nicht interessant. Mit der Iodzahl und der Neutralisationszahl werden die Auswirkungen auf die Lagerfähigkeit bereits in ausreichendem Maße beschrieben.

Unter dem **unverseifbaren Anteil** ist der nach Verseifen mit Benzin oder Äther extrahierbare Anteil eines Öles zu verstehen. Bei pflanzlichen Fetten besteht dieser im Wesentlichen aus verschiedenen Phytosterinen.

**Tocopherole** (Vitamin E) liegen in zahlreichen Verbindungen vor und sind natürliche Antioxidantien, wirken sich also positiv auf die Haltbarkeit der Öle aus.

Die **Peroxidzahl** ist ein Maß für den Gehalt an peroxidisch gebundenen Sauerstoff im Öl. Sie spiegelt den Verdorbenheitsgrad (Ranzidität) eines Öls wider und ist gleichzeitig Indiz für den Wirkungsverlust fetteigener Antioxidantien. Während des oxidativen Verderbs des Öls steigt die Peroxidzahl zunächst an und fällt nach Erreichen des Maximumwerts wieder ab, was die Interpretation des Messwerts erschwert. Aus Praxiserfahrungen geht hervor, dass die Lagerungsbedingungen und insbesondere der oxidative Fettverderb eine große Rolle für die Betriebssicherheit der Motoren spielen können. Bei der Lagerung werden unter Sauerstoffzutritt Peroxide gebildet [93]. Viskositätserhöhungen und Verharzungen können die Folge sein (siehe Kap. 2.3.2). Zudem gibt es Hinweise, dass oxidativ geschädigte Pflanzenöle verstärkt zur Schmieröleindickung und damit zu Motorschäden führen können. Der oxidative Verderb wird durch das Vorhandensein von Sauer-

stoff, Licht und hohen Temperaturen sowie katalytisch wirkenden Metallen gefördert.

Wichtige fettchemische Kennzahlen von Pflanzenölen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Wichtige fettchemische Kennzahlen einiger Pflanzenöle und -fette [5], [51], [76]

Öl/Fett	Iodzahl [g/100 g]	Verseifungs- zahl [mg KOH/g]	Unverseifbarer Anteil [%]	Gesamt- Tocopherol [mg/kg]
Rapsöl	102-112	188-193	0,5-1,5	800-1200
Sonnenblumenöl	ca. 132	ca. 190	0,4-1,4	500- 800
Leinöl	165-190	187-195	2,0	110- 280
Sojaöl	ca. 134	ca. 192	0,5-1,5	920-1800
Olivenöl	78- 90	187-196	1,5	30- 800
Hanföl	149-167	190-194	0,5-1,0	
Sesamöl	104-120	187-195	0,9-2,3	ca. 188
Erdnussöl	83-107	184-195	1,0	ca. 480
Palmöl	ca. 55	ca. 199	< 0,5	400-700
Palmkernfett	ca. 17	ca. 250	0,2-0,8	0
Kokosfett	ca. 9	ca. 256	0,1-0,6	ca. 80



### 2.3.2 Umsetzungsvorgänge in pflanzlichen Ölen

#### Fettspaltung (Hydrolyse, Lipolyse)

Fette und Öle sind gegen den alleinigen Angriff von Wasser sehr resistent. In Gegenwart von Enzymen (Lipasen) oder Mikroorganismen kann allerdings hydrolytische Spaltung eintreten. Dabei werden die Fettsäuren vom Glyceridmolekül abgespalten. Die mikrobielle Aktivität nimmt mit steigendem Wassergehalt zu oder wird erst möglich. Enzyme können zum einen aus dem Fett selbst stammen (Samen) oder von Mikroorganismen produziert werden. Hydrolytische Spaltung kann sowohl bei der Lagerung der Ölfrüchte und Ölsaaten als auch bei der Lagerung der Öle auftreten. Fettsäuren werden um so leichter abgespalten, je kürzer deren Kettenlänge ist. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt von Triglyceriden über Diglyceride zu Monoglyceriden ab.

#### Verseifung

Freie Fettsäuren können mit Alkali zu Seifen umgesetzt werden. Als Nebenreaktion wird auch ein Teil der Triglyceride verseift. Für analytische Zwecke werden Fettsäuren verseift, um den „Unverseifbaren Anteil“ zu bestimmen.

#### Autoxidation

Durch Sauerstoffzutritt, unterstützt von Licht und Wärme (Zufuhr von Energie) und durch katalytisch wirkende Schwermetallionen (z.B. Eisen, Kupfer) werden Öle und Fette oxidiert. Bei dieser radikalischen Kettenreaktion (Autoxidation) wird zunächst eine Alkyl-Gruppe angegriffen, daraufhin läuft eine Kettenreaktion ab, welche mit der Bildung einer in die Kette eingefügten Hydroperoxid-Gruppe endet. Die dabei entstehenden Hydroperoxide sind weitestgehend geschmacksneutral. Diese Hydroperoxide reagieren jedoch weiter zu Aldehyden, Ketonen und Fettsäuren, die wiederum Geschmack und Geruch beeinträchtigen können. In Pflanzenölen natürlich vorkommende Antioxidantien können Autoxidationsvorgänge weitestgehend unterbinden. Um Autoxidation zu vermeiden sollten die oben genannten Faktoren berücksichtigt werden. Die *Peroxidzahl* (s.o.) ist Maß für die durch Autoxidationsprozesse gebildete Menge an Peroxiden (Einbindung von

aktivem Sauerstoff). Sie spiegelt den Verderbenheitsgrad (Ranzidität) eines Öles wider und ist gleichzeitig Indiz für den Wirkungsverlust fetteigener Antioxidantien.

### **Polymerisierung**

Durch die oben genannten Umsetzungsvorgänge kann es zur Polymerisierung kommen. Dabei werden einzelne Molekülstücke miteinander neu verbunden und vernetzt. Die Viskosität erhöht sich deutlich und es kommt zur Verharzung durch komplexe Molekülverbindungen. Vor allem bei der Erhitzung von Fetten über 250 °C steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Fettsäuren (intermolekular) dimerisieren, also sich untereinander verbinden oder (intramolekular) zyklisieren, also in sich Ringstrukturen bilden. Neben dieser thermischen Polymerisation kann außerdem oxidative Polymerisation auftreten. Bei der Erhitzung von Fett oder Öl an der Luft werden einzelne Fettsäuremoleküle über Sauerstoffbrücken intermolekular oder intramolekular verknüpft. Bei der Abspaltung von Sauerstoff kann Zyklisierung, Dimerisierung oder Polymerisierung auftreten. Das Öl verfärbt sich dunkel, die Viskosität erhöht sich. Auswirkungen auf die Emissionen von Motoren sind wahrscheinlich.

### **2.3.3 Physikalische Kenngrößen**

Die **Dichte** von Pflanzenölen dient zur Ermittlung der Masse des Kraftstoffvolumens bei einer bestimmten Temperatur. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt, also zunehmender Kettenlänge, und steigender Anzahl an Doppelbindungen nimmt die Dichte zu. Bei einem eingestellten maximalen Einspritzvolumen eines Dieselmotors sinkt bei zunehmender Dichte der Kraftstoffverbrauch, gleichzeitig können sich Partikel- und Rußemissionen erhöhen. Die Dichte ist weitgehend genetisch fixiert, ist nur geringfügigen Schwankungen unterworfen und dient zur Unterscheidung verschiedener Pflanzenöle. Die Dichte (bei 15 °C) von Rapsöl beispielsweise beträgt 0,90 - 0,93 g/ml (in der Regel 0,918 - 0,922 g/ml).

Der **Heizwert** ist der Messwert für die Wärme (Energie), die bei der vollständigen Verbrennung pro Volumen oder Masse freigesetzt wird. Im Gegensatz zum oberen Heizwert schließt der für die motorische Verbrennung relevante untere Heiz-

wert ( $H_u$ ) die Energie, die bei der Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes freigesetzt wird, nicht mit ein. Bei Rapsöl beträgt der untere Heizwert mindestens 35 kJ/g.

In den DGF-Einheitmethoden [14] wird der **Rauchpunkt** definiert als „die niedrigste, in Grad Celsius angezeigte Temperatur, bei welcher über einer - unter definierten Bedingungen - erhitzten Probe eine deutlich sichtbare Rauchentwicklung beginnt“. Anhand des Rauchpunkts lässt sich auf die Anwesenheit von leicht flüchtigen Bestandteilen im Öl schließen.

Der **Flammpunkt** eines Stoffes beschreibt die Temperatur, bei der sich in einem geschlossenen Gefäß entflammbare Dämpfe bilden. Der Flammpunkt bestimmt die Einstufung von Flüssigkeiten in Gefahrenklassen nach der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) und ist somit entscheidend für die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen bei Lagerung und Transport. Darüber hinaus stellt der Flammpunkt bei Pflanzenöl ein Indiz für Verunreinigungen mit anderen Kraftstoffen dar, da bereits geringfügige Beimischungen von Kraftstoffen mit niedrigerem Flammpunkt (z.B. Dieselmotorkraftstoff, Biodiesel) Abweichungen vom charakteristischen Flammpunkt zur Folge haben.

Der **Brennpunkt** ist die niedrigste Temperatur, bei der das Öl nach kurzer Annäherung einer Flamme dauerhaft brennt.

Rauchpunkt, Flammpunkt und Brennpunkt sind abhängig vom Gehalt an freien Fettsäuren (Abbildung 3).

Bedingt durch die molekulare Struktur siedet Rapsöl erst bei einer Temperatur von etwa 300-320 °C. Bei Dieselmotorkraftstoff dagegen beginnen bereits ab etwa 150°C niedermolekulare Bestandteile zu verdampfen. Das Siedeende liegt einheitlich bei ca. 350 °C. Der hohe Siedepunkt von Pflanzenöl wird für die Motorölverdünnung verantwortlich gemacht, da anders als bei Dieselmotorkraftstoff, Kraftstoffbestandteile, die in das Motoröl gelangen nicht mehr über die Kurbelwellengehäuseentlüftung abdampfen können.

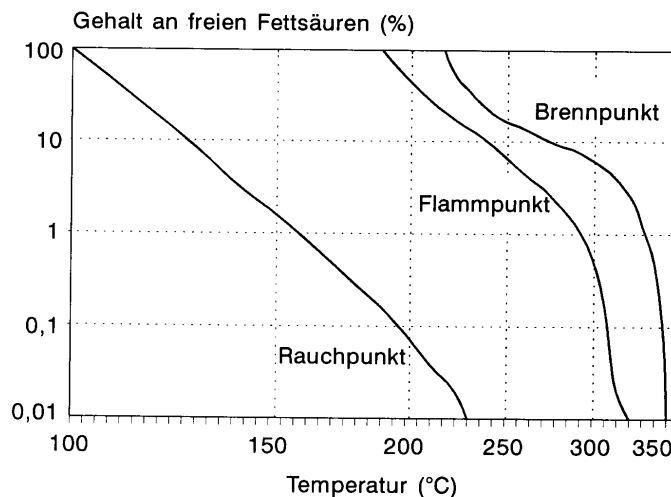


Abbildung 3: Abhängigkeit von Rauch-, Flamm- und Brennpunkt vom Gehalt an freien Fettsäuren [8]

Der **Brechungsindex** gibt das Verhältnis zwischen dem Sinus der Winkel des einfallenden und ausfallenden Lichtstrahls beim Durchgang durch ein optisches Medium an. Er dient zur Identifizierung und Charakterisierung von Ölen.

Die kinematische **Viskosität** ist naturgegeben und dient wie die Dichte und der Heizwert der Charakterisierung des Rapsölkraftstoffes gegenüber anderen Kraftstoffen oder Mischungen (vgl. Tabelle 4). Die Viskosität des Kraftstoffs nimmt Einfluss auf das Förderverhalten und die Zerstäubung des Kraftstoffs bei der Einspritzung (Tröpfchenspektrum, Geometrie des Einspritzstrahls). Infolge des verschlechterten Fließ-, Pump- und Zerstäubungsverhaltens führen hohe Zähflüssigkeiten häufig zu Kaltstartproblemen.

Tabelle 4: Viskositätsverhalten von Dieselmotorkraftstoff (DK), Rapsöl (RK) und RME (nach SAMS et al. [70] und WIDMANN et al. [93])

	DK	RK	RME
Viskosität bei 20 °C [mm²/s]	6,77	72,2	7,97
Viskosität bei 40 °C [mm²/s]	4,45	33,1	2,31

Die kinematische Viskosität ist stark temperaturabhängig. Abbildung 4 zeigt für Rapsöl drei verschiedener Aufbereitungsarten das Viskositäts-Temperaturverhalten. Aus dem deckungsgleichen Verlauf der drei Kurven wird deutlich, dass für die kinematische Viskosität die Ölgewinnungsmethode und Raffinationsstufe keine Rolle spielt. Durch Aufheizen auf etwa 90 °C kann die Viskosität von Pflanzenöl auf das Niveau von Dieselkraftstoff (bei Raumtemperatur) herabgesetzt werden. Aufgrund der Gefahr der Polymerisation ist von dieser Maßnahme jedoch dann abzusehen, wenn das Pflanzenöl nicht unmittelbar nach dem Aufheizen verbrannt wird (z.B. Aufheizen in Vorratsbehältern).

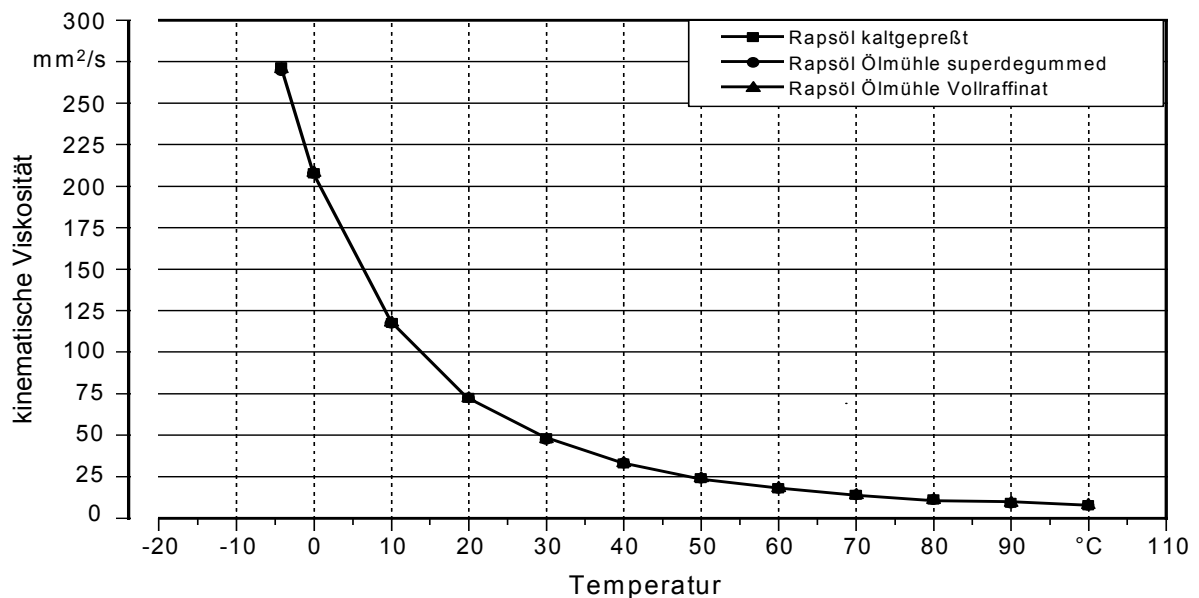


Abbildung 4: Viskositäts-Temperatur-Verhalten von Rapsöl verschiedener Ölgewinnungsarten und Raffinationsstufen [93].

Von der Viskosität hängt das Tröpfchenverteilungsspektrum ab. Die Verteilung der Tropfengrößen bei der Einspritzung [81] ist für Dieselkraftstoff, RME und Rapsölkraftstoff in Abbildung 5 dargestellt. Der häufigste Tröpfchendurchmesser ist bei RME etwa 2 mal und bei RK (Rapsöl) etwa 3,5 mal so groß wie bei Dieselkraftstoff. Größere Tropfen verschlechtern den Sauerstoffzutritt zu den Brennstoffmolekülen und können so, insbesondere im niederen Lastbereich oder bei kaltem Motor, zu erhöhten Partikel-, Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen

führen. Zur Verringerung der Tropfendurchmesser ist eine Vorwärmung des Kraftstoffs direkt bei der Einspritzung, die Erhöhung des Einspritzdrucks oder eine bauliche Veränderung des Brennraums (z.B. speziell gestaltete Prallkörper in der Vorkammer) möglich.

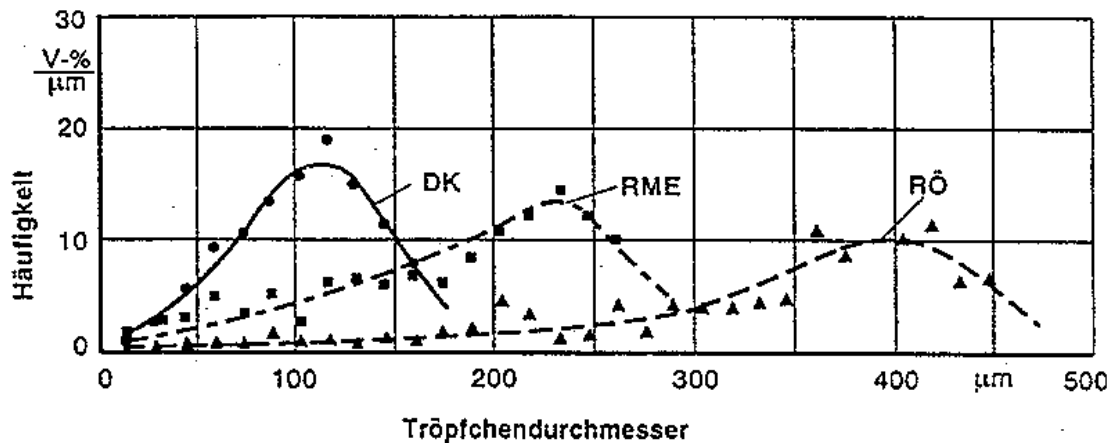


Abbildung 5: Tropfengrößenverteilung für DK, RME und RK (RÖ = RK) (TSCHÖKE [81])

Der Aggregatzustand eines Pflanzenöls ist nicht nur abhängig von der Temperatur (**Kälteverhalten**), sondern das Erstarren ist auch abhängig von der Verweilzeit. In Abbildung 6 ist das Tieftemperatur-Verhalten von kaltgepresstem Rapsöl dargestellt. Unter  $-10\text{ °C}$  wird Rapsöl spätestens nach drei Tagen fest. Bei  $-25\text{ °C}$  kann Rapsöl nur bis zu 6 Stunden flüssig gelagert werden. Zur Charakterisierung der Kältetauglichkeit des Kraftstoffes stehen für Dieselmotorkraftstoff verschiedene Kennwerte zur Verfügung, der Cloudpoint (CP), der Cold-Filter-Plugging-Point (CFPP) und der Pourpoint (PP). Da diese Testmethoden vorwiegend auf die Bildung von Paraffinkristallen reagieren, sind sie wenig für Pflanzenöl geeignet (Pflanzenöl enthält keine Paraffine). An einer geeigneten Prüfmethode zur Bestimmung des Kälteverhaltens von Pflanzenöl wird derzeit gearbeitet.

Einige wichtige physikalische Kenngrößen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

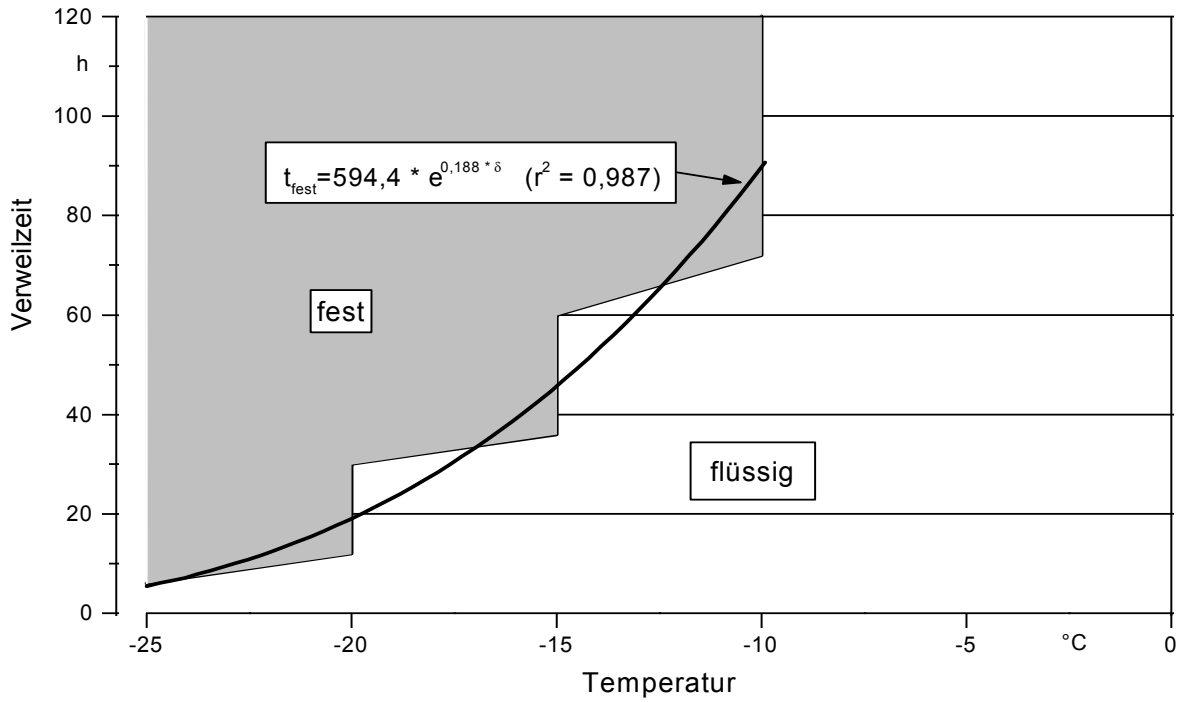


Abbildung 6: Tieftemperatur-Verhalten von kaltgepresstem Rapsöl [91]

Tabelle 5: Wichtige physikalische Kennzahlen einiger Pflanzenöle und -fette [8], [32], [51], [76], [83], [93]

Öl/Fett	Dichte (15 °C) [kg/dm <sup>3</sup> ]	Heizwert H <sub>u</sub> [kJ/g]	kinemat. Viskosität 20 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Flamm-punkt [°C]	Rauch-punkt [°C]	Brechungs-index n <sub>d</sub> <sup>40</sup>
Rapsöl	0,915-0,921	35,8-37,1	72,3	317	218	1,464-1,466
Sonnenblumenöl	0,920-0,927	36,2-37,1	68,9	316	209-213	1,466-1,468
Leinöl	0,930-0,935	~37,0	51,2			1,479-1,482
Sojaöl	0,922-0,934	36,1-37,1	65,4	317	213	1,565-1,469
Olivenöl	0,914-0,925		84,0			1,466-1,468
Hanföl	0,924-0,932	~37,1	50-70			1,466-1,470
Sesamöl	0,921-0,924					1,465-1,468
Erdnussöl	0,911-0,925		83,9	320	160-207	1,460-1,472
Palmöl	0,921-0,947		53,5	314	223	1,453-1,456
Palmkern-fett	0,925-0,935		40 °C:~23,7			1,449-1,452
Kokosfett	0,919-0,937		40 °C:~22,6	288	194	1,448-1,450

Für den Begriff Feststoffgehalt ist keine eindeutige Definition zu finden. Zur Bestimmung stehen Zentrifugenverfahren sowie gravimetrische Verfahren (Filterung mit Wiegung des Rückstandes) zur Verfügung. Die üblicheren Verfahren beruhen auf Filtration. Die Kennwerte lauten Petroletherunlösliche Verunreinigungen und **Gesamtverschmutzung**. Ausgehend von einer sehr unterschiedlichen Gesamtverschmutzung im ungereinigten Öl, bedingt durch die Eigenschaften der Ölsaaten und das Ölgewinnungsverfahren, entscheiden Auswahl und Prozessführung des Ölreinigungsverfahrens über Gehalt und Größenverteilung der im Reinöl verbleibenden Partikel. Hohe Fremdstoffgehalte im Pflanzenöl führen verstärkt zu Filterverstopfung, Verstopfung von Einspritzdüsen, Schäden an Einspritzpumpen, Ablagerungen im Brennraum und erhöhten Emissionen. Üblicherweise wird heute die Bestimmung der Gesamtverschmutzung nach DIN EN 12662 durchgeführt. Dabei wird das Pflanzenöl auf 40 °C erwärmt und durch einen 0,8 µm - Membranfilter gesaugt. Das unverdünnte Pflanzenöl passiert den Filter etwa 1/3 langsamer als Dieselkraftstoff. Als Lösungsmittel zum Spülen des Filterbelages wird Isopropanol, n-Hexan oder n-Heptan verwendet. Der Filter wird anschließend getrocknet und gewogen.

Der **Aschegehalt** (Oxidasche) beschreibt den Anteil anorganischer Feststoffe im Kraftstoff. Hohe Aschegehalte können zum Beispiel durch Eintrag von Staub in den Kraftstoff verursacht werden. Mit zunehmendem Aschegehalt steigt die Gefahr von Abrasionen und Verschleiß im Einspritzsystem und Brennraum.

Der **Koksrückstand** besteht aus organischen und anorganischen Bestandteilen und gibt Aufschluss über die Verkokungsneigung des Kraftstoffs an den Einspritzdüsen und Rückstandsbildung im Brennraum. Für die Ermittlung des Kennwertes wird die Methode nach Conradson verwendet (DIN EN ISO 10370). Bei Pflanzenöl wird die Bestimmung an der Gesamtprobe und nicht wie bei Dieselkraftstoff und FAME am 10 %igen Destillationsrückstand vorgenommen.

Die **Cetanzahl** stellt eine Maßzahl für die **Zündwilligkeit** des Kraftstoffes dar. Sie variiert in frischen Pflanzenölen nur in einem engen Rahmen. Die Cetanzahl wird jedoch beispielsweise, verbunden mit Änderungen der Viskosität, durch die Lagerungsbedingungen beeinflusst [93]. Hinsichtlich des Motorbetriebes bestehen Zusammenhänge zwischen der Cetanzahl und den Partikelemissionen, dem Ge-



räuschpegel und den NO<sub>x</sub>-Emissionen. Pflanzenöle weisen im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff eine niedrigere Cetanzahl auf, gemessen im Prüfmotor für Dieseldieselkraftstoff mit veränderten Einstellungen [93]. Deshalb ist diese Methode für vergleichende Messungen nicht geeignet. Um Quervergleiche durchführen zu können, ist es erforderlich, einen pflanzenöлтаuglichen Motor oder ein neues Messverfahren für diese Prüfung zu verwenden. Auch daran wird derzeit gearbeitet.

In Pflanzenölen wird der **Wassergehalt** durch die Saatfeuchte, durch den Raffinationsprozess (bei Pflanzenölraffinaten) und durch Kondensationseffekte sowie Wassereintrag während der Lagerung beeinflusst. Wasser ist für die Verbrennung im Motor grundsätzlich nicht nachteilig. Allerdings ist bei einem höheren Wassergehalt mit Kavitationen v.a. in Hochdruck-Einspritzsystemen zu rechnen. Darüber hinaus kann es zu Zündaussetzern kommen. Bei niedrigen Temperaturen führt Wasser durch Kristallbildung mitunter zu Filterverstopfung. Bei der Lagerung des Kraftstoffs nimmt mit steigendem Wassergehalt die Gefahr der hydrolytischen Spaltung und des mikrobiellen Befalls zu.

Der **Sauerstoffanteil** im Rapsölkraftstoff liegt bei ca. 11 %; die Kohlenwasserstoffe im Dieseldieselkraftstoff besitzen definitionsgemäß keinen Sauerstoff. Für Rapsöl führt dies zu einem verminderten Luftsauerstoffbedarf bei der Verbrennung.

Der **Phosphor** in Pflanzenölen liegt in Form von Phospholipiden vor (siehe oben). Mit steigendem Anteil an Phospholipiden verringert sich die Oxidationsstabilität, außerdem neigen Phospholipide zur Hydratisierung (Quellung mit Wasser) und können dadurch zum Beispiel Filterverstopfung hervorrufen. Phosphor senkt die Verbrennungstemperatur, kann im Brennraum zu Ablagerungen führen und möglicherweise Veränderungen im Emissionsverhalten hervorrufen. Oxidationskatalysatoren weisen zudem eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Phosphorverbindungen bezüglich ihrer Umsatzrate bzw. Dauerfunktion auf [94]. Die Phosphorgehalte in Pflanzenölraffinaten sind vom Raffinationsgrad abhängig. Phosphorgehalte in nicht raffiniertem Pflanzenöl können durch entsprechende Prozessführung (insbesondere Verarbeitungstemperatur) niedrig gehalten werden. Abbildung 7 zeigt den Phosphorgehalt in Abhängigkeit von der Presskopftemperatur an der Ölpresse Komet DD85 (IBG Monforts) [90]. Für Dieseldieselkraftstoff ist keine Begren-

zung des Phosphorgehaltes notwendig, da die Ausgangsstoffe kaum Phosphor enthalten.

Der **Schwefelgehalt** in pflanzlichen Ölen ist grundsätzlich äußerst gering und beträgt meist deutlich weniger als 20 mg/kg. Bei der motorischen Verbrennung sind deshalb die Schwefeldioxidemissionen und der Ausstoß von an Partikeln angelagerten Sulfaten gering. Der Schwefelgehalt kann Schwankungen unterliegen, die z.B. aus der starken Affinität der Rapspflanze (Brassicaceae) zu diesem Element resultieren. Die Prüfmethode ASTM D5453-93 weist derzeit die höchste Messgenauigkeit für diesen Konzentrationsbereich auf.

**Weitere Elementgehalte** wie N, Fe, Ca, K, Na, Cu und Cl sind für Pflanzenöle bislang kaum analysiert worden. In praxisrelevanten Pflanzenölproben wurden diese deshalb im Rahmen des Projektes näher untersucht. Beispielsweise ist nicht auszuschließen, dass in Gegenwart von Chlor bei der Verbrennung Dioxine entstehen können, weshalb auf den Chlorgehalt ein besonderes Augenmerk gelegt werden muss, sofern Chlor im Pflanzenöl enthalten ist.

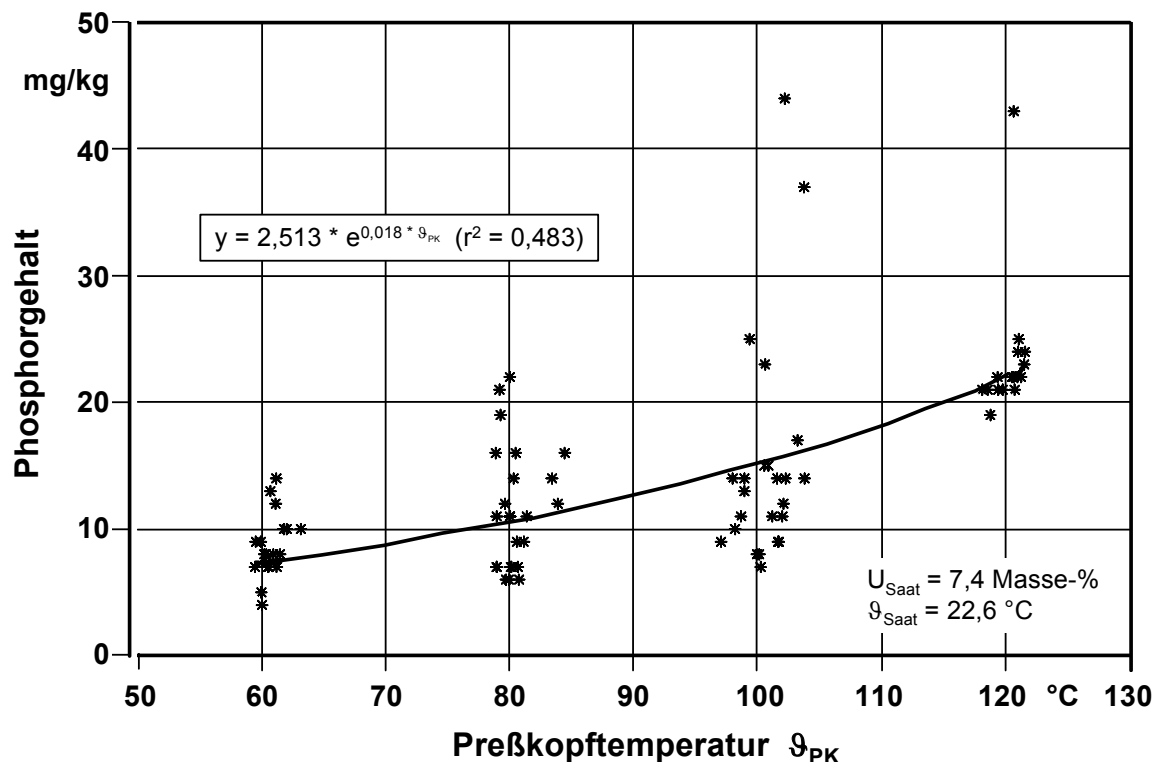


Abbildung 7: Phosphorgehalt von Rapsöl in Abhängigkeit von der Presskopftemperatur (Ölpresse: IBG Monforts "Komet DD85 ") [90]

In Tabelle 17 (Seite 90) werden die wichtigsten Merkmale von naturbelassenem Pflanzenölkraftstoff und Ihre Auswirkung auf Lagerfähigkeit, Betriebsverhalten und Emissionen zusammengefasst.

An Kraftstoffe werden von Seiten der Gesetzgebung und der Anwendung gewisse Mindestanforderungen gestellt. Für Dieselmotorkraftstoff sind diese in Europa durch die DIN EN 590 geregelt. Für Rapsölkraftstoff gibt es derzeit noch keine gültige Norm. Deshalb wurde im Rahmen des LTV-Arbeitskreises „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ unter der Federführung der Landtechnik Weihenstephan ein Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff erarbeitet (Abbildung 8).

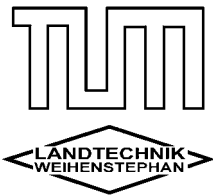


	<b>LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung, Weihenstephan</b>		in Zusammenarbeit mit:	
	<b>Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)</b> 05/2000		 	
Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
<b>für Rapsöl charakteristische Eigenschaften</b>				
Dichte (15 °C)	kg/m³	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)	mm²/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
<b>variable Eigenschaften</b>				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25	DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (110 °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 8: Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard 05/2000) [66]

## 2.4 Datenbank zu Inhaltsstoffen und Kenngrößen relevanter Pflanzenöle

Um die in der Praxis vorkommende Streubreite von Inhaltsstoffen und Eigenschaften pflanzlicher Öle aufzeigen zu können, wurden alle zur Verfügung stehenden Analysenergebnisse in eine Datenbank aufgenommen.

Erheblich erweitert werden konnte der Datenbestand im Rahmen der Forschungsprojekte „Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW“ [66] und „Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke- Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung“ [78].

Die Datenbank umfasst derzeit (Stand November 2001) etwa 150 Datensätze von Pflanzenölproben unterschiedlicher Herkunft mit dem Schwerpunkt auf Rapsöl, dem wichtigsten heimischen Pflanzenöl.

In Abbildung 9 ist die Streubreite aller in der Datenbank der Landtechnik Weihenstephan aufgenommenen Analysenergebnisse für die wichtigsten Kraftstoffkenngrößen von naturbelassenem Rapsöl bezogen auf die Grenzwerte des RK-Qualitätsstandards 05/2000 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Kenngrößen Dichte, Iodzahl, Heizwert, Flammpunkt und kinematische Viskosität den geringsten Schwankungen unterworfen sind und bis auf wenige Ausnahmen die geforderten Grenzwerte einhalten (Sollwertbereich grau hinterlegt). Die Kenngrößen Oxidationsstabilität, Schwefelgehalt, Neutralisationszahl, Koksrückstand, Phosphorgehalt, Aschegehalt und Wassergehalt verhalten sich bei den hier untersuchten Proben weniger einheitlich, erfüllen jedoch im Mittel aller Einzelanalysen (Median) zumeist deutlich die Grenzwerte des RK-Qualitätsstandards. Als einziger Kennwert liegt die Gesamtverschmutzung im Durchschnitt mit mehr als dem doppelten des geforderten Grenzwerts von 25 mg/kg außerhalb des in Abbildung 9 grau hinterlegten zulässigen Bereichs.

Da die Ölreinheit ebenso wie Oxidationsstabilität, Neutralisationszahl und Phosphorgehalt entscheidende Parameter für die Betriebssicherheit und das Abgasverhalten von Verbrennungsmotoren darstellen, sollte bei der Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff unbedingt auf die Einhaltung ihrer Grenzwerte geachtet werden.

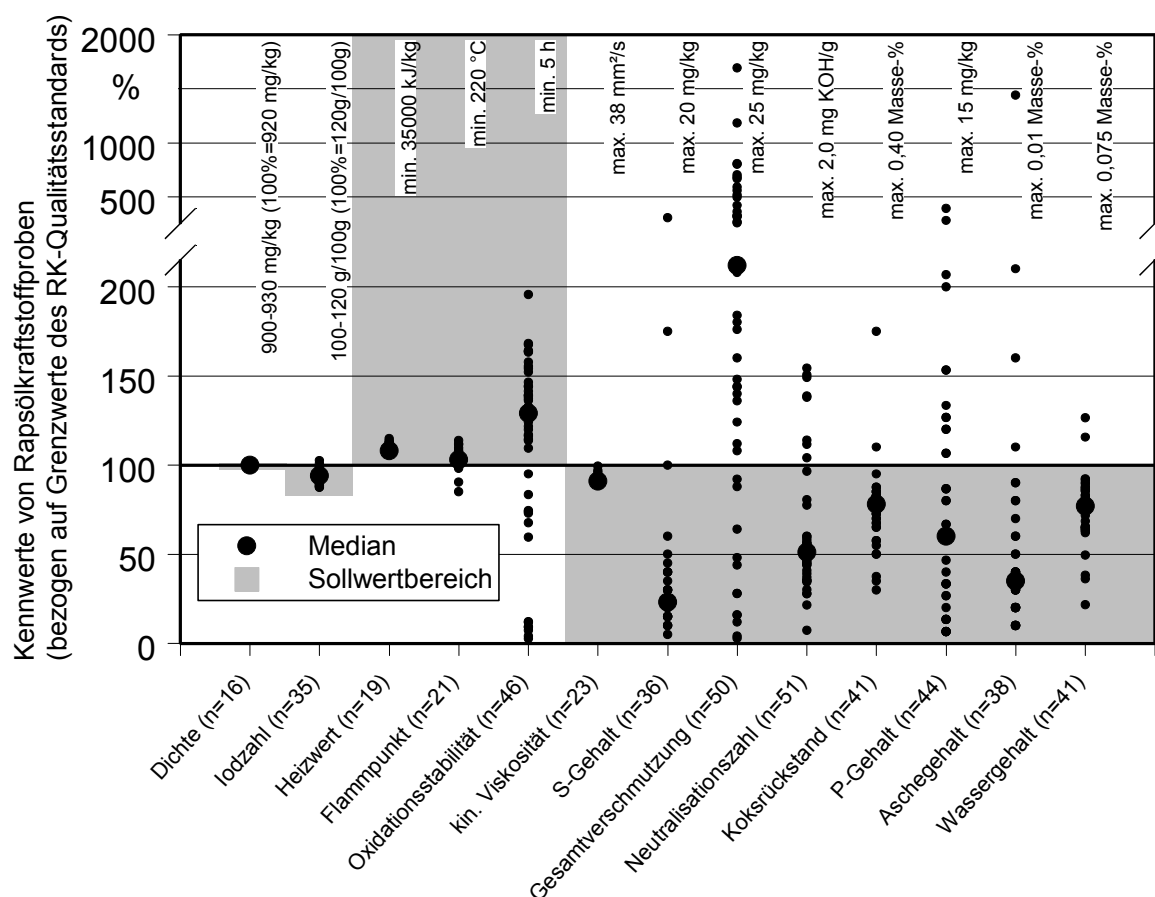


Abbildung 9: Median und Streubreite analysierter Kennwerte des RK-Qualitätsstandards von Rapsölkraftstoffproben unterschiedlicher Herkunft, bezogen auf die geforderten Grenzwerte (eigene Untersuchungen)

Um den Einfluss der Ölsaatenverarbeitung auf die Ölqualität zu bestimmen, wurde im Rahmen eines Ringversuchs eine einheitlichen Charge Rapssaar in 22 dezentralen Ölgewinnungsanlagen in Bayern verarbeitet. In Tabelle 6 und Abbildung 10 sind die Mittelwerte und Schwankungsbreiten wichtiger Kennwerte von Rapsöl aus dieser Untersuchung dargestellt.

Tabelle 6: Mittel- und Extremwerte wichtiger Kenngrößen von Rapsöl einer Rapscharge aus 22 Ölgewinnungsanlagen in Bayern

	<b>Wasser- Gehalt</b> mg/kg	<b>Neutrali- sations- zahl</b> mg KOH/g	<b>Peroxid- zahl</b> meq/kg	<b>Asche- Gehalt</b> Gew.-%	<b>Koks- rückstand</b> Gew.-%	<b>Gesamt- tocophe- rolgehalt</b> mg/100 g
<b>Mittel</b>	501	3,2	2,4	0,004	0,334	62
<b>Min</b>	381	2,0	1,0	0,001	0,270	57
<b>Max</b>	712	7,2	6,5	0,008	0,375	67
	<b>Chloro- phyll- Gehalt</b> mg/l	<b>Wachse</b> Gew.-%	<b>Phosphor- Gehalt</b> mg/kg	<b>Eisen- Gehalt</b> mg/kg	<b>Kupfer- Gehalt</b> mg/kg	<b>Kalium- Gehalt</b> mg/kg
<b>Mittel</b>	0,92	<0,1	2,7	0,8	< 0,5	<1,0
<b>Min</b>	0,66	<0,1	1,0	0,5	< 0,5	<1,0
<b>Max</b>	1,43	<0,1	4,0	1,6	< 0,5	<1,0
	<b>Natrium- Gehalt</b> mg/kg	<b>Calcium- Gehalt</b> mg/kg	<b>Schwefel- Gehalt</b> mg/kg	<b>Stickstoff- Gehalt</b> mg/kg	<b>Chlor- Gehalt</b> mg/kg	<b>Fluor- Gehalt</b> mg/kg
<b>Mittel</b>	1,5	10,3	<1 (19) <sup>1)</sup> 5,7 (3)	<500	<10	<10
<b>Min</b>	0,7	4,7	<1	<500	<10	<10
<b>Max</b>	2,6	31,0	7	<500	<10	<10

<sup>1)</sup> die in Klammern angegebenen Werte geben die Anzahl der Proben an, für die das entsprechende Analyseergebnis erzielt wurde

In Abbildung 10 sind als 100 %-Werte die ermittelten Durchschnittswerte der Kenngrößen angegeben. Dabei wird deutlich, dass Wassergehalt, Koksrückstand, Tocopherol-Gehalt und Chlorophyll-Gehalt im Rapsöl (einheitliche Charge) den geringsten Schwankungen zwischen ca. 75 und etwas mehr als 200 % des Mittelwertes unterworfen sind. Abweichungen zwischen ca. 40 und 400 % weisen die Neutralisationszahl sowie der Phosphor-, Eisen-, und Natrium-Gehalt auf. Die größten Schwankungsbreiten wurden beim Asche-Gehalt, der Peroxidzahl und dem Calcium-Gehalt festgestellt. Die analysierten Kenngrößen umfassen bei diesen Parametern Werte von 27 bis zu maximal 800 % des Mittelwerts.

Die in den verschiedenen Anlagen gewonnen Öle stammen alle aus einer einheitlichen Rapscharge, so dass Sorten- und Standorteinflüsse nicht gegeben waren. Auch wurden sämtliche Analysen von dem gleichen anerkannten Prüflabor durchgeführt. Somit sind die Abweichungen der Kenngrößen bei Vernachlässigung der Probenahme- und Analysefehler in erster Linie auf die unterschiedliche Abpresstechnik (z.B. Bauart der Ölpresse, Abpresstemperatur) zurückzuführen. Des Weiteren können längere Lagerzeiten, die aus dem ca. 6wöchigen Probenahmezeitraum resultierten, z.B. Grund für eine Erhöhung der Peroxid- und Neutralisationszahl sein.

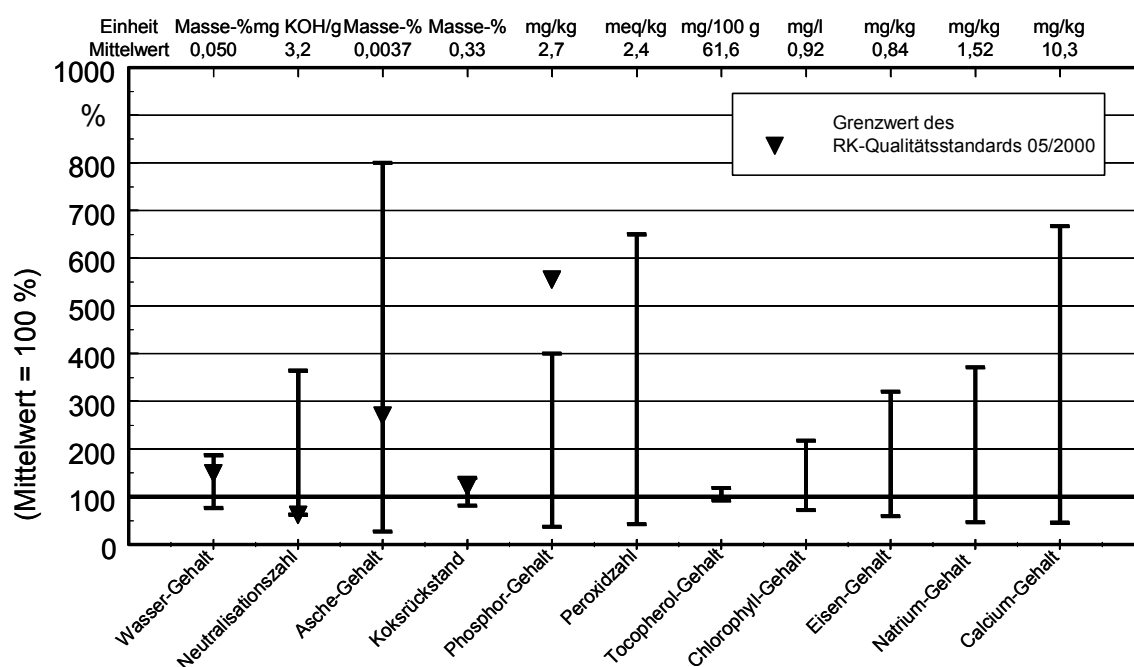


Abbildung 10: Kennwerte von kaltgepresstem Rapsöl - Mittelwerte und Schwankungsbreite von Ölanalysen aus 22 dezentralen Ölgewinnungsanlagen in Bayern



Die Ergebnisse machen deutlich, dass Pflanzenöleigenschaften wie Asche-Gehalt oder Peroxidzahl bereits durch die Wahl des Ölgewinnungs- und Öllagerungsverfahrens erheblich beeinflusst werden. Für diese Kenngrößen kann also mit einem großen Potenzial zur Optimierung der Pflanzenölqualität gerechnet werden.

Zur Einordnung der in den untersuchten 22 Anlagen vorgefundenen Rapsölqualitäten sind in Abbildung 10 die Grenzwerte des RK-Qualitätsstandards für die entsprechenden Kennwerte aufgetragen. Demnach halten sämtliche Proben den geforderten maximalen Phosphorgehalt und Koksrückstand, die Mehrheit der Proben den Wasser- und Aschegehalt, aber keine der Proben die maximale Neutralisationszahl ein. Die durchwegs über dem Grenzwert liegende Neutralisationszahl kann darauf zurückgeführt werden, dass im Versuch bewusst nur die Press-technologie, nicht aber das Reinigungsverfahren berücksichtigt wurde. Deshalb wurden Proben des ungereinigten Öles gezogen und bis zur Analyse der Gesamtverschmutzung und der übrigen Kennwerte (hierfür wurde der sedimentierte Überstand verwendet) gelagert. Für deren Bestimmung wurde gereinigtes Öl verwendet. Aufgrund des in den Trubstoffen höheren Gehalts an Lipasen (fettspaltende Enzyme) kam es vermutlich während der Probenlagerung zu einer Erhöhung des Gehalts freier Fettsäuren.

Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Einflussfaktoren des Produktions- und Lagerungsverfahrens auf die Qualität des Pflanzenölkraftstoffs bewerten zu können.

### 3 Technologieübersicht: Pflanzenöлтаugliche Verbrennungsmotoren

#### 3.1 Vorgehen

Die folgende Zusammenstellung wichtiger Motoreigenschaften basiert weitgehend auf Fachliteratur zur Dieselmotorentchnik. Die Übersicht über die Motorenkonzepte für die Verbrennung von Pflanzenölkraftstoffen stützt sich ebenfalls auf ein umfangreiches Literaturstudium sowie auf Informationsmaterial und Experten- auskünfte von Motorenherstellern bzw. -anbietern.

#### 3.2 Verbrennungsverfahren

Wie bei herkömmlichen Dieselmotoren unterscheidet man auch bei Pflanzenölmotoren zwischen direkteinspritzenden Verfahren, bei denen der Brennraum aus einer Mulde im Kolben und einem veränderlichen Spalt zwischen Kolben und Zylinderkopf gebildet wird, und Verfahren mit indirekter Einspritzung, bei denen der Kraftstoff in eine Nebenkammer (Vor- bzw. Wirbelkammer), die sich im Zylinderkopf befindet, eingespritzt wird und anschließend erst in den Hauptbrennraum gelangt.

Beim **Vorkammer-** und beim **Wirbelkammerverfahren** (vgl. Abbildung 11) verläuft die Verbrennung in zwei Stufen. Durch die in der Nebenkammer einsetzende Verbrennung erhöht sich der Druck, so dass der Kammerinhalt (Verbranntes, Teiloxidiertes und Kraftstoff) in die Hauptkammer strömt. Dort wird das Gemisch mit der darin befindlichen Luft verwirbelt, wodurch sich die Verbrennung fortsetzen kann. Der Verbindungskanal von *Wirbelkammermotoren* ist im Gegensatz zu *Vorkammermotoren* so konstruiert, dass die bei der Kompression einströmende Luft Wirbel bildet. Vorkammern sind dagegen zum Hauptbrennraum hin mit einem löchrigen Boden versehen, wodurch eine sehr gute Vermischung mit der Luft im Hauptbrennraum erreicht werden kann. In der Mitte der Vorkammer wird eine Prallfläche platziert, die den auftreffenden Strahl zerteilt und intensiv mit Luft vermischt. Durch eine veränderte Vorkammerform mit Verdampfungsmulde und eine speziell gestaltete Prallfläche („Kugelstift“) wird die einströmende Luft in einen

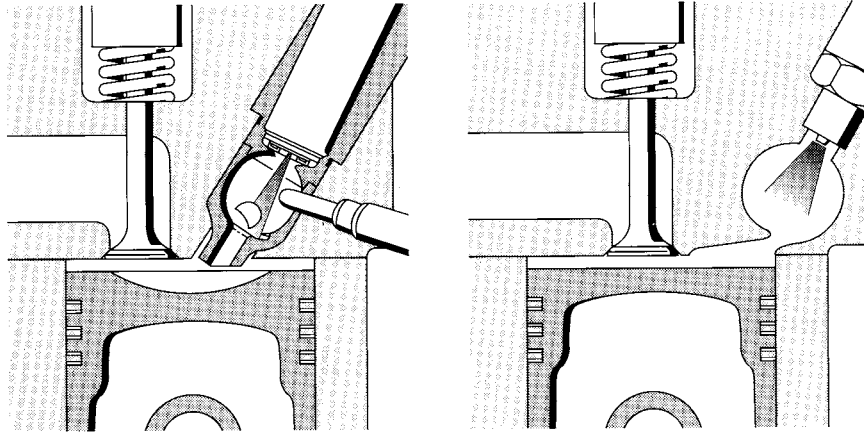


Abbildung 11: Vorkammervorverfahren (links), Wirbelkammervorverfahren (rechts) [9]

Drall versetzt, was zu einer besseren Kraftstoffverteilung führt. Dies ist vor allem in der Warmlaufphase des Motors von besonderer Wichtigkeit. Zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens sind Glühkerzen in der Nebenkammer angebracht. Die Vorteile von Nebenkammernmotoren liegen in einer höheren spezifischen Leistung durch eine bessere Luftausnutzung bei Vollast mit geringeren Reibungsverlusten. Außerdem führt die gestufte Verbrennung zur Minderung der Geräusch- und Geruchsstoffemissionen sowie den Ausstoß von Stickstoffoxiden [58].

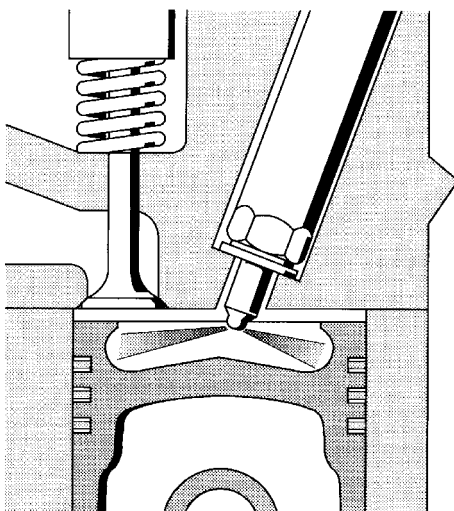


Abbildung 12: Direkteinspritzverfahren [9]

Das Oberflächen/Volumen-Verhältnis des Brennraums eines **direkt einspritzenden Motors** (vgl. Abbildung 12) ist um ca. 30-40 % kleiner als bei einem Nebenkammernmotor. Die Wärmeverluste über die Brennraumwand werden somit gering gehalten. Dies und die fehlenden Strömungswiderstände zwischen Haupt- und Nebenkammer ergeben einen bis zu ca. 15 % geringeren Kraftstoffverbrauch der Motoren mit direkter Einspritzung.

Allen derzeit verfügbaren Motorenkonzepten für die Verbrennung von Pflanzenölen ist gemeinsam, dass der Kraftstoff in einem großvolumigen Brennraum in meist stärkerer Verwirbelung des Kraftstoff-/Luft-Gemisches bei höheren Temperaturen als Dieselkraftstoff verbrennt. Dies verbessert den Verbrennungsprozess und beugt Ablagerungen im Verbrennungsraum vor.

Neben speziell für Pflanzenöl entwickelten oder weiterentwickelten Motoren werden auch Umrüstsätze für Serienmotoren angeboten. Grundsätzlich ist die Nutzung von pflanzenöлтаuglichen Motoren sowohl in mobilen Antrieben, also in Pkw-, Nutzfahrzeug-, Landmaschinen- und Schiffsmotoren, als auch in stationären Einrichtungen wie Stromaggregaten und Blockheizkraftwerken möglich. Letztere können wärme- oder stromgeführt mit hohem Gesamtwirkungsgrad betrieben werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten derzeit verfügbaren Motorenkonzepte für Pflanzenöle in ihren wesentlichen Prinzipien vorgestellt. Eine Liste von Herstellern, Umrüstern und Anbietern von Pflanzenölmotoren enthält Tabelle 8 (Seite 41).

### 3.3 Pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren mit Vor- bzw. Wirbelkammerverfahren

#### **Deutz-Motoren:**

Der Wirbelkammermotor FL 912W der Firma **Deutz AG, Köln**, der zum Beispiel über die Firma **Henkelhausen GmbH & Co. KG, Krefeld** zu beziehen ist, ist für den Pflanzenölbetrieb geeignet. Der Motor ist luftgekühlt, das Fahrzeug wird bei der Ausstattung für Pflanzenöl mit einem zusätzlichen Kraftstofftank für den Startvorgang mit Dieselkraftstoff, einer Kolbenförderpumpe, einem zusätzlichen Filter für Pflanzenöl und den Elementen für die Diesel-/Pflanzenölschaltung von der Fahrerkabine aus ausgerüstet. Diese Umbaumaßnahmen werden auch für modifizierte (dem Wirbelkammerverfahren angenäherte) direkteinspritzende Motoren gleicher Baureihe (FL 912) angeboten. Das Einsatzgebiet der Deutz-Motoren-Baureihe 912 beschränkt sich im Wesentlichen auf den mobilen Anwendungsbereich (v.a. Schlepper).

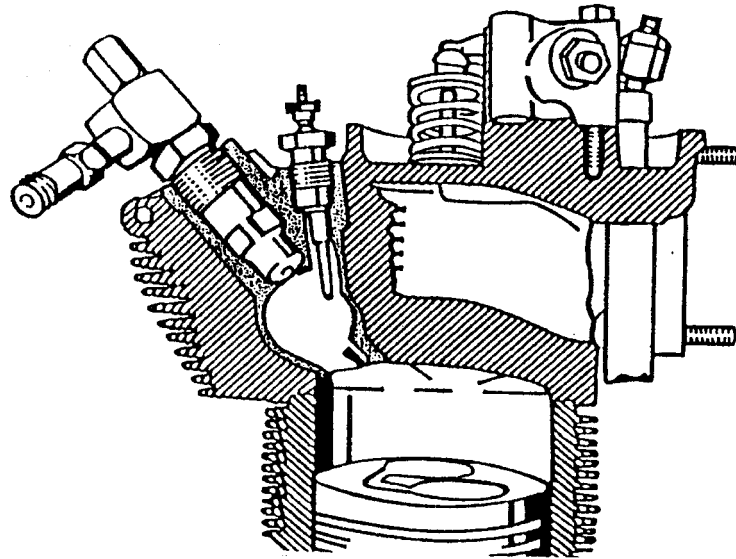


Abbildung 13: Deutz-Motor FL 912W (Zylinderkopf) (JURISCH et al.1994)

Ein Pflanzenölbau (ohne Startkraftstoff) der Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie für direkteinspritzende Deutz-Schleppermotoren der Baureihe 1013 befindet sich derzeit in der Felderprobung (siehe auch Kapitel 3.5).

Die Firma Henkelhausen GmbH & Co KG bietet derzeit keine pflanzenöлтаuglichen BHKW-Kompaktmodule an. Lieferbar sind aber wassergekühlte BHKW-Grundmotoren der Reihe Deutz 1008 ( $4,5 - 12,3 \text{ kW}_{\text{mech}}$ ), die mittels Dual-Brennstoffsystem (Betrieb mit kaltgepresstem Rapsöl und Dieselkraftstoff) auf den Betrieb mit Pflanzenöl umgerüstet werden können. Für reine Stromaggregate stehen auch luftgekühlte Wirbelkammermotoren der 413er und 513er Baureihe für die Umrüstung auf Pflanzenöl zur Verfügung. Auf Anfrage besteht die Möglichkeit für Sonderlösungen.

#### **MWM-Motoren:**

Die Motoren der Baureihe D 916 / 932 der **Motoren-Werke Mannheim AG (MWM)**, Mannheim sind ebenfalls indirekt einspritzende Antriebsaggregate. Sie wurden lange im Untertagebetrieb mit Dieselkraftstoff eingesetzt und erfüllten strenge Abgasrichtlinien. Der wassergekühlte Motortyp galt als pflanzenöлтаuglich. Die Motoren-Werke Mannheim AG produziert heute diese Motoren nicht mehr.

### 3.4 Pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren mit Direkteinspritzung

Charakteristische Merkmale von direkt einspritzenden Motoren für den Betrieb mit Pflanzenöl sind eine halbkugelförmige Brennmulde im Kolben (bzw. im Zylinderkopf) sowie, für die bessere Zerstäubung des hochviskosen Kraftstoffes, die Verwendung von Einloch-Einspritzdüsen.

#### Elsbett-Motoren:

Dieser wohl bekannteste pflanzenöлтаugliche Motor arbeitet nach dem sogenannten „*Duotherm-Verfahren*“, das von **Ludwig Elsbett**, abgeleitet vom MAN-M-Verfahren entwickelt wurde. Dabei wird mit der Einloch-Zapfendüse der Kraftstoff tangential in die Brennmulde eingespritzt. Der entstehende Gemischwirbel sorgt dafür, dass im Inneren des Brennraums eine zentrale heiße Brennzone entsteht, während im äußeren Bereich die Wärmeübertragung an die Kolbenwand vermindert werden soll (siehe Abbildung 14). Größere Motortypen sind mit zwei gegenüberliegenden Einspritzdüsen ausgestattet (Doppel-Duotherm-Verfahren).

Das Kolbenoberteil ist aus Sphäroguss gefertigt und ermöglicht hohe Passgenauigkeit, hohe Verbrennungstemperaturen und geringe Wärmeverluste. Der Gleitstein als Kolbenunterteil ist aus leichterem Material hergestellt, da er weniger thermisch belastet wird. Beide Teile sind gelenkig mit dem Pleuel verbunden (Gelenkolben). Aufgrund des Verbrennungsverfahrens muss der Motor weniger gekühlt

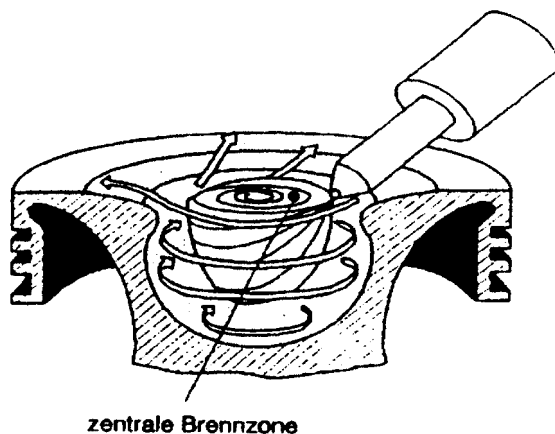


Abbildung 14: Elsbett Duotherm-Verfahren  
(Elsbett Konstruktion)

werden, weshalb auf eine Wasserkühlung verzichtet wird. Kolbenboden und Zylinderwand werden durch eine Ölkühlung gekühlt. Elsbettmotoren sind in der Regel mit Abgasturbolader und Ladeluftkühlung ausgerüstet. Die Firma Elsbett Technologie hat sich mittlerweile auf die Umrüstung von Serien-Dieselmotoren für Pkw und Lkw spezialisiert.

**MWS-Motoren:**

Die Pflanzenölmotoren der Firma **MWS Löschenkohl & Mitter Motorenwerk Schönebeck GmbH** (früher AMS - Antriebs- und Maschinentechnik, Schönebeck, bzw. DMS - Dieselmotoren- und Gerätebau GmbH, Schönebeck) sind eine eigene Weiterentwicklung einer ursprünglichen Lizenz am Duotherm-Verfahren von Elsbett. Die Konstruktionsmerkmale sind im Wesentlichen ähnlich denen des Elsbett-Motors. Es werden zwei gegenüberliegende Einloch-Zapfendüsen verwendet. Das Oberteil des Pendelschaftkolbens besteht aus Kugelgraphitguss, der Gleitstein aus Aluminiumguss. Auch bei diesem Motortyp werden Zylinderkopf, Zylinderlaufbuchse und Kolben mit Öl gekühlt. Haupteinsatzbereich der MWS/AMS-Motoren sind stationäre Anwendungen. Die Firma MWS hat auch anschlussfertige Blockheizkraftwerke mit den Grundmotoren MF-4RTA-G und MF-6RTA-G im Programm.

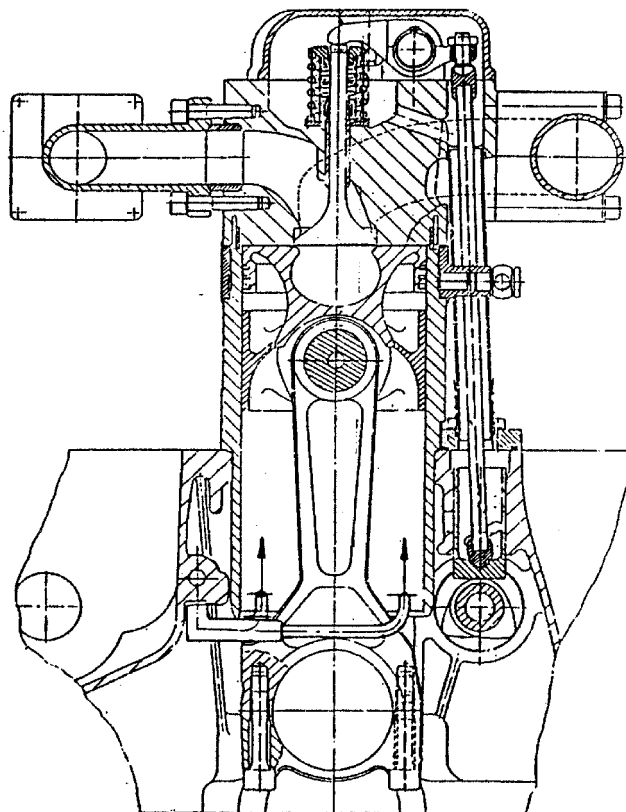


Abbildung 15: Schnittbild eines AMS-Pflanzenölmotors (JURISCH et al. 1994)

**AAN-Motoren (ehemals TMW):**

Ein weiterer direkt einspritzender Motor für Pflanzenölkraftstoffe ist die Entwicklung der **Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH**. Hauptmerkmale sind auch hier ein etwa halbkugelförmiger Brennraum im Kolben sowie die Verwendung einer Einloch-Einspritzdüse. Der Ferrotherm-Kolben wurde zusammen mit der Firma Mahle GmbH, Stuttgart, entwickelt. Das Pflanzenöl wird bei diesem Motor vorgewärmt. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Motortypen ist dieser mit einer Wasserkühlung ausgestattet. AAN-Motoren werden überwiegend als Stationärmotoren, aber auch in Nutzfahrzeugen (z.B. Schlepper) eingesetzt.

Als Basis für AAN-Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke werden Motoren bzw. Motorenkomponenten von der Firma Faryman für den Leistungsbereich von 8 kW<sub>el</sub> bis 22 kW<sub>el</sub> und der Firma MAN für 98 kW<sub>el</sub> bis 360 kW<sub>el</sub> verwendet.

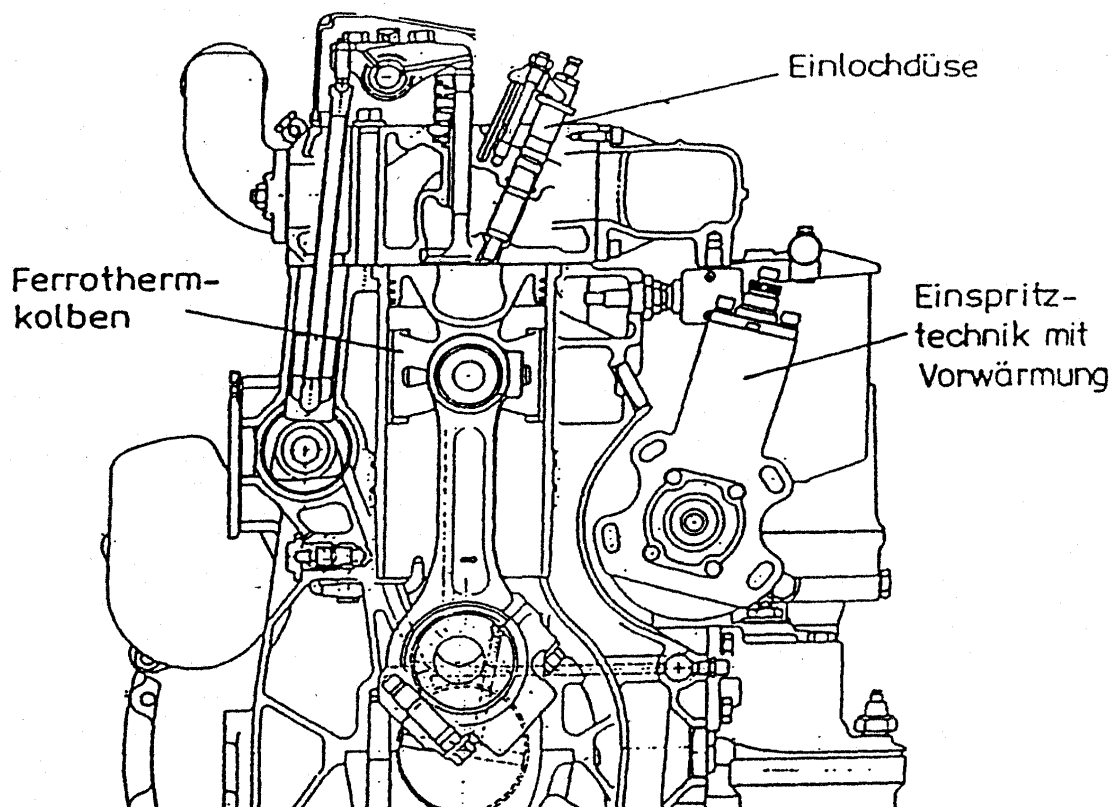


Abbildung 16: Schnittbild eines AAN-Pflanzenölmotors (JURISCH et al. 1994)



**Mahler-Motor:**

Eine etwas andere Bauform stellt die Entwicklung von **Willy Mahler** (Schweiz) dar. Die Brennraummulde liegt im Zylinderkopf, wodurch der Kolben weniger belastet wird, der Kolbenboden ist flach. Der Motor ist außerdem mit zwei Einspritzdüsen je Zylinder ausgerüstet.

**Mederer Knickpleuel-Motor:**

Die Entwicklung des Erfinders **Gerhard Mederer, Allersberg**, weist als Besonderheit ein Gelenk in der Pleuelstange auf (Knickpleuel). Nach Angaben des Konstrukteurs wird dadurch ein längeres Verharren des Kolbens im oberen Totpunkt und damit eine vollständigere Verbrennung des Pflanzenölkraftstoffs bei höheren Temperaturen erreicht. Bislang liegen noch keine umfangreichen Praxiserfahrungen mit diesem patentierten Motortyp vor.

### 3.5 Umrüstung von Serienmotoren für Pflanzenölbetrieb

Die **Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP)** entwickelten ein System zur Umrüstung von Serien-Dieselmotoren für den Betrieb mit Pflanzenölen (VWP-System für Serienmotoren). Langfristig ist die Aufnahme in die Serienproduktion als optionale Ausstattung denkbar. Neben der Anpassung von Komponenten der Kraftstoffversorgung (z.B. Kraftstoffvorwärmung, Kraftstofferkennung) werden je nach Motortyp Änderungen an Zylinderkopf, Ventilen, Kolben, Einspritzdüsen, Einspritzpumpe, Motorelektronik der Einspritztechnik und –regelung vorgenommen. Umgerüstet werden indirekt und direkt einspritzende Motoren verschiedener Hersteller, die überwiegend in Pkw oder Kleintransportern eingesetzt werden. Seit kurzem rüsten die Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie auch direkteinspritzende Deutz-Motoren der 1013er Baureihe, die in Deutz-Fahr Schleppern eingesetzt werden, auf den Pflanzenölbetrieb um. Diese werden derzeit neben den Umrüstkonzepten weiterer Umrüstfirmen und Schlepperhersteller im Rahmen eines Forschungsprojektes, das vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft initiiert wurde (100 Schlepperprogramm) hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Machbarkeit überprüft.

Pflanzenöлтаugliche Blockheizkraftwerke von den Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie befinden sich derzeit in der Entwicklung. Auf Anfrage können spezielle Lösungen angeboten werden.

Die Firma **Konrad Weigel Energietechnik**, (ehemals zu den Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie gehörig) baut pflanzenöлтаugliche Blockheizkraftwerke (komplett mit Schaltanlage und Zubehör) auf der Basis von Kubota-Wirbelkammermotoren in einem Leistungsbereich zwischen ca. 6 und 28 kW<sub>el</sub>. Die Applikation für direkt einspritzende Stationärmotoren ist geplant. Konrad Weigel besitzt auch mehrjährige Erfahrung mit der Errichtung und Betreuung von Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken zur Energieversorgung von Gebirgshütten.

**G. Lohmann Prototypenbau, München** bietet Umrüstungen von verschiedenen Serien-Dieselmotoren auf Pflanzenöl für mobile Einsatzzwecke (Pkw, Lkw, Schlepper und Baumaschinen) an. Die Adaption erfolgt im Wesentlichen durch den Einbau eines Zweitanksystems (Starten und Abstellen mit Dieseldieselkraftstoff) sowie durch eine Kraftstoffvorwärmung.

**Wolf-Pflanzenöl-Technik** rüstet konventionelle Dieselmotoren mit Hilfe eines thermopunktuellen Verbrennungsverfahren auf den Betrieb mit Pflanzenöl um. Dabei trifft der eingespritzte Kraftstoff auf eine verlängerte Glühkerze, erwärmt sich dort und zerstäubt, so dass laut Auskunft des Herstellers auch bei tiefen Temperaturen und kaltem Motor ein Betrieb mit reinem Pflanzenöl möglich ist. Zusätzlich wird ein Feinstfiltersystem der Firma Trabold eingebaut, wodurch Motorölwechsel entfallen sollen. Die Umrüstung ist nicht an einen bestimmten Motorhersteller gebunden und erlaubt weiterhin (wahlweise) den Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff.

Die Firma **Hausmann** rüstet seit mehreren Jahren indirekt und direkt einspritzende Dieselmotoren nach einem eigenen System auf Pflanzenölbetrieb um. Änderungen werden v.a. an den Einspritzdüsen und am Kraftstoffsystem (Kraftstoffförderpumpe, Leitungen, z.T. Kraftstofffilter) durchgeführt. Umgerüstet werden vor allem Pkw, Lkw, Baumaschinen und Schlepper verschiedener Hersteller und Typen. Auf Anfrage können auch Speziallösungen zur Umrüstung von Stationärmotoren (z.B. für BHKW) angeboten werden.

**KPM Krahwinkel** bietet pflanzenöлтаugliche Marine-Motoren im Leistungsbereich zwischen ca. 8 und 240 kW an. Als Basismotoren dienen überwiegend Motoren von Lombardini und Mercedes. Daneben werden auch Pkw und Kleintransporter verschiedener Typen von der Firma KPM Krahwinkel z.T. mit Komponenten der Firma Hausmann umgerüstet.

**OIKO Energy GmbH** bietet seit dem Jahre 2000 anschlussfertige Pflanzenöl-BHKW im Leistungsbereich von 4-500 kW<sub>el</sub>, bislang mit einem Schwerpunkt im unteren Leistungsbereich von 4 bis 35 kW<sub>el</sub> an. Verwendung finden indirekt einspritzende Motoren der Hersteller Kubota und direkt einspritzende Motoren von Perkins, die nach den Vorgaben von OIKO Energy umgerüstet werden.

Die **Firma MANN Naturenergie GmbH & Co. KG** bietet BHKW-Lösungen (inklusive Peripherie) für Pflanzenöl überwiegend im höheren Leistungsbereich (430 kW<sub>el</sub>, bis 4 MW<sub>el</sub>) an. Als Basismotor dienen v.a. Schiffsdieselmotoren des dänischen Herstellers MAN B&W, die an den Einsatz von Pflanzenöl angepasst wurden.

Die Firma **Natur-Energie-Technik Dosch & Stumpf GbR** bietet Pflanzenöl-BHKW in allen Leistungsklassen an. Bis etwa 24 kW<sub>el</sub> werden Wirbelkammermotoren der Firma Antoria, im mittleren und oberen Leistungsbereich direkt einspritzende MAN-Motoren verwendet. Die Umrüstung umfasst im Wesentlichen die Vorglühanlage und das Kraftstoffsystem.

Die Firma **Naturpower** Pflanzenöltechnik rüstet indirekt und direkt einspritzende Dieselmotoren für den Betrieb mit Pflanzenöl um. Neben Motoren für Pkw und Nfz werden auch Stationärmotoren für BHKW umgerüstet. Das Umrüstkonzept entstammt aus einer eigenen Entwicklung und basiert auf einem Zweitanksystems.

Die Firma **Giese, Energie- und Regeltechnik GmbH** bietet Pflanzenöl-BHKW bis ca. 30 kW<sub>el</sub> auf Basis von Wirbelkammermotoren der Firma Kubota an.

Neben den hier genannten, sind noch weitere Anbieter von Umrüstungen, z.T. als Lizenzträger der oben genannten Firmen, z.T. auch mit eigenen Entwicklungen auf dem Markt. Da eine vergleichende Untersuchung verschiedener Umrüstkonzepte nicht vorliegt, können Aussagen über die Funktionstüchtigkeit der verschiedenen

Techniken nicht gemacht werden. Es ist daher empfehlenswert sich bei den Umrüstern umfassend über Technik, Fortbestand der Betriebserlaubnis, Referenzen, Garantieleistungen, Wartungsaufwand etc. zu informieren, um dann für den jeweiligen Bedarfsfall eine Entscheidung treffen zu können. Eine aktuelle Liste mit Herstellern bzw. Umrüstern von pflanzenöлтаuglichen Motoren für unterschiedliche Einsatzzwecke kann auf den Internetseiten der Landtechnik Weihenstephan [http://landtechnik.weihenstephan.de/pflanzoel/pfloel\\_home.html](http://landtechnik.weihenstephan.de/pflanzoel/pfloel_home.html) abgerufen werden. Die gleiche Auflistung enthält Tabelle 8 des vorliegenden Berichtes (Stand November 2001). Firmen, die derzeit auch pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke anbieten sind (ohne Wertung und Anspruch auf Vollständigkeit) in Tabelle 7 mit einer Auswahl ihrer Produkte aufgelistet.

### 3.6 Übersicht pflanzenölauglicher BHKW

Tabelle 7: Pflanzenöl-BHKW verschiedene Anbieter – Stand November 2001  
(Firmenangaben; kein Anspruch auf Richtigkeit und Vollständigkeit)

Einsatz	BHKW-Typ	Leistung			Kraftstoffverbr.
		kW <sub>mech</sub>	kW <sub>el</sub>	kW <sub>th</sub>	l/h
<b>AAN Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH</b> (früher: TMW) Alte Leipziger Straße 50, 99735 Bielen/Stadt Nordhausen, Tel.: 03631/918350					
BHKW	AAN-BP 8-F	10	8	18	3,3
Basismotor:	AAN-BP 10-F	13	10	23	4,3
Faryman	AAN-BP 16-F	20	16	35	6,9
	AAN-BP 22-F	27	22	48	9,2
BHKW	AAN-BP 100-A	112	104	141	29,5
AAN-Motor	AAN-BP 120-A A	130	121	161	34,2
Basis: MAN	AAN-BP 170-A AL	183	170	194	46,0
	AAN-BP 200-A AL	215	200	208	53,8
	AAN-BP 240-A AL	257	240	297	67,1
	AAN-BP 285-A AL	305	285	335	79,7
	AAN-BP 310-A AL	328	310	369	83,9
	AAN-BP 360-A AL	380	360	395	95,5
<b>Giese Energie- und Regeltechnik GmbH</b> Huchenstr. 3, 82178 Puchheim, Tel.: 089/8001551 BHKW von 5,5 bis 30 kW <sub>el</sub> (Basismotor Kubota)					
<b>Konrad Weigel Energietechnik</b> Hauptstraße 33, 92342 Freystadt-Sulzkirchen, Tel.: 09179/5880					
BHKW	KWE 8P-3		8	16	3,1
Basismotor:	KWE 12P-4		12	24	4,7
Kubota	KWE 15P-5		15	26	5,8
	KWE 20P-4		20	35	6,8
<b>MANN Naturenergie GmbH &amp; Co. KG</b> Schulweg 8-14, 57520 Langenbach/Ww., Tel.: 02661/6262-52					
BHKW Basismotor:			430-	430-	
MAN B&W			4000	4000	
<b>MWS – Löschenkohl &amp; Mitter Motorenwerk Schönebeck GmbH</b> (früher: AMS, DMS) Barbarastr. 9, 39218 Schönebeck, Tel.: 03928 / 4540					
BHKW Basismotor:	BHAP-96PL	104	96	125	28,7
MWS MF4/6RTA-G	BHAP-144PL	154	144	175	40,3
<b>Natur-Energie-Technik</b> Bocksbeutelstraße 2, 97337 Dettelbach, Tel.: 09324/980899 BHKW bis ca. 24 kW <sub>el</sub> : Basismotor Antoria, darüber: auf Basis von MAN-Motoren					
<b>OIKO Energy GmbH</b> Pilgerndorf 40, 96142 Hollfeld, Tel.: 09206 / 992425					
BHKW	OIKO KWK 120	5	4	10	1,5
Basismotor Kubota	OIKO KWK 150	8	6	12	2,1
		15	12	20	3,1
		23	18	34	7,0
		42	35	60	9,8
BHKW		55	50		15
Basismotor Perkins		83	75		18
		112	100		28
		273	250		62
		550	500		130

### 3.7 Übersicht Hersteller und Umrüster pflanzenöлтаuglicher Motoren

Tabelle 8: Hersteller/Umrüster pflanzenöлтаuglicher Motoren - Stand November/2001 (kein Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit)

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Pkw	Nfz	BHKW
<b>AAN</b> Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH Herr Dr. H.-J. Kampmann	Alte Leipziger Straße 50 D-99735 Bielen/Stadt Nordhausen Phone: ++49/(0)3631/918350 Telefax: ++49/(0)3631/918340 <a href="http://www.aan-energie.de/">http://www.aan-energie.de/</a>		✓	✓
<b>ATG</b> Autozubehör-Technik Glött GmbH	Gartenstraße 11 D-89353 Glött Phone: ++49/(0)9075/8644 Telefax: ++49/(0)9075/8804 <a href="http://www.diesel-therm.de/">http://www.diesel-therm.de/</a>	✓	✓	
<b>Auto Pielmeier</b> Herr Pielmeier	Wiedenhof 1 D-93167 Falkenstein Phone: ++49/(0)9462/706 Telefax: ++49/(0)9462/5205 <a href="http://www.pflanzenoel-technik.de/">http://www.pflanzenoel-technik.de/</a>	✓		
<b>Bio Car</b> Lohmann Prototypenbau Herr G. Lohmann	Welfenstraße 12 D-81541 München Phone: ++49/(0)89/484837 Telefax: ++49/(0)89/484837 <a href="http://www.biocar.de/">http://www.biocar.de/</a>	✓	✓	
<b>Elsbett</b> Technologie GmbH Herr G. Elsbett	Weißerburger Straße. 15 D-91177 Thalmässing Phone: ++49/(0)9173/77940 Telefax: ++49/(0)9173/77942 <a href="http://www.elsbett.com/">http://www.elsbett.com/</a>	✓	✓	(✓)
<b>Giese</b> Energie- und Regeltechnik GmbH Herr Giese	Huchenstr. 3, D-82178 Puchheim Phone: ++49/(0)89/8001551 Telefax: ++49/(0)89/801849 <a href="http://www.giese-gmbh.de/">http://www.giese-gmbh.de/</a>			✓
<b>Hausmann</b> Lackiererei Karosserie Herr S. Hausmann	Am Angertor 3 D-97618 Wülfershausen Phone: ++49/(0)9762/506 Telefax: ++49/(0)9762/506	✓	✓	(✓)
<b>Henkelhausen</b> GmbH & Co. KG Herr von Quirstorp Herr Schiffer	Hafenstr. 51 D-47809 Krefeld Phone: ++49/(0)2151/574-207 Telefax: ++49/(0)2151/574-112 <a href="http://www.henkelhausen.com/">http://www.henkelhausen.com/</a>		✓	(✓)

Fortsetzung Tabelle 8

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Pkw	Nfz	BHKW
<b>Konrad Weigel</b> Energietechnik Herr K. Weigel	Hauptstr. 33 D-92342 Freystadt-Sulzkirchen Phone: ++49/(0)9179/5880 Telefax: ++49/(0)9179/90562			✓
<b>KPM</b> Pflanzenöl-Marine-Motoren Herr J. Krahwinkel	Ahlershof 18 D-56112 Lahnstein Phone: ++49/(0)2621/40550 Telefax: ++49/(0)2621/18398 <a href="http://www.krahwinkel-kpm.de/">http://www.krahwinkel-kpm.de/</a>	✓	✓	(✓)
<b>KTV-Greenpower</b> Herr B. Schnitzer	Schlingenerstraße 2-3 D-87668 Rieden Phone: ++49/(0)8346/9206-15 Telefax: ++49/(0)8346/9206-11 <a href="http://www.krueger-tv.de/">http://www.krueger-tv.de/</a>	✓	✓	
<b>MANN Naturenergie</b> GmbH & Co. KG Herr S. Döring Herr M. Mann	Schulweg 8-14 D-57520 Langenbach/Westerwald Phone: ++49/(0)2661/6262-52 Telefax: ++49/(0)2661/6262-55 <a href="http://www.emil-mann.de/">http://www.emil-mann.de/</a>			✓
<b>Max Stangl</b> Landtechnik Herr M. Stangl	Mooser Strasse D-94554 Moos Langenisarhofen Phone: ++49/(0)9938-327 Telefax: ++49/(0)9938-1577		✓	
<b>MWS Löschenkohl &amp; Mitter</b> Motorenwerk Schönebeck GmbH Herr M. Tabatzki	Barbarastraße 9 D-39218 Schönebeck Phone: ++49/(0)3928/4540 Telefax: ++49/(0)3928/613		✓	✓
<b>Natur-Energie-Technik</b> Dosch & Stumpf G.b.R. Herr M. Stumpf	Bocksbeutelstraße 2 D-97337 Dettelbach Phone: ++49/(0)9324/980-899 Telefax: ++49/(0)9324/980-811	✓	✓	✓
<b>Naturpower</b> Pflanzenöltechnik Herr J. Heinrich	Weinberge 26 D-15806 Zossen Phone: ++49/(0)3377/302307 Telefax: ++49/(0)3377- 302308 <a href="http://www.naturpower.de/">http://www.naturpower.de/</a>	✓	✓	(✓)
<b>OIKO Energy GmbH</b> Herr H. Stephan	Pilgerndorf 40 D-96142 Hollfeld Phone: ++49/(0)9206/992425 Telefax: ++49/(0)9206/992426 <a href="http://www.oikoenergy.de/">http://www.oikoenergy.de/</a>			✓

Fortsetzung Tabelle 8

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Pkw	Nfz	BHKW
<b>Raps Bio Power System</b> Herr E. Bugelmüller	Espanstraße 6 D-90602 Seligenporten Phone: ++49/(0)9180/2263 Telefax: ++49/(0)9180/930778 <a href="http://www.rpsbiopowersystem.de/">http://www.rpsbiopowersystem.de/</a>	✓	✓	
<b>TCB Technik-Center Bastorf GmbH</b> Herr J. Schupeta	Kühlungsborner Str. 27 D-18230 Bastorf Phone: ++49/(0)38293/40414 Telefax: ++49/(0)38293/40427 <a href="http://www.tcb-bastorf.de/">http://www.tcb-bastorf.de/</a>		✓	
<b>Thomas Gruber KG</b> Herr Höpfinger	Schweppermannstr. 36 D-84539 Ampfing Phone: ++49/(0)8636/50235 Telefax: ++49/(0)8636/50231		✓	
<b>VWP</b> Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie GbR Herr T. Kaiser	Am Steigbühl 2 D-90584 Allersberg Phone: ++49/(0)9174/2862 Telefax: ++49/(0)9174/2621 <a href="http://www.pflanzenoel-motor.de/">http://www.pflanzenoel-motor.de/</a>	✓	✓	(✓)
<b>Wolf</b> Pflanzenöl-Technik Herr H. Wolf	Ringstr. 28 D-97508 Untereuerheim Phone: ++49/(0)9729/6948 Telefax: ++49/(0)9729/6948 <a href="http://www.wolf-pflanzenoel-technik.de/">http://www.wolf-pflanzenoel-technik.de/</a>	✓		
<b>3 E GmbH</b> Herr H.-W. Janßen	Schotten 6 D-25554 Nortorf/Wilster Phone: ++49/(0)4823/92964 Telefax: ++49/(0)4823/920761 <a href="http://www.dreieqmbh.de/">http://www.dreieqmbh.de/</a>	✓	✓	(✓)



## 4 Systeme zur Abgasnachbehandlung

Zur nachmotorischen Minderung der Abgasemissionen sind für den Dieselmotor die Abgasrückführung und Abgasreinigungssysteme wie Oxidationskatalysatoren, Katalysatoren zur Entstickung (Denox-Katalysatoren) und Partikelabscheidesysteme verfügbar. Durch den sehr niedrigen Schwefelgehalt von Pflanzenöl ist der Einsatz von Abgaskatalysatoren bei Pflanzenölmotoren besonders geeignet.

Als Grundlage für nachfolgende Technologieübersicht zur Abgasnachbehandlung diente Fachliteratur, Informationsmaterial sowie Gespräche mit Katalysatorherstellern.

### 4.1 Abgasrückführung

Bei der Abgasrückführung (AGR) wird dem Abgas des Motors ein definierter Teilstrom entnommen und der Ansaugluft beigemischt. Die dadurch bedingte Verminderung des Sauerstoffgehalts im Brennraum führt zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Vor allem die thermische NO-Bildungsrate (nennenswerte NO-Bildung ab ca. 2200 K) wird aus den folgenden zwei Gründen gesenkt [67]:

1. Der geringere Sauerstoffgehalt im Zylinder bewirkt, dass zur Deckung des Sauerstoffbedarfs eine größere Gasmenge durch die Flammenfront transportiert werden muss als beim Motorbetrieb ohne Abgasrückführung. Der höhere Masseudurchsatz führt bei gleicher Wärmezufuhr (annähernd gleicher Brennverlauf) im post-flame-Bereich zu niedrigeren Temperaturen.
2. Die spezifische Wärmekapazität des rückgeführten Abgases ist größer als die von Luft.

Bei einer AGR-Rate von 20 % lassen sich bei Dieselmotoren  $\text{NO}_x$ -Reduktionsraten zwischen 40 und 80 % erreichen.

Der bei der Abgasrückführung für die  $\text{NO}_x$ -Reduzierung verantwortliche geringere Sauerstoffanteil im Zylinder bewirkt gleichzeitig einen Anstieg der Rußemissionen,

vor allem im mittleren und oberen Lastbereich und mit zunehmender Abgasrückführungsrate. Dies drückt sich durch die Erhöhung der Schwärzungszahl nach Bosch aus. Grund für die Erhöhung der Rußemissionen ist die verminderte Nachoxidation des Rußes während der zweiten Phase der Verbrennung.

Der geringere Sauerstoffanteil und die niedrigere Verbrennungstemperatur im Verbrannten haben eine Zunahme des Kraftstoffverbrauchs und damit eine Abnahme des Wirkungsgrades im mittleren und oberen Lastbereich zur Folge.

## 4.2 Oxidationskatalysator

Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung von chemischen Reaktionen (Oxidation und Reduktion) herab und erhöhen gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit [17]. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe (CO, HC) und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus, an der die Molekülbindungen gelockert werden. Dadurch wird die Aktivierungsenergie der chemischen Reaktion erheblich vermindert. Im Anschluss an die katalytische Umsetzung verlassen die Endprodukte wieder den Katalysator. Der Katalysator selbst wird dabei nicht verändert.

Abgaskatalysatoren bestehen aus einer Trägerschicht, einer Zwischenschicht (Washcoat) und einer katalytisch aktiven Schicht. In Europa haben sich Monolith-Katalysatoren mit einem keramischen oder metallischen Trägermaterial durchgesetzt, während in den USA auch Schüttgutkatalysatoren zum Einsatz kommen. Um eine große wirksame Oberfläche zu erhalten und den Durchströmungswiderstand möglichst gering zu halten, werden bei den Monolith-Katalysatoren Wabenkörper mit hohen Zelldichten (ca. 62 Zellen/cm<sup>2</sup>) und dünnen Kanalwänden (0,15-0,30 mm) verwendet. Der „Washcoat“ erhöht die katalytische Aktivität der Edelmetallbeschichtung (Platin/Palladium-Gemisch beim Dieselmotorkatalysator).

Der Metallträger-Katalysator weist gegenüber dem Keramikträger eine dünnere Wandstärke auf. Bei gleicher Baugröße vermindert sich dadurch der Abgasgedruck, was einen geringeren Leistungsverlust und geringeren Kraftstoffmehrverbrauch zur Folge hat. Darüber hinaus ist ein Katalysator mit metallischem

Träger effektiver, dauerbeständiger und erreicht früher die Betriebstemperatur. Ein Nachteil ist dagegen, dass aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit und der geringeren Masse der Metallträger-Katalysator bei geringer Last schneller auskühlt und dann die Konvertierungsrate abnimmt.

Die Auswahl der Katalysatormaterialien ist besonders wichtig für die Wechselwirkung mit Schwefel. Bei hohen Temperaturen erfolgt die ungewollte Oxidation von  $\text{SO}_2$  zu  $\text{SO}_3$ , das zusammen mit Wasserdampf Schwefelsäuretröpfchen bildet, die sich an Rußpartikeln anlagern und die Gesamtpartikelmasse erhöhen (Abbildung 17). Außerdem können Schwefelverbindungen die katalytisch aktive Schicht überziehen, was zu einem verzögerten „Anspringen“ des Katalysators und einer mit der Zeit nachlassenden Umsetzungsrate führt [25], [56]. Das „Anspringen“ des Oxidationskatalysators ist bei Umsetzungsraten über 50 % definiert (ca. 170 °C). Der optimale Arbeitsbereich des Oxidationskatalysators liegt hinsichtlich der CO- und HC-Emissionen zwischen ca. 200 und 350 °C.

Innerhalb dieses Temperaturbereichs tragen Oxidationskatalysatoren auch verstärkt zur Partikelverminderung bei. Zwar bleibt die Rußmenge durch den Oxidationskatalysator weitgehend unverändert, aber die hochsiedenden gasförmigen Kohlenwasserstoffe werden vermehrt an der Katalysatorwand umgesetzt, so dass sie sich nicht an die Rußteilchen anlagern können. Dabei verringert sich auch der

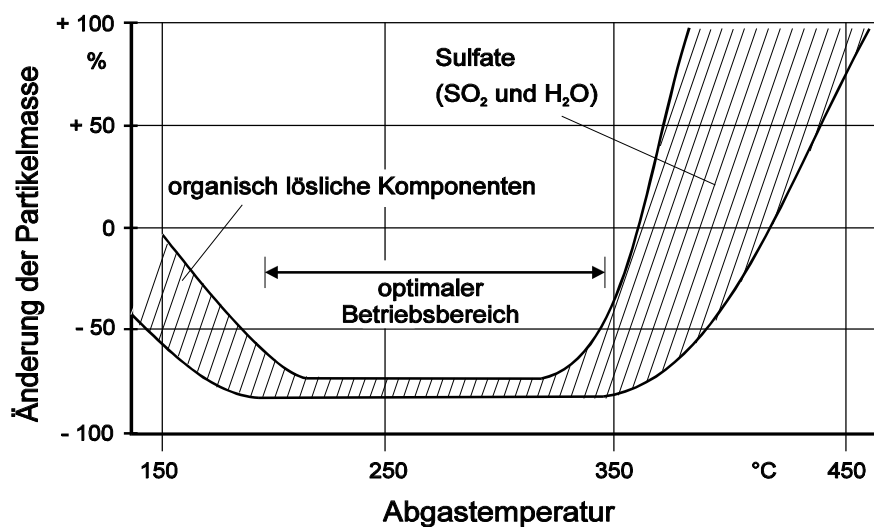


Abbildung 17: Einfluss der Abgastemperatur auf den Anteil der Partikel bei Verwendung eines Oxidationskatalysators [56]

Diesel-Abgasgeruch, der in erster Linie von den Kohlenwasserstoffen hervorgerufen wird. Mit sinkender Last, also mit abnehmender Abgastemperatur nimmt der Anteil hochsiedender Kohlenwasserstoffe, die sich am Ruß anlagern, wieder zu.

Durch die Oxidation von Aldehyden im Katalysator verringern sich bei Pflanzenölkraftstoffen zudem die typischen Geruchsemissionen, die im Verdacht stehen, eine gesundheitsschädliche Wirkung zu besitzen [65]. Die Konversionsraten für Aldehyde erreichen fast doppelt so hohe Werte bei speziell für den RME Betrieb entwickelten Katalysatorbeschichtungen als bei Dieselmotorkatalysatoren. Allerdings können diese hohen Umsetzraten erst nach dem „Anspringen“ des Katalysators und bei hohen Abgastemperaturen erreicht werden, wo die Aldehydemissionen ohnehin wesentlich niedriger als im unteren Lastbereich und während des Warmlaufens des Motors sind [71].

Die Oxidationskatalysatoren variieren in ihrer Auslegung vor allem in der Edelmetallart und dem Edelmetallgehalt, dem Volumen und der Zellzahl. Die Umsetzungsrate wird neben dem Kraftstoff-Luftverhältnis und der Temperatur auch noch durch die Kraftstoffart sowie dem Schwefel- und Phosphorgehalt beeinflusst. Während Schwefel für die Sulfatbildung und damit die Partikelbildung verantwortlich gemacht wird, kann sich Phosphor vor allem auf die Haltbarkeit des Katalysators auswirken [31], [43]. Allerdings liegen hierzu, speziell für Pflanzenölkraftstoffe, noch keine gesicherten Ergebnisse vor.

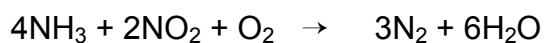
Aufgrund des von Natur aus sehr niedrigen Schwefelgehalts von Pflanzenöl sind Pflanzenölkraftstoffe sehr gut für den Einsatz von Oxidationskatalysatoren geeignet. Üblicherweise werden für Pflanzenöl ähnliche Katalysatorbeschichtungen (ohne dem Element Rhodium) verwendet wie beim Einsatz von Dieselmotorkraftstoff. Dennoch bestehen kraftstoffspezifische Optimierungsmöglichkeiten. Genauere Untersuchungen hierzu wären wünschenswert.

Oxidationskatalysatoren mit spezieller Beschichtung für den Einsatz von RME werden von der Firma **Oberland Mangold**, Garmisch-Partenkirchen angeboten. Diese werden auch für den Betrieb mit naturbelassenem Rapsöl empfohlen, sofern der Gehalt an Katalysatorgiften, wie z.B. Phosphor, die für RME üblichen Konzentrationen nicht übersteigt. Nach Angaben von Oberland Mangold wird die

für RME typische Abgasgeruchsbelästigung durch diese Katalysatoren vollständig beseitigt [63]. Des Weiteren werden bei optimaler Katalysator-Auslegung nach dem ECE R 49 Test (13 Stufen-Test) Konvertierungsraten bei den CO-Emissionen von bis zu 99 %, bei den HC-Emissionen von bis zu 90 % und bei der Partikelmasse von ca. 50 % erreicht. Auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen werden durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren leicht reduziert und liegen dann etwas unter dem Niveau der Emissionen von Dieseldieselkraftstoff ohne Katalysator. Die Lebensdauer der Katalysatoren entspricht bei ordnungsgemäßem Betrieb der Lebensdauer des Motors. Durch zeitweiligen Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff erhöhen sich die Emissionen, die Dauerbeständigkeit ändert sich dagegen nicht.

### 4.3 Denox-Katalysator

Der Denox-Katalysator stellt ein wirkungsvolles Verfahren zur Reduzierung von Stickstoffoxiden dar. Als Katalysatoren kommen überwiegend Titandioxid-getragene Vanadat/Wolframat-Kontakte zum Einsatz. Dabei wird vor dem Katalysator ein Reduktionsmittel (z.B. Ammoniak, Harnstoff, Kohlenwasserstoffe) in flüssigem oder gasförmigem Zustand dem Rauchgasstrom über ein Düsensystem zugeführt. Die Einspritzmenge richtet sich beim *SCR-Katalysator* (selective catalytic reduction) nach der aktuellen NO<sub>x</sub>-Rate im Abgas, der Temperatur und dem Aufbau des Katalysators. Beim Verfahren mit Ammoniak (NH<sub>3</sub>) oxidiert der im Ammoniak gebundene Wasserstoff mit dem freien und im NO<sub>x</sub> gebundenen Sauerstoff zu H<sub>2</sub>O, so dass Stickstoff (N<sub>2</sub>) übrig bleibt.



Die optimale Arbeitstemperatur dieser Katalysatoren liegt zwischen 250 und 450 °C [58]. Dabei werden Umsetzraten von 80 bis über 90 % erreicht. SCR-Katalysatoren werden derzeit auf Schiffen und bei Stationärmotoren eingesetzt. Für den Einsatz in Fahrzeugen wird aufgrund sicherheitstechnischer Bedenken, die das Mitführen des gesundheitsschädlichen Ammoniakgases betreffen, teilweise wässriger Harnstoff als Reduktionsmittel favorisiert, wobei durch thermolytische

Spaltung  $\text{NH}_3$  freigesetzt wird. Trotzdem sind eine Reihe von verfahrenstechnischen Schwierigkeiten, die Gewichtsproblematik, die mögliche Bildung unerwünschter Nebenprodukte und die nur bedingte Wintertauglichkeit zu nennen. Als weitere Reduktionsmittel können auch fester Ammoniak, aus dem bei Bedarf mit Hilfe eines Generators Ammoniakgas erzeugt wird oder fester Harnstoff, der einem System aus Hydrolyse-, SCR- und Oxidations-Katalysator zugeführt wird, eingesetzt werden.



Bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen zur NO-Reduktion kann ein nachgeschalteter Oxidationskatalysator eine zusätzliche HC-Emission verhindern. Die Kohlenwasserstoffe könnten dabei aus dem mitgeführten Kraftstoff gewonnen werden [89].

Renommierte Nutzfahrzeughersteller (MAN, Mercedes-Benz, IVECO) haben unter Leitung der Siemens AG die SCR-Technik heute auch für mobile Zwecke realisiert. Der Katalysator soll nach Siemens-Angaben die Stickstoffoxidemissionen um ca. 70 % reduzieren, ohne dabei die Motorleistung zu beeinträchtigen. Durch die katalytische  $\text{NO}_x$ -Reduktion ist es möglich verbrauchsärmere Motoren mit höheren Betriebstemperaturen einzusetzen (z.B. Direkteinspritzer), ohne dabei eine thermisch bedingte  $\text{NO}_x$ -Erhöhung im Abgas in Kauf nehmen zu müssen. Die Mehrkosten von derzeit ca. 10.000 DM können durch die Einsparung von Dieseltreibstoff teilweise oder komplett ausgeglichen werden. Die betriebsabhängige Dosierung des reduzierenden Harnstoffs regelt eine elektronische Steuereinheit, die die aktuellen Motordaten erfasst. Neben der Entstickung werden teilweise auch unverbrannte an Rußpartikeln angelagerte Kohlenwasserstoffe oxidiert. Allerdings erfordert dieses Verfahren einen zusätzlichen Tank für den Harnstoff. Der Harnstoffverbrauch wird mit 3-4 % des Kraftstoffverbrauchs angegeben.

Ein weiteres Verfahren zur Rauchgasentstickung stellt die selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) der Stickstoffoxide zu Stickstoff  $\text{N}_2$  und Wasser dar. Dabei werden Ammoniakwasser oder Harnstofflösung direkt in den Verbrennungsraum gesprüht. Diese SNCR-Methode wird in erster Linie bei großtechnischen Anlagen angewandt.

Unerwünschte Begleitreaktionen bei Denox-Katalysatoren können die partielle Reduktion von NO zu N<sub>2</sub>O sowie die Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub> vor allem bei tief-temperaturaktiven Katalysatoren auf Basis von Platinmetall-Katalysatoren sein oder die partielle Oxidation von HC zu CO bei hochtemperaturaktiven Katalysatoren auf Basis von Übergangsmetallausgetauschten Zeolithen [86]. Darüber hinaus kann ein Durchbrechen von überschüssigem Reduktionsmittel (z.B. NH<sub>3</sub>) zu Ammoniakemissionen führen, was aber durch eine nachgeschaltete Oxidationsstufe verhindert werden kann [89].

#### 4.4 Partikelfilter

Die höchsten Abscheideraten bei hoher Dauerbeständigkeit und guter Regenerationsfähigkeit ergeben sich mit keramischen Monolithfiltern (Zellenfiltern), Keramikgarn-Wickelfilter oder Sintermetallfiltern. Die Wickelfilter verfügen über eine hohe spezifische Speicherkapazität, Unempfindlichkeit gegen Überlastung und Thermoschock sowie über eine geringe Verstopfungsneigung. Die Monolith- und Sintermetallfilter zeichnen sich dagegen durch höhere Abscheideraten und besseres Gegendruckverhalten aus. Der Grad der Abscheidung ist von der Drehzahl und vom mittleren effektiven Druck abhängig und beträgt bis zu 90 %. Mit zunehmender Betriebszeit verringern die zurückgehaltenen Partikel den freien Filterquerschnitt und erhöhen den Abgasgedruck. Damit der Filter nicht verstopft und die Motorleistung aufgrund des hohen Abgasgedrucks nicht wesentlich sinkt ist eine regelmäßige Regeneration des Filters notwendig.

Die Regeneration erfolgt üblicherweise durch eine Nachverbrennung des Rußes im Filter. Dies setzt voraus, dass genügend Sauerstoff vorhanden ist und die benötigte Zündtemperatur (ca. 600 °C) im Dieselabgas erreicht wird. Darüber hinaus darf die zulässige Betriebstemperatur nicht überschritten werden und die Emissionsgrenzwerte müssen auch während der Regeneration eingehalten werden. Da die notwendige Zündtemperatur nur bei Vollast erreicht wird sind zur Einleitung der Regeneration unterschiedliche Verfahren möglich:

- katalytische Beschichtung der Filteroberfläche auf der Rohgasseite
- Zusatz eines katalytisch wirkenden Kraftstoffadditivs

- Regeneration durch Zusatzenergie (elektrisch oder Dieselmotor)

Partikelfiltersysteme finden derzeit zum Teil in Pkw, hauptsächlich aber in Nutzfahrzeugen und Omnibussen Anwendung, wobei sich im Serieneinsatz vor allem Systeme mit thermischer Zusatzenergie zur Filterregeneration befinden.

#### 4.5 Kombinationen von Abgasreinigungssystemen

Für eine besonders effektive Abgasreinigung können zwei oder mehr der oben genannten Abgasnachbehandlungstechniken sinnvoll miteinander kombiniert werden. Besonders geeignet ist eine derartige Kombination in Anbetracht der erhöhten Investitionskosten und des notwendigen Raumbedarfs für größere stationäre Anlagen insbesondere dann, wenn es gilt, strenge Auflagen der Luftreinhaltung zu erfüllen.

Partikelfilter sind neben der Luftreinhaltung auch für den Einsatz in Verbindung mit der Abgasrückführung bei DI-Motoren interessant (Verminderung von  $\text{NO}_x$ ), da das gereinigte, zurückgeführte Abgas bei diesen Motoren weniger zu Verkokungen im Brennraum führt.

Zur Reduzierung der Partikelemissionen kann der Partikelfilter mit einem Oxidationskatalysator kombiniert werden, der die Nachverbrennung hochsiedender Kohlenwasserstoffe übernimmt, die erst hinter dem Partikelfilter kondensieren. Dabei werden auch die im gefilterten Ruß sorbierten Kohlenwasserstoffe, die während der Lastspitzen oder während der Regeneration desorbiert werden, umgesetzt. Die Kombination kann baulich durch eine katalytische Beschichtung des Keramikträgers auf der Reingasseite des Partikelfilters bewerkstelligt werden.

Demgegenüber ist bei dem von **HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co** in Menden entwickelte CRT-System (Continuously Regenerating Trap) ein hocheffizienter Oxidationskatalysator dem Dieselpartikelfilter vorgeschaltet. In Deutschland wurden CRT-Systeme erstmals 1995 bei der PESAG in Paderborn eingesetzt. Beim Stadtbuseinsatz werden problemlos Abgastemperaturen oberhalb 200 °C erreicht, wodurch im Oxidationskatalysator die CO- und HC-Emissionen mit einem hohen



Wirkungsgrad umgesetzt werden. Die am Rußfilter abgeschiedenen Partikel werden mit Hilfe von  $\text{NO}_2$ , das am vorgeschalteten Oxidationskatalysator aus einem Teil des  $\text{NO}$  gebildet wird, oxidiert. Zur Vermeidung von Schwefelsäurebildung ist ein niedriger Schwefelgehalt im Kraftstoff erforderlich. Versuche mit RME ergaben Reingasemissionen von  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  und Partikeln bis zum Bereich der Nachweisgrenze [52]. In Zusammenarbeit mit dem Katalysatorhersteller Johnson Matthey und der PESAG wird derzeit von der HJS ein mit einer SCR-Stufe kombiniertes CRT-System (SCRT-System) beim Einsatz eines Stadtbusses getestet [34].

Auch der Einsatz eines Oxidationskatalysators nach einem Denox-Katalysator kann zur Verminderung der  $\text{NO}_x$ -,  $\text{HC}$ -,  $\text{CO}$ - und Partikelmasse-Emissionen sinnvoll sein und verhindert gleichzeitig das unerwünschte Durchbrechen von überschüssigem Reduktionsmittel, wie z.B.  $\text{NH}_3$ .

Die Firma **HUG Engineering AG** hat ein Abgasreinigungssystem mit drei hintereinander geschalteten Stufen entwickelt (vgl. Abbildung 18). Das Dieselabgas gelangt zuerst zu einem Faserrußfilter, der Feinpartikel aus dem Abgasstrom filtert und an der katalytisch imprägnierten Oberfläche ohne Fremdenergie abbrennt. Daran schließt sich die SCR-Stufe an, wo das  $\text{NO}_x$  in dem mit Harnstoff angereicherten Abgas in wabenförmigen feinzelligen Katalysatoren zu Stickstoff reduziert wird. Schließlich werden die Kohlenwasserstoffe und das Kohlenmonoxid beim Durchströmen der edelmetallbeschichteten Keramikwaben oxidiert.

Abschließend werden in Tabelle 9 die wichtigsten Abgasreinigungssysteme mit ihren Funktionsweisen gegenübergestellt.

Tabelle 9: Abgasreinigungssysteme für Dieselmotoren (nach [95])

<b>Oxidationskatalysator:</b>	<b>Denox-Katalysator:</b>	<b>Partikelfilter:</b>
Oxidation von $\text{HC}$ -, $\text{CO}$ -Emissionen, Aldehyden, organisch löslichen Partikelbestandteilen und geruchsintensiven Stoffen mit oder ohne Entstickungsfähigkeit	$\text{NO}_x$ -Reduktion in Anwesenheit von Sauerstoff im Abgas Selektive katalytische Reaktion (SCR) mit Harnstoff als Reduktionsmittel Nicht selektive katalytische Reaktion (NCR) mit $\text{HC}$ als Reduktionsmittel	Rußabscheiden und Regeneration durch aktive oder passive Maßnahmen

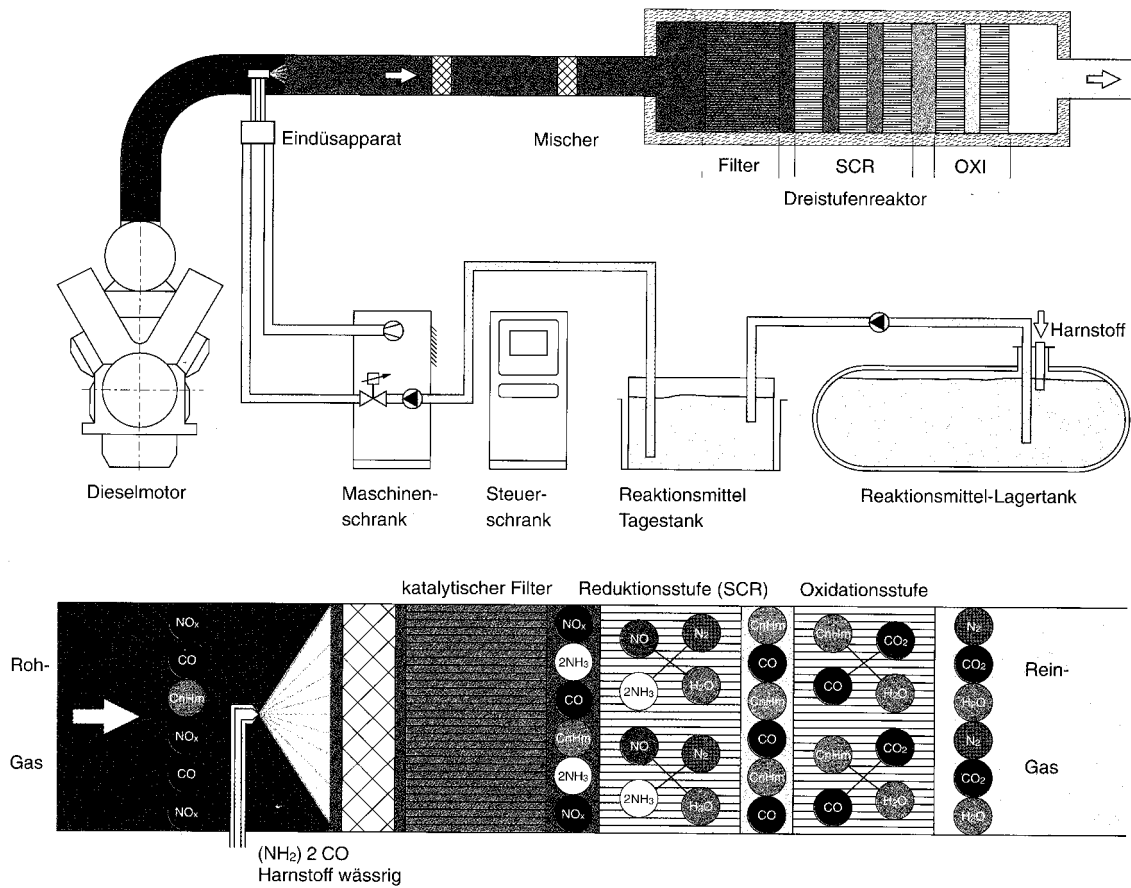


Abbildung 18: Dreistufiges Abgasreinigungsverfahren mit katalytischem Rußfilter, SCR-Stufe und Oxidationsstufe (HUG Engineering AG [35])

#### 4.6 Anbieter von Abgasreinigungsanlagen

In Tabelle 10 werden zwei Hersteller von Abgasreinigungsanlagen aufgeführt mit Produkten (Oxidationskatalysatoren), die speziell für den Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen optimiert wurden. Dabei werden spezielle katalytische Beschichtungen verwendet, mit denen in größeren Temperaturbereichen bessere Umsetzungsraten erzielt werden können.

Daneben können auch herkömmliche Dieselmotorkatalysatoren bei der Reinigung von Abgasen bei Pflanzenölbetrieb eingesetzt werden, die sehr hohe Konvertierungsraten erzielen. Diese werden unter anderem von den in Tabelle 10 und Tabelle 11 genannten Firmen angeboten. Eine umfangreiche Zusammenstellung dieser und weiterer Anbieter von Abgasreinigungstechnologien erfolgt auch unter [http://www.dieselnet.com/dir\\_c.shtml](http://www.dieselnet.com/dir_c.shtml).

Tabelle 10: Anbieter von Abgasreinigungssystemen speziell für den Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Anbieter	Abgasreinigungstechnologie	Einsatz
<b>HUG Engineering GmbH</b> Zeithstr. 298 53721 Siegburg Tel.: 02241/380347 <a href="http://www.hug-eng.ch">http://www.hug-eng.ch</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Rußfilter</u> Faserrußfilter mit automatischem Abbrand der Feinpartikel an der katalytisch imprägnierten Faseroberfläche bei Betriebstemperatur</li> <li>• <u>SCR-Verfahren</u> Reduktionsmittel: Harnstoff (z.T. Ammoniak)</li> <li>• <u>Oxidationskatalysator</u> Mit Edelmetallen beschichtete Keramikwaben</li> <li>• <u>Kombination</u>: Rußfilter/SCR-Stufe/Oxidationsstufe</li> </ul>	Diesel-, Gas-, Schweröl- oder Pflanzenölmotoren; meist stationärer Einsatz
<b>Oberland Mangold GmbH</b> Amselstr. 4 D-82467 Garmisch-Partenkirch. Tel.: 08821 / 9338-0 <a href="http://www.oberland-mangold.de/">http://www.oberland-mangold.de/</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Rußfilter</u></li> <li>• <u>Oxidationskatalysator</u> Metallträger; spezielle katalytische Beschichtungen jeweils für Diesel-, RME- und Pflanzenölbetrieb</li> </ul>	Diesel-, Gas- und Pflanzenölmotoren, mobiler und stationärer Einsatz

Tabelle 11: Anbieter von Komponenten bzw. kompletten Abgasreinigungssystemen für Verbrennungsmotoren (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Anbieter	Abgasreinigungstechnologie	Einsatzbereich
<b>Eberspächer</b> Eberspächerstr. 24 D-73730 Esslingen Tel.: 0711/939-00 <a href="http://www.eberspaecher.de/">http://www.eberspaecher.de/</a>	Oxidationskatalysator Denox-Katalysator	Gas-, Otto- Dieselmotoren v.a. für mobilen Einsatz
<b>Emitec Gesellschaft für Entwicklungstechnologie mbH</b> Hauptstraße 150 D-53797 Lohmar Tel.: 02246/109-0 <a href="http://www.emitec.de/">http://www.emitec.de/</a>	Metallträger (beheizbar)	Gas-, Otto- Dieselmotoren v.a. für mobilen Einsatz
<b>Engelhard Emission Control Products</b> Hannover Tel.: 0511/2886638 <a href="http://www.engelhard.com/">http://www.engelhard.com/</a>	Rußfilter Katalysatorertechnik	Dieselmotoren für mobilen und stationären Einsatz
<b>Greentop GmbH</b> Air Condition and Filter Systems Lindenhof 2 D-61279 Grävenwiesbach Tel.: 06086/9627-0 <a href="http://www.greentop.de/">http://www.greentop.de/</a>	Rußfilter Katalysatorertechnik	Dieselmotoren
<b>Max Rhodius GmbH</b> Treuchtlinger Str. 23, D-91781 Weissenburg Tel.: 09141/919-0 <a href="http://www.rhodius.com/">http://www.rhodius.com/</a>	beschichtete Drahtgestricke für Katalysatoren	diverse
<b>Nett Technologies Inc.</b> P.O. Box 43134, Mississauga, Ontario, Canada L5B 4A7 Tel.: (905) 602-7747, <a href="http://www.nett.ca/">http://www.nett.ca/</a>	Rußfilter Katalysatorertechnik	Dieselmotoren für mobilen und stationären Einsatz
<b>Paas Technologies, Inc.</b> 1843 West Choke Cherry Drive Louisville, CO 80027, USA Tel.: (303) 665 3347 <a href="http://www.paastek.com">http://www.paastek.com</a>	Rußfilter Oxidationskatalysator	Dieselmotoren für mobile und stationäre Anwendungen, Untertagemotoren
<b>PCH Energie- und Umwelttechnik GmbH</b> Schmerbachstr. 48 D-53804 Much Tel.: 02245/3555	Rußfilter Oxidationskatalysator	Dieselmotoren
<b>Siemens AG</b> <b>Energieerzeugung KWU</b> D-96257 Redwitz Tel.: 09574/81-0	Rußfilter SCR-Verfahren Oxidationskatalysator	Gas-, und Dieselmotoren für mobilen und stationären Einsatz

## 5 Abgasemissionen

### 5.1 Grundlagen der Verbrennung

Die Reaktion der brennbaren Bestandteile eines Brennstoffs mit Sauerstoff, bei der chemisch gebundene Energie frei wird, bezeichnet man als Verbrennung. In realen Motoren erfolgt die Verbrennung der Kraftstoffbestandteile unvollständig und verlustbehaftet. Somit befinden sich nach der Verbrennung von schwefelhaltigem Kraftstoff neben den Produkten Kohlendioxid, Wasser und Schwefeldioxid auch noch Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Rußpartikel und Stickstoffoxide im Abgas.

Die dieselmotorische Verbrennung kann in folgende Einzelvorgänge untergliedert werden [58]:

- Einspritzung
- Einspritzstrahlzerfall
- Kraftstoffverdampfung
- Diffusion
- Zündung
- Verbrennung

Beim Dieselmotor wird der Kraftstoff gegen Ende des Kompressionstaktes in den Brennraum gespritzt, in dem sich hoch verdichtete Luft befindet. Der Einspritzverlauf und damit auch der Verbrennungsvorgang hängt wesentlich von der konstruktiven Ausführung der Einspritzanlage ab. Der Kraftstoff gelangt zunächst als Strahl in den Zylinder, wo er dann durch innere Pulsationskräfte und Luftreibung in kleine Kraftstofftröpfchen zerstäubt wird, die sich je nach Größe und Geschwindigkeit weiter teilen. Die Kraftstoffteilchen erwärmen sich an der erhitzten Luft, wobei sich um sie eine Kraftstoffdampfhülle bildet. Diese vermischt sich mit der umgebenden Luft, wodurch ein zündfähiges Gemisch entsteht. Die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Zündung (ca. 1-2 ms) wird Zündverzug genannt, der in den physikalischen und den chemischen Anteil unterschieden wird. Letzterer umfasst die unmittelbar vor der Zündung ablaufenden Reaktionen und wird insbesondere durch die Kraftstoffeigenschaften sowie den im Brennraum herrschenden Druck

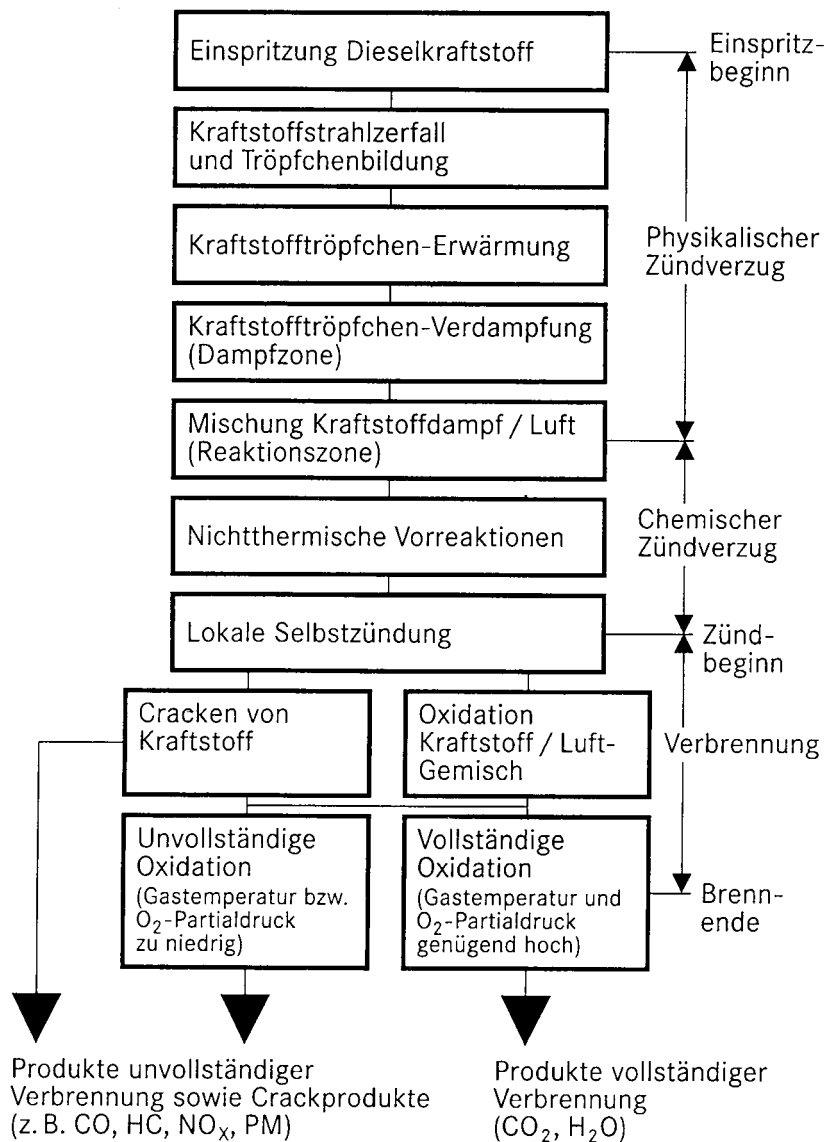


Abbildung 19: Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung [58]

und die Temperatur beeinflusst. Da die Gemischbildung und die Dauer des Zündverzugs bereits maßgebliche Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen haben, können kraftstoffseitige Faktoren wie

- Kraftstoffqualität,
- Kraftstofftemperatur,
- Einspritzdruck
- und Einspritzzeitpunkt

oder luftseitige Faktoren wie

- Druck und Temperatur der Luft im Brennraum,
- Vermischung der Luft mit Restgas
- und die Ladungsbewegung im Brennraum

für die Optimierung des Verbrennungsprozesses im Dieselmotor ausschlaggebend sein. Diese Parameter verändern sich in Abhängigkeit von Last und Drehzahl des Motors. Konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Verbrennung sind:

- Verbrennungsverfahren und Brennraumform,
- Verdichtungsverhältnis
- Ventilsteuerzeiten
- Kühlmitteltemperatur, Einlasskanalgestaltung

Während der Anfangsphase der Zündung wird weiter Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt, was zu einer inhomogenen Kraftstoff/Luft- und Temperaturverteilung im Brennraum führt, die sich während des Brennverlaufs ständig ändert. Bei lokalem Sauerstoffmangel oder niedrigem Temperaturniveau kommt es dabei zur unvollständigen Verbrennung von hochsiedenden Kohlenwasserstoffen und damit zur Bildung von Schadstoffen, wie z.B. Ruß.

## 5.2 Entstehung von Abgasemissionen

Je nach Brennverfahren, innermotorischer Gemischbildung und den örtlichen Luftverhältnissen kommt es zur Bildung von teilverbrannten und unverbrannten Stoffen wie Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC).

Von SCHULZ et al. 1997 [71] wurden experimentelle Untersuchungen zu grundlegenden Reaktionen bei der Verbrennung und zur Bildung organischer Bestandteile sowie Ruß durchgeführt. Um gleichbleibende Versuchsbedingungen zu gewährleisten und verschiedene Einflussfaktoren deutlich voneinander unterscheiden zu können, wurde n-Hexadekan (Cetan) als homogener Kraftstoff verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass anhand der Verbrennungsdauer und Verbrennungstemperatur 4 Reaktionstypen zu unterscheiden sind, die zu jeweils unterschiedlichen Reaktionsprodukten führen (Abbildung 20).

- Beim ersten Reaktionstyp entstehen als intermediäre Produkte kurzkettige Radikale, die sich schließlich wieder zu größeren Molekülen bis hin zu PAH oder Rußpartikeln zusammensetzen (Detail siehe Abbildung 21).
- Beim zweiten Reaktionstyp erfolgt - bei etwas geringerer Temperatur und längerer Reaktionsdauer - ein thermisches Cracken der Hexadekanmoleküle. Aus den intermediären Fragmenten werden  $\alpha$ -Olefine und Methan gebildet.
- Unter milder Oxidation (Reaktionstyp 3) werden Aldehyde gebildet. Zwischenprodukte wurden in den Versuchen von SCHULZ [71] nicht gefunden. Da keine Bildung von Zwischenprodukten und ein erneuter Aufbau der Moleküle erfolgt, entstammen die Aldehyde direkt aus veränderten Kraftstoffbestandteilen. Sie entstehen bevorzugt bei 250 - 400 °C.

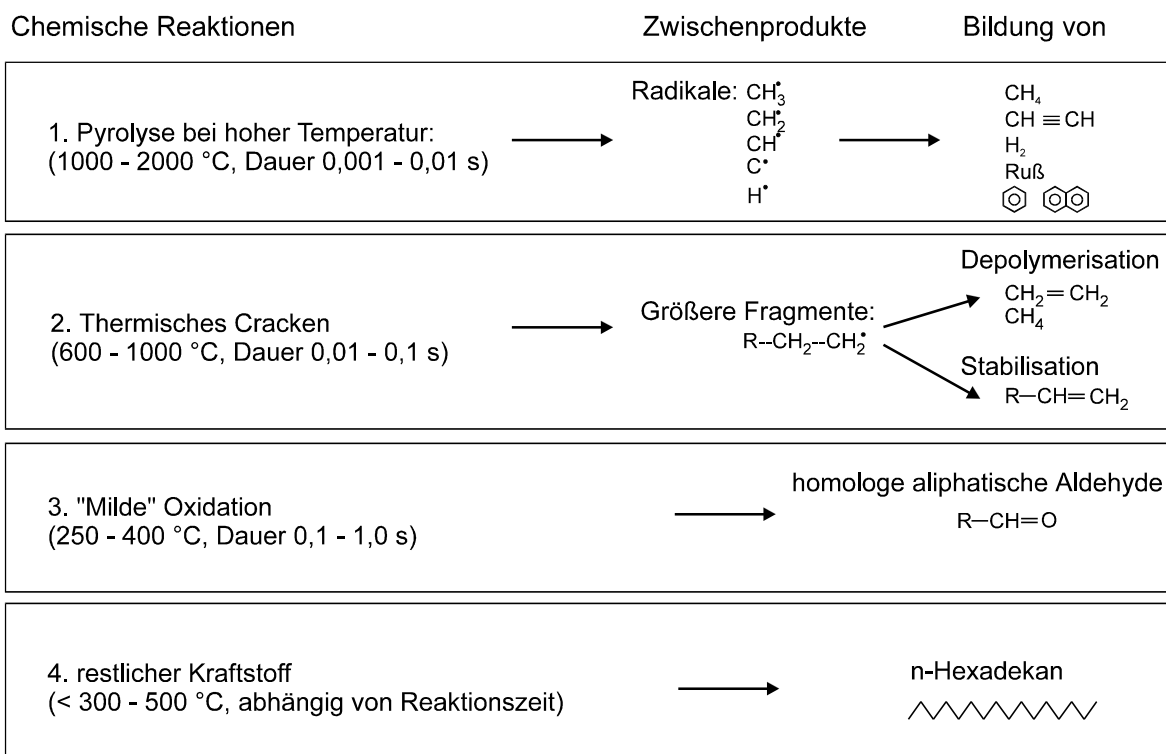
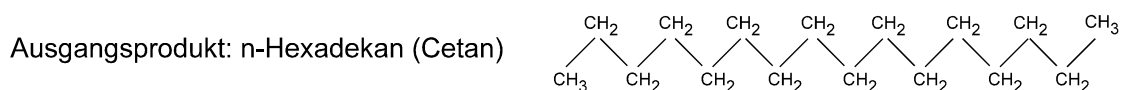


Abbildung 20: Chemische Reaktionen bei der Bildung von organischen Abgasbestandteilen und Ruß in einem Dieselmotor mit Hexadekan (Cetan) als Kraftstoff (SCHULZ et al. [71])



- Im Reaktionstyp 4 werden unverbrannte Kraftstoffmoleküle emittiert, die im Brennraum an Stellen mit niedriger Temperatur, z.B. an kühlen Zylinderwänden, überdauert haben.

Die unter Typ 1 aufgeführte Reaktion ist in Abbildung 21 ausführlicher dargestellt. Neben der Neubildung von Rußpartikeln können über das Zwischenprodukt Acetylen auch aromatische Verbindungen entstehen. Aufgrund der gleichen Ausgangsradikale ist die Bildung beider Komponenten - Ruß und Ringverbindungen (BTX, PAH) - stets miteinander verbunden und der Übergang der Schadstoffe fließend.

**Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)** entstehen ganz allgemein bei der Verbrennung von organischem Material (z.B. Kraftstoff) bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffmangel. Zwar erfolgt der Betrieb von Dieselmotoren unter Luftüberschuss, aber infolge der inhomogenen Gemischaufbereitung kommt es im Brennraum lokal zu Sauerstoffdefiziten. Ausgehend von Kohlenwasserstoffen können sich über das Zwischenprodukt Acetylen durch Polymerisation und Ringschluss aromatische Systeme bilden. Einige der auf Grundlage dieser Reaktionen entstandenen PAH sind thermisch soweit stabil, dass sie sich im Abgas nachweisen lassen [46].

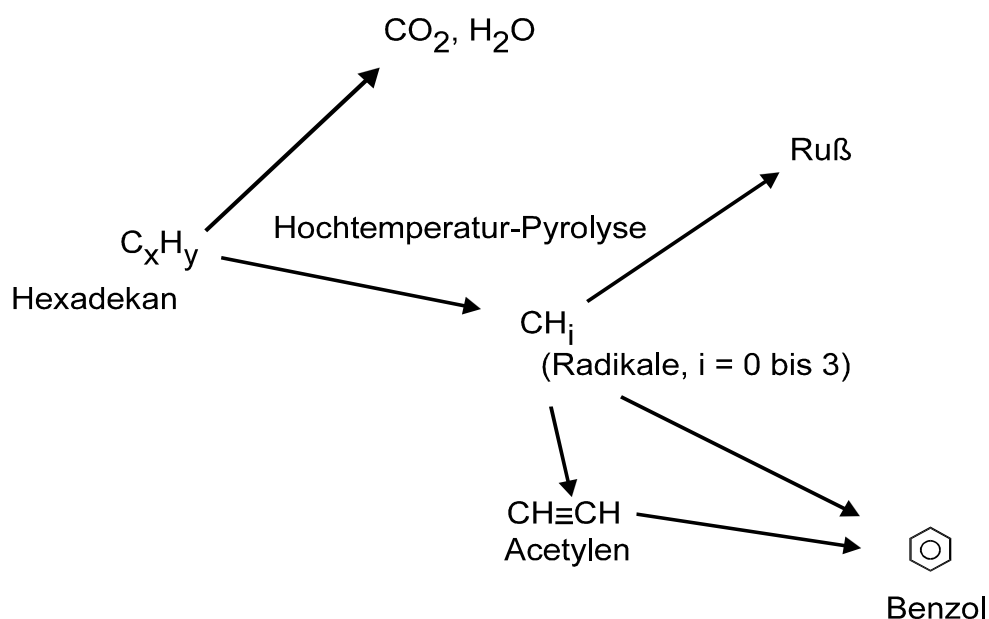


Abbildung 21: Schema der Ruß-, Acetylen- und Benzolbildung (SCHULZ et al. [71])

**Partikel** sind die nach Verdünnung des Abgases mit Luft auf einem Probenfilter bei einer Temperatur von maximal 52 °C gesammelten Stoffe aus dem Abgas. Hierzu zählen im Wesentlichen *Ruß*, *hochsiedende Kohlenwasserstoffe*, die am Ruß angelagert sind, und *Sulfate*.

Die Entstehung von Partikelemissionen hängt entscheidend vom Verbrennungsablauf ab und erfolgt unter den gleichen Voraussetzungen wie die PAH-Bildung. Mit zunehmendem Zusammenschluss von Acetylenmolekülen nimmt der Kohlenstoffanteil unter Wasserstoffabspaltung zu bis sich daraus *Rußteilchen* bilden. Die örtliche Rußbildung während des Verbrennungsvorgangs ist vor allem eine Funktion von Temperatur, örtlichem Brennstoff/Luftverhältnis und Druck. Im Dieselmotor entsteht Ruß hauptsächlich in Verbrennungszonen fetten Gemisches. Bei der Mischung von fetten, rußhaltigen Gemischzonen mit sauerstoffhaltigen Zonen kommt es aber auch zur Rußoxidation, die durch hohe Temperaturen im Brennraum begünstigt wird. Für das geringere Rußmaximum bei hoher Drehzahl sind vor allem zwei Gründe anzuführen:

- Mit steigender Drehzahl nimmt der Einspritzdruck und damit die Kraftstoffzerstäubung zu, was zu einer weniger inhomogenen Mischung mit weniger fetten Zonen führt.
- Bei höherer Drehzahl sind die Wärmeverluste bei der Kompression geringer und damit die Temperaturen höher, die die Rußoxidation verbessern.

Der zweite wichtige Bestandteil der Partikelemissionen sind die am Ruß angelagerten *Kohlenwasserstoffe*. Sie entstehen durch unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes, z.B. bei [33]:

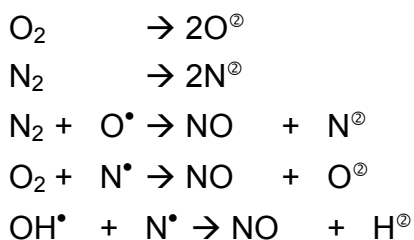
- Erlöschen der Flamme in besonders mageren Bereichen bei sinkender Temperatur im Brennraum während der Expansion
- Erlöschen der Flamme in der Nähe der vergleichsweise kalten Brennraumwand
- Verlangsamtem Abdampfen von auf die Brennraumwand gelangtem Kraftstoff
- Kraftstoffrückständen an der Einspritzdüse nach Beendigung des Einspritzvorgangs
- Unvollständiger Verbrennung von Öl, das von den Ventilschäften und vom Zylinderrohr in den Brennraum gelangt

*Sulfate* entstehen durch die Oxidation des im Kraftstoff enthaltenen Schwefels. Da Pflanzenölkraftstoffe von Natur aus nahezu schwefelfrei sind, stellen Emissionen von Schwefelverbindungen kein Problem dar. Auch die Wirksamkeit von Abgaskatalysatoren bleibt aufgrund des niedrigen Schwefelgehalts länger erhalten. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber mineralischem Dieselmotorkraftstoff.

Eine weitere wichtige Abgaskomponente sind die **Stickstoffoxide** ( $\text{NO}_x$ ), die einerseits aus dem Luftstickstoff und andererseits aus dem Stickstoff des Kraftstoffes entstehen können. Letzteres spielt allerdings bei der motorischen Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff kaum eine Rolle, da dieser kaum stickstoffhaltige Verbindungen enthält. Inwiefern dies bei den Pflanzenölkraftstoffen eine Rolle spielt (schwankender Gehalt an stickstoffhaltigen Inhaltsstoffen, Beitrag des Sauerstoffes im Kraftstoffmolekül), ist noch ungeklärt.

Neben der Hauptkomponente  $\text{NO}$  entstehen auch in geringen Mengen  $\text{NO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$ .  $\text{NO}$  oxidiert erst bei Abkühlung ( $< 650\text{ °C}$ ) im Auspuff bzw. an der Atmosphäre zu  $\text{NO}_2$ . NEUENDORF [59] nennt für die  $\text{NO}$ -Bildung zwei Vorgänge, die thermische  $\text{NO}$ -Bildung und die Prompt- $\text{NO}$ -Bildung. Haupteinflussgrößen sind die Temperatur, der Sauerstoffgehalt (O-Radikale) und die Verweilzeit. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 22 dargestellt.

Die thermische  $\text{NO}$ -Bildung findet mit Sauerstoff statt nach:



Die Prompt- $\text{NO}$ -Bildung läuft mit OH-Radikalen ab nach:

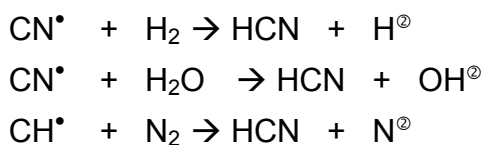


Abbildung 22: Thermische  $\text{NO}$ -Bildung und Prompt- $\text{NO}$ -Bildung (NEUENDORF [59])

**Aldehydemissionen** setzen sich aus einer Mischung von Aldehyden unterschiedlicher Molekülgrößen und Konzentrationen zusammen. Dabei gilt, dass mit steigender Anzahl von C-Atomen die gemessene Konzentration im Abgas sinkt. Bei der motorischen Verbrennung sind daher niedermolekulare Komponenten wie Formaldehyd ( $C_1$ ), Acetaldehyd ( $C_2$ ) und Acrolein ( $C_3$ ) von besonderer Bedeutung.

Als Zwischenprodukt bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen verhält sich die Aldehydkonzentration im Abgas ähnlich der von unverbrannten Kohlenwasserstoffen [65]. Dies deutet auf eine stark temperaturabhängige und damit auch lastabhängige Bildung bei der motorischen Verbrennung hin.

Aus den oben dargestellten Zusammenhängen geht hervor, dass in Abhängigkeit der Bedingungen bei der Verbrennung eine starke Aufgliederung der Gesamtemissionen in einzelne Komponenten stattfindet. Die mengenmäßigen Anteile dieser Komponenten werden nachfolgend beschrieben.

### 5.3 Zusammensetzung der Abgase

Die jeweiligen Konzentrationen der Schadstoffe sind vom Verbrennungsprinzip des Motors und vom eingesetzten Kraftstoff abhängig [46]. Die typische Zusammensetzung der Abgase aus Dieselmotoren beim Betrieb mit mineralischem Kraftstoff wurden nach KLINGENBERG [42] und MAY [56] zusammengestellt. Die Komponenten sind in Abbildung 23 wiedergegeben.

Für einige Komponenten wurden Mitte der 60er Jahre in den USA und Mitte der 70er Jahre in Europa erstmals Emissionsgrenzwerte festgelegt, die seither in regelmäßigen Zeitabständen verschärft wurden. Sie gelten für die sogenannten „gesetzlich limitierten“ Abgaskomponenten (HC, CO,  $NO_x$ , Partikel). Die nicht in der Gesetzgebung aufgenommenen Komponenten werden als „nicht limitierte“ Komponenten bezeichnet.

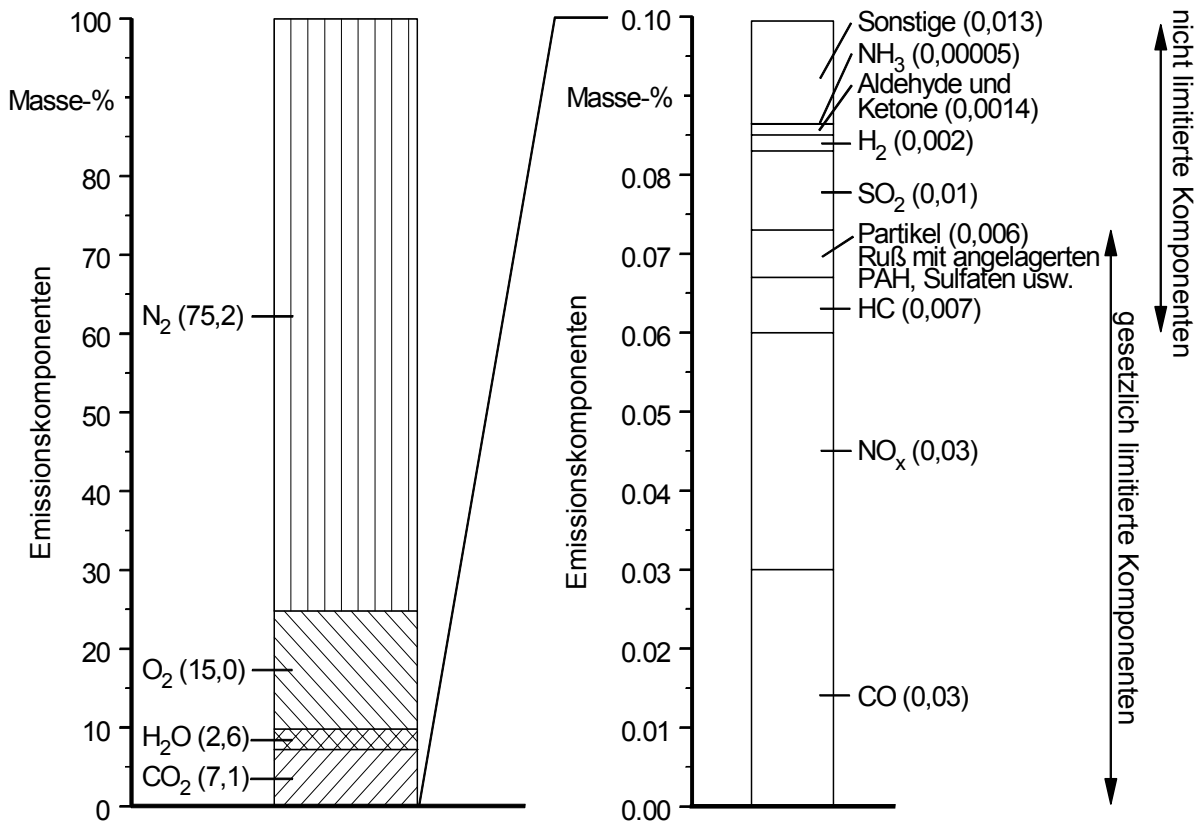


Abbildung 23: Typische Aufteilung der Abgaskomponenten beim Dieselmotor ohne Oxidationskatalysator (nach KLINGENBERG [42] und MAY [56])

Zu beachten ist, dass

- die gesundheitlich und ökologisch relevanten Komponenten (außer CO<sub>2</sub>) mit nur 0,1 Masse-% einen sehr geringen Anteil der Gesamtemissionen ausmachen, und dass
- bei der Aufteilung in limitierte und nicht-limitierte Komponenten Überschneidungen auftreten. Innerhalb der Partikel und Kohlenwasserstoffe sind z.B. die nicht-limitierten Stoffe Ruß, Sulfate, PAH, Metalloxide und weitere Kohlenwasserstoffe wie Methan, Ethan, Ethylen, Acetylen, Benzol, Toluol, Xylol usw. enthalten (die letzten drei Komponenten werden auch als BTX-Komplex bezeichnet).

#### 5.4 Einflussparameter von Dieselkraftstoff auf die Emissionen

Die Zusammensetzung der Abgase hängt maßgeblich vom Ablauf der Verbrennung ab. Der Verbrennungsablauf wiederum wird neben der hier nur am Rande betrachteten Motortechnik insbesondere auch von den Kraftstoffmerkmalen beeinflusst. Mit zunehmender Verschärfung der Abgasgesetzgebung steigt der Druck, die Kraftstoffe zusammen mit den Motoren hinsichtlich eines besseren Abgasverhaltens zu optimieren. So hat die Europäische Kommission ein Programm initiiert, wonach, einem amerikanischen Beispiel folgend, Vertreter der Auto- und Mineralölindustrie unter Zuhilfenahme unabhängiger Berater zukünftige Maßnahmen für eine verbesserte Luftqualität auf technisch einwandfreie Grundlagen stellen sollen (EPEFE; European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies). Dabei wurde unter anderem auch der Einfluss verschiedener Parameter von mineralischen Kraftstoffen in modernen Otto- und Dieselmotoren untersucht.

Die Ergebnisse des europäischen EPEFE-Programms beschreiben den Einfluss von Dieselkraftstoff-Eigenschaften auf die HC- CO- NO<sub>x</sub>- und Partikelmasse-Emissionen durch eine Gleichung in Abhängigkeit von der Dichte, den Polyaromaten und der Cetanzahl. Durch Verbesserung der Kraftstoffe kann somit ein Beitrag zur Verminderung von Abgasemissionen geleistet werden. Allerdings sind diese Maßnahmen weniger wirkungsvoll als Fortschritte in der Motoren- und Katalysator-technologie [4].

Das Minderungspotential wird für Dieselkraftstoff bei den limitierten Schadstoffen (CO, HC, NO<sub>x</sub> und Partikelmasse) auf bis zu 30 % und bei derzeit noch nicht limitierten Komponenten, wie z.B. PAH oder Aldehyde, zwischen 0 bis nahezu 100 % geschätzt [28]. Eigenschaften wie hohe Cetanzahl und niedriger Schwefelgehalt wirken sich bei mineralischen Dieselkraftstoffen insbesondere auf die Verminderung von Partikelemissionen aus. Daneben konnte auch ein signifikanter Einfluss von Kraftstoffdichte, Polyaromatenmenge und Siedeverhalten auf die Emissionen festgestellt werden.

Bei einem Kraftstoff mit niedriger Cetanzahl ergibt sich im Motorbetrieb ein längerer Zündverzug. Dies führt vor allem bei Teillast zu einer weiteren Ausbreitung des Kraftstoffstrahls vor dem Beginn der Verbrennung. Dadurch treten verstärkt Zonen mit mageren Gemischen außerhalb des Strahlkerns auf, die nicht vollständig

verbrennen und so die Entstehung von Kohlenwasserstoffen und Partikeln begünstigen. Gleichzeitig steigen auch die Konzentrationen polyzyklisch aromatischer Kohlenwasserstoffe an. Niedrige Ansauglufttemperaturen und kalte Zylinderwände können z.B. beim Kaltstart dazu führen, dass ein Kraftstoff mit niedriger Cetanzahl erst in der Expansionsphase zündet. Dies wirkt sich besonders ungünstig auf die Rauch- und Partikelemissionen aus [33].

Untersuchungen von DABELSTEIN [13] zum Einfluss von Eigenschaften mineralischen Dieselkraftstoffs haben ergeben, dass Verbesserungen hinsichtlich Zündwilligkeit und Siedeverhalten (früheres Siedeende) eine deutliche Absenkung der Kohlendioxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelemissionen bewirken. Kammermotoren reagierten dabei wesentlich empfindlicher als Direkteinspritzer, was darauf hindeutet, dass auch der Motoreinfluss von großer Bedeutung ist.

Bei LANGE [49], [50] wird davon berichtet, dass die Cetanzahl die  $\text{NO}_x$ -Emissionen am stärksten von allen Kraftstoffparametern beeinflusst. Dabei nimmt die  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Abgas mit steigender Cetanzahl nichtlinear ab. Die Partikelemissionen sind laut Untersuchungen von der Firma SHELL AG neben dem Kraftstoffschwefelgehalt primär auch von der Cetanzahl, dem Polyaromatengehalt ( $\text{Tri}^+$ -Aromaten) und der Kraftstoffdichte und nicht ursächlich, wie an anderen Stellen geschildert, vom Gesamtaromatengehalt des Kraftstoffs abhängig.

Seit kurzem wird in der DIN EN 590 der Gehalt an Polyaromaten im Dieselkraftstoff auf 11 Masse-% begrenzt, da hierdurch u.a. eine Absenkung der Partikelemission erwartet wird [47]. Das Problem einer verringerten Schmierfähigkeit, die im Zuge der Entschwefelung und gleichzeitiger Entfernung der Polyaromaten erfolgt, kann durch eine geeignete Additivierung behoben werden [87].

Die Partikelemission steigt beim US-Transient Test nichtlinear mit zunehmender Dichte und sinkender Cetanzahl an. Eine Verminderung der Partikelemission durch eine geringere Kraftstoffdichte geht allerdings ohne Anhebung der Einspritzmenge zu Lasten der Motorleistung, so dass beim Ausgleich durch eine Erhöhung der Einspritzmenge der Effekt der Dichteabsenkung wirkungslos bleibt.

Bei direkteinspritzenden Dieselmotoren kann es im Teillastbereich allerdings mit zunehmender Cetanzahl auch zu einer Erhöhung der Partikelemissionen kom-

men. Ursache dafür ist die durch den verkürzten Zündverzug bedingte schlechtere Kraftstoffausbreitung, was zu einer unvollständigen Verbrennung führen kann [79].

Der Einfluss des Schmieröls auf die Partikelemission lässt sich anhand der bisherigen Untersuchungen zwar nachweisen, allgemeingültige Zusammenhänge lassen sich daraus jedoch kaum ableiten. So verringert sich beispielsweise bei der Anwesenheit metallhaltiger Detergent-Additive im Schmieröl der Partikelaustritt, was auf einen verbesserten Rußabbrand zurückzuführen ist.

Bei TER RELE [77] konnten eindeutige Zusammenhänge zwischen Ablagerungen an den Einspritzdüsen und dem Emissionsniveau bei Dieselkraftstoff festgestellt werden. Dies bedeutet, dass verkokungsfördernde Kraftstoffeigenschaften nach längeren Motorlaufzeiten zu einem Anstieg von CH, CO und NO<sub>x</sub> führen können.

Im Rahmen der europäischen Kraftstoffrichtlinie vom 13. Oktober 1998 wurde der Schwefelgehalt von Dieselkraftstoff ab 1. Januar 2000 deutlich verringert, und zwar von 500 auf 350 ppm. Ab 2005 ist für alle Kraftstoffsorten ein maximaler Schwefelgehalt von 50 ppm (= 0,005 Gew.-%) verbindlich festgelegt worden. Der Schwefelgehalt ist für die Partikel- und SO<sub>2</sub>-Emissionen von Bedeutung. Außerdem beeinträchtigt er die Wirksamkeit von Katalysatoren, so dass davon auch indirekt CO, HC und NO<sub>x</sub>-Emissionen erhöht werden können. (LANGE et al. [48], ZELENKA [95]). Darüber hinaus werden moderne Steuersysteme, z.B. Board-Diagnoses-Systeme, durch Schwefelverbindungen im Abgas gestört, wodurch die Katalysatorüberwachung fehlerhaft sein kann [24]. Einer weiteren Absenkung des Schwefelgehaltes im Dieselkraftstoff steht der überproportional ansteigende Energiebedarf bei der Raffination entgegen [47]. Hinsichtlich des damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Anstiegs gilt die Faustregel, dass bei der Beseitigung der Menge Schwefel aus dem Kraftstoff, die zur Bildung einer Tonne SO<sub>2</sub> führen würde, etwa 10 Tonnen CO<sub>2</sub> entstehen [13].



Durch Zugabe bestimmter Kraftstoffzusätze, sogenannter **Additive**, können Kraftstoffeigenschaften verbessert werden. Moderne Dieseldieselkraftstoffe enthalten unterschiedliche Kombinationen von Wirksubstanzen zur:

- Erhöhung der Cetanzahl
- Vollständigeren Verbrennung von Kohlenstoffpartikeln (Rußminderung)
- Verminderung von Ablagerungen am Einspritzsystem
- Verschleißschutz verschiedener Motorbauteile
- Verbesserung der Lagerungsstabilität
- zum Korrosionsschutz im Kraftstoffsystem
- sowie zur Verbesserung weiterer Eigenschaften wie Fließfähigkeit, Geruchsbildung, Betankungsvorgang etc.

Eine Additivierung von naturbelassenem Pflanzenöl als Kraftstoff ist bislang nicht üblich.

Durch die Beimischung von Wasser zum Dieseldieselkraftstoff in Form einer **Kraftstoff/Wasser-Emulsion** können die Temperaturen im Brenngas herabgesetzt und das örtliche Luft/Kraftstoff-Verhältnis beeinflusst werden, was zu einer  $\text{NO}_x$ -Minderung im Abgas führt. BINDER [6] konnte bei Versuchen mit direkt- und indirekt einspritzenden Fahrzeugmotoren durch Einspritzung einer Emulsion mit mineralischem Diesel und einem Wassergehalt von 20 % eine deutliche  $\text{NO}_x$ - und Schwarzrauchreduzierung feststellen. Allerdings steigen vorwiegend aufgrund der niedrigeren Cetanzahl und des damit längeren Zündverzugs die HC-Emissionen vor allem im unteren Kennfeldbereich des Motors stark an. Zur Lösung dieses Problems werden derzeit Einspritzsysteme erprobt, die mit an das Motorkennfeld angepassten Mischungsverhältnissen oder durch Zudosieren von Wasser im Bereich der Düsenadel von der Art arbeiten, dass eine Wasserzugabe zu Beginn und Ende des Einspritzvorgangs vermieden wird.

Die Zusammenhänge machen deutlich, dass auch bei hochwertigem Dieseldieselkraftstoff Anstrengungen unternommen werden, Abgasemissionen durch Verbesserung der Kraftstoffqualität zu reduzieren. Dies ist durch bestimmte Raffinerieprozesse, Zugabe von Additiven zur gezielten Veränderung von Kraftstoffeigenschaften oder Zudosieren von Wasser möglich.

## 5.5 Immissionsschutz

Die motorische Nutzung von Pflanzenölen ist wie jeder Verbrennungsvorgang mit Emissionen luftverunreinigender Stoffe verbunden, wobei insbesondere Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Staub sowie Kohlenmonoxid (CO) und Gesamt-C (HC) mengenmäßig von Bedeutung sind. In Abhängigkeit von Art und Zusammensetzung des eingesetzten Kraftstoffs, der angewandten Motorentechnik und den Abgasreinigungseinrichtungen können zudem Schadstoffe wie krebserzeugende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und weitere organische Stoffe, wie z.B. geruchsintensive Verbindungen (z.B. Aldehyde), eine Rolle spielen. Auch das jeweilige Betriebsverhalten des Motors wirkt sich auf dessen Emissionen aus.

Für den Bereich der mobilen Motoren wurden deshalb verschiedene Prüfmodi zur Bestimmung der Abgaszusammensetzung entwickelt. Die Emissionen von **Personenkraftwagen** werden standardmäßig auf einem Rollenprüfstand ermittelt. Die durch den jeweiligen Zyklus bestimmte Fahrgeschwindigkeit wird zeitabhängig vorgegeben. Dabei werden die Konzentrationen der einzelnen Stoffe im Abgas kontinuierlich erfasst. Durch Integration der Messwerte lassen sich die Massenströme bezogen auf die Fahrstrecke in g/km darstellen. In Abhängigkeit von den typischen Einsatzbedingungen der Fahrzeuge werden spezielle Testzyklen angewandt, von denen die wichtigsten in Tabelle 12 zusammen gestellt sind. Manche Vorschriften verlangen die Einhaltung der Grenzwerte über eine vorgegebene Mindestbetriebsdauer. In diesen Fällen müssen die Grenzwerte um einen bei in Dauerläufen ermittelten Verschlechterungswert unterschritten werden.

Aufgrund der Typenvielfalt sowie dem Reifen- und Bremsenverschleiß auf dem Rollenprüfstand werden bei **Nutzfahrzeugmotoren** im Gegensatz zu Personenkraftwagen weltweit Emissionsprüfungen auf Motorprüfständen durchgeführt. Die angewandten Testzyklen (vgl. Tabelle 12) simulieren reale Fahrbetriebe. Dabei werden die Emissionen bei typischen Drehzahl/Last-Verhältnissen gemessen und auf die während des Tests vom Motor abgegebene Energie bezogen (g/kWh).

Für mobile Motoren zum Antrieb von Kraftfahrzeugen und schweren Fahrzeugen sind seit 2000 die Emissionswerte EURO 3 und ab 2005 die Emissionswerte nach EURO 4 einschlägig [20], die Anforderungen an die maximalen Konzentrationen von CO, HC,  $\text{NO}_x$  und Partikeln im Abgas stellen.

Tabelle 12: Wichtige Testverfahren/Richtlinien für Abgasuntersuchungen (nach [40], verändert; Originalquellen: [22], [42], [45], [58], [56], [61], [62])

Anwendung	Test/Richtlinie	Beschreibung (Anpassung)	Bemerkungen
PKW	FTP-75 Federal-Test-Procedure	typische Fahrt in Los Angeles (City und Highway)	direkt von Straßenfahrten übernommen, Rollenprüfstand
	HDC (Highway Driving Cycle)	typische Highway-Fahrt	direkt von Straßenfahrten übernommen Rollenprüfstand
	ECE-15-Test  ECE/EUDC (weitere Bezeichnungen: MVEG-Test oder EDC/EUDC)	europäische Fahrverhältnisse  europäische Fahrverhältnisse, Teil 1 Stadtfahrt, Teil 2 ergänzt mit Autobahnfahrt	„konstruierte“ Straßenfahrt, Rollenprüfstand  „konstruierte“ Straßenfahrt, Rollenprüfstand Messergebnisse zu HC und NO <sub>x</sub> zusammengefasst
LKW (NFZ)	ECE-R49- Test (13-Punkte-Test)	stationärer Test, Beanspruchung im Stadtverkehr, ebenfalls ergänzt um einen Anteil höherer Geschwindigkeiten	„konstruierte“ Straßenfahrt Motorprüfstand
	US-Transienttest	dynamisches Prüfverfahren (USA) Stadt und Fernverkehr hptsl. 8-Punkte bei Nenndrehzahl und Drehzahl oberhalb Leerlauf	„konstruierte“ Straßenfahrt, Motorprüfstand
	Japantest	stationärer 13-Punktetest, repräsentiert japanische Gegebenheiten	Motorprüfstand
Busse	„Münchener Stadtzyklus“	Stadtfahrt eines Busses, nicht genormt	direkt von Straßenfahrten übernommen, Rollenprüfstand
Schlepper	8-Punkte-Test	stationärer Test, auf Grundlage des 13-Punkte-Tests für Off-road-Fahrzeuge	Motorprüfstand
	5-Punkte-Test (nicht genormt)	stationärer Test, nur bei Nenndrehzahl	Motorprüfstand
Industriemotoren	ISO 8178	stationärer Test, Einzelpunkte je nach Anwendungszweck des Motors individuell gewichtet	Motorprüfstand und Einsatzort
Allgemein	VDI 2066	Staubmessung in strömenden Gasen	

Für Verbrennungsmotoren in mobilen Maschinen und Geräten (ausgenommen Motoren zum Antrieb von Kraftfahrzeugen bzw. landwirtschaftlichen Zugmaschinen) werden in einer Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.08.2001 [21] Emissionswerte für CO, Gesamt-C, NO<sub>x</sub>, und Partikel genannt, die im Rahmen der jeweiligen Typenprüfung unterschritten werden müssen.

Die Errichtung und der Betrieb von **stationären Verbrennungsmotoranlagen** (z.B. BHKW) fallen in den Geltungsbereich des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [26]. Gemäß Nr.1.4 des Anhangs zur 4. BImSchV [84] (Fassung vom 27.07.01) sind Verbrennungsmotoranlagen beim Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl ab 1 MW bis < 20 MW Feuerungswärmeleistung (FWL) - entspricht ca. 400 kW<sub>mech</sub> bis < 8 MW<sub>mech</sub> - nach Spalte 2 und ab 20 MW FWL nach Spalte 1 immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtig. Werden mehrere Aggregate eingesetzt, so wird die maßgebende Leistungsgrenze durch Aufsummieren der einzelnen Feuerungswärmeleistungen gebildet, sofern ein enger räumlicher und betrieblicher Zusammenhang gegeben ist (§ 1 Abs. 3 der 4. BImSchV).

Werden BHKW gemeinsam mit bereits eigenständig genehmigungspflichtigen Anlagen (z.B. mit Heiz- oder Dampfkesseln) betrieben, kann sich das Genehmigungsverfahren dieser Anlage auch auf das BHKW als Nebeneinrichtung erstrecken. So können z.B. auch Verbrennungsmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung < 1MW formell immissionsschutzrechtlich als Nebeneinrichtung genehmigungspflichtig werden.

Zur Begrenzung der Emissionen sind für immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtige BHKW die Emissionsbegrenzungen der TA Luft 86 [19] bzw. die sich hieraus ableitenden Werte der Konkretisierung der Dynamisierungsklauseln vom 06.08.1991 und des StMLU-Schreibens (UMS) (zum Rußfiltereinsatz bei stationär betriebenen Dieselmotoren) vom 29.11.1996 heranzuziehen (Tabelle 13). Daraus lassen sich die derzeit geforderten Emissionsgrenzwerte für den Pflanzenölbetrieb ableiten (Tabelle 14). Hinweis: Die TA-Luft wird derzeit überarbeitet. Bei Redaktionsschluss lag die neue TA-Luft noch nicht vor. Gemäß Referentenentwurf vom 11.09.2001 wird eine Verschärfung der Anforderungen in Bezug auf die Emissionsbegrenzungen von CO (auf 0,30 g/Nm<sup>3</sup>) und für Anlagen ab 3 MW FWL für NO<sub>x</sub> (auf 0,50 g/Nm<sup>3</sup>) diskutiert.

Tabelle 13: Wichtige immissionsschutzrechtliche Vorschriften für genehmigungsbedürftige Verbrennungsmotoranlagen > 1MW Feuerungswärmeleistung (FWL) (Selbstzündungsmotoren)

Schadstoff	Vorschrift	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,65 g/Nm <sup>3</sup>
Staub	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,13 g/Nm <sup>3</sup> (alter Grenzwert), Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1 (1991 Länderausschuss f. Immissionsschutz, LAI)	≥ 1 MW	50 mg/Nm <sup>3</sup> durch motorische Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
		< 1 MW	Zielwert: 80 mg/Nm <sup>3</sup> durch motorische Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	UMS <sup>**)</sup> vom 26.11.96	≥ 1 MW	20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern
< 1 MW		Zielwert: 20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit	
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	< 3 MW	≤ 4,0 g/Nm <sup>3</sup> , Ausschöpfung motorischer und anderer dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1	≥ 1 MW	Zielwert: 1,0 g/Nm <sup>3</sup> durch den Einsatz von Entstickungskatalysatoren (SCR)
krebserzeugende Stoffe	TA Luft 86, Nr. 2.3	≥ 1 MW	Minimierungsgebot (Einsatz v. Rußfiltern)
organische Stoffe	TA Luft 86, Nr. 3.1.7	≥ 1 MW	<input type="checkbox"/> Stoffe der Klasse I: 20 mg/Nm <sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 0,1 kg/h) <input type="checkbox"/> Stoffe der Klasse II: 0,10 g/Nm <sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 2 kg/h) <input type="checkbox"/> Stoffe der Klasse III: 0,15 g/Nm <sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 3 kg/h)

<sup>\*)</sup> angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm<sup>3</sup>), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

<sup>\*\*)</sup> Schreiben des StMLU

Für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) kleiner 1 MW sind derzeit keine allgemeingültigen Vorschriften zur Emissionsbegrenzung einschlägig. Diese Anlagen unterliegen nicht der Genehmigungspflicht nach dem BImSchG, sind jedoch baurechtlich genehmigungsbedürftig, sofern die Nennwärmeleistung 50 kW überschreitet. Im Rahmen der oben genannten Neuauflage der TA-Luft wird jedoch auch die Einführung von Emissionsbegrenzungen für stationäre Verbrennungsmotoranlagen mit einer FWL < 1 MW diskutiert. Emissionsbe-

grenzungen werden auch für diese Anlagen - unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff (Diesel, Heizöl, Pflanzenöl) - aus Sicht des Immissionsschutzes für erforderlich gehalten (Tabelle 15).

Die Kreisverwaltungsbehörden (unterer Immissionsschutz), die Bezirksregierungen und das Landesamt für Umweltschutz (in Bayern) bzw. die jeweilige Landesbehörde für Immissionsschutz können hier zur Beratung herangezogen werden. Aus den in Tabelle 13 genannten Vorschriften leiten sich für Pflanzenöl-BHKW derzeit die in Tabelle 14 und Tabelle 15 genannten Emissionsbegrenzungen ab.

Tabelle 14: Emissionsbegrenzungen für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Pflanzenöl-BHKW (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung  $\geq 1$  MW) [3], [96]

Schadstoff	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	$\geq 1$ MW	$\leq 0,65$ g/Nm <sup>3</sup>
Staub	$\geq 1$ MW	20 mg/Nm <sup>3</sup> entsprechend UMS v. 26.11.1996 (derzeit nur durch den Einsatz von Rußfiltern sicher zu gewährleisten)
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	$\geq 1$ MW	$\leq 1,0$ g/Nm <sup>3</sup> (durch Katalysatoren oder motorische Maßnahmen)
Gerüche/HC	$\geq 1$ MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

<sup>\*)</sup> angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm<sup>3</sup>), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Tabelle 15: Empfohlene Emissionsbegrenzungen (derzeitige Orientierungswerte) für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung  $< 1$  MW) [96]

Schadstoff	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	$< 1$ MW	$\leq 0,65$ g/Nm <sup>3</sup>
Staub	$< 1$ MW	Zielwert: 20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	$\geq 500$ kW $< 1$ MW	$\leq 2,5$ g/Nm <sup>3</sup> , (durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
	$< 500$ kW	$\leq 3,0$ g/Nm <sup>3</sup> , (Zielwert 2,5 g/Nm <sup>3</sup> , durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
Gerüche/HC	$< 1$ MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

<sup>\*)</sup> angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm<sup>3</sup>), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

## **6 Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren**

Pflanzenölkraftstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffen und Eigenschaften grundlegend von mineralischem Diesel (vgl. Kap. 2.2). Deshalb ist bei ihrer Anwendung eine veränderte Abgaszusammensetzung zu erwarten. Aber auch Qualitätsunterschiede einer Kraftstoffart können sich mitunter beträchtlich auf das Emissionsverhalten auswirken (vgl. Kap. 5.4).

### **6.1 Vorgehen**

Im Folgenden soll die Abgaszusammensetzung beim Einsatz von Pflanzenöl in dafür geeigneten Motoren unter besonderer Berücksichtigung des Kraftstoffeinflusses anhand von Literaturangaben aufgezeigt werden. Um eine möglichst breite Datenbasis zu gewährleisten, soll das Spektrum einzelner Abgaskomponenten von Motoren verschiedener Einsatzzwecke (mobil und stationär) beim Betrieb mit Pflanzenöl im Vergleich zu Diesel als Referenzkraftstoff betrachtet werden.

Zur Ergänzung und Überprüfung der in dieser Arbeit gefundenen Rechercheergebnisse dient eine Literaturstudie von TSCHÖKE.

In einem zweiten Teil werden dann Ergebnisse zu Emissionsmessungen verschiedener pflanzenölbetriebener Blockheizkraftwerke vorgestellt und bewertet.

### **6.2 Ergebnisse der Recherchen**

#### **6.2.1 Abgasemissionen beim Einsatz von Pflanzenöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff**

Insgesamt wurden 20 Literaturstellen aus den Jahren 1989-1997 ausgewertet. In Tabelle 16 wird aufgezeigt, wie viele Messwertangaben zu den einzelnen Emissionskomponenten beim Einsatz von Pflanzenöl für die verschiedenen Motorkonzepte vorliegen. Bei den Untersuchungen wurden in erster Linie Rapsöl, in einem Fall auch Sonnenblumen-, Lein- und Kokosöl als Kraftstoff verwendet. Dabei

kamen sowohl kaltgepresste als auch extrahierte Pflanzenöle unterschiedlicher Aufbereitungsformen (Raffinationsgrade) zum Einsatz. Genauere Angaben zur Kraftstoffqualität machte im Durchschnitt nur etwa ein Drittel aller Autoren (vgl. Tabelle 16).

Die Versuche wurden mit serienmäßigen Dieselmotoren oder mit an die Pflanzenöleigenschaften angepassten, bzw. speziell dafür konzipierten Pflanzenölmotoren für mobile und stationäre Anwendungen von insgesamt 6 Motorenherstellern (Deutz, Elsbett, AMS/DMS, TMW/AAN, Mahler, Kubota) durchgeführt. Etwa 17 % aller Emissionswerte wurden beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff in konventionellen meist großvolumigen Vorkammer-Dieselmotoren, 26 % in pflanzenöлтаuglichen Motoren im stationären und 57 % im mobilen Betrieb bestimmt.

Die untersuchten Motoren umfassen sowohl direkteinspritzende als auch Vor- bzw. Wirbelkammermotoren mit einem Leistungsbereich (mechanisch) von 13 bis 160 kW. Teilweise verfügen die Motoren über einen Abgasturbolader und Ladeluftkühlung. Systeme zur Abgasreinigung wie Oxidationskatalysator oder Rußfilter kamen bislang kaum zum Einsatz (vgl. Tabelle 16).

Die Emissionsmessungen wurden gemäß 7 verschiedener Prüfmodi durchgeführt (5-Punkte Test für Ackerschlepper nach Vellguth [82], 8-Punktetest, ECE-R 15,

Tabelle 16: Anzahl von Angaben zu Emissionsmessungen aus 20 Literaturquellen [1], [2], [7], [11], [18], [27], [29], [30], [37],[44], [45], [53], [57], [55], [60], [68], [69], [85], [88], [93]

		limitierte Abgaskomponenten				nicht limitierte Abgaskomponenten				Anteil Messungen mit Katalysator
		HC	CO	NO <sub>x</sub>	PM	PAH	Aldehyde u. Ketone	BTX	Dioxine u. Furane	
Dieselmotor		7	6	7	4	7	6	2	0	0
optimierter Motor für Pflanzenölbetrieb	mobil	24	27	23	16	10	7	4	0	6%
	stationär	11	14	14	15	3	8	0	0	3%
Angaben zur Kraftstoffqualität		36%	30%	34%	40%	55%	29%	17%	-	

Abgaskomponenten:

- HC: Kohlenwasserstoffe
- CO: Kohlenmonoxid
- NO<sub>x</sub>: Stickoxide
- PM: Partikelmasse
- PAH: polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
- BTX: Benzol, Toluol, Xylol

Auswertung:

- 20 Quellen (1991-1997)
- 6 Motorenfabrikate (Leistungsbereich: 13 - 160 kW)
- Indirekt- u. Direkteinspritzer, Abgasturboaufladung, Ladeluftkühlung
- Meßwertangaben absolut und relativ
- 6 verschiedene Prüfzyklen



ECE-R 24, ECE-R 49, FTP-75 und gemäß ISO 8178 „Hubkolben-Verbrennungsmotoren - Abgasmessung“ [15]). Je nach den dabei durchlaufenen Drehzahl/Lastzuständen ergeben sich testspezifische Emissions-Summenwerte, die nicht miteinander verglichen werden können. Deshalb werden in der Literatur neben den **absoluten** Werten mit den entsprechenden Bezugsgrößen (g/kWh; g/km, g/m<sup>3</sup>, ppm), häufig auch die **relativen** Werte im Vergleich zu den Abgaskonzentrationen, die mit Dieselkraftstoff gemessen wurden, angegeben.

Dazu gehören Gesamt-Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide sowie Partikelmasseemissionen. Weniger Ergebnisse liegen zu den derzeit nicht limitierten Abgaskomponenten wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), Aldehyde und Ketone und dem BTX-Komplex (Benzol, Toluol, Xylol) vor. Zu Dioxin- und Furanemissionen sind bislang keine Messungen bekannt.

Für eine Zusammenstellung der Literaturdaten eignen sich bei der vorliegenden geringen Datenbasis am besten die Relativwerte, weil diese unabhängig vom Testzyklus miteinander verglichen werden können.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass der Einsatz von Rapsölkraftstoff im Mittel etwa gleich hohe oder höhere Emissionen als Dieselkraftstoff (= 100 %) hervorruft, sofern keine Unterscheidung zwischen konventionellen und speziellen bzw. angepassten Pflanzenölmotoren getroffen wird (jeweils linke Fehlerbalken). Werden dagegen richtigerweise die speziellen oder angepassten Pflanzenöl-Motoren getrennt betrachtet, sind die Emissionen beim Betrieb mit Pflanzenöl in etwa gleich hoch oder niedriger als bei Dieselbetrieb (rechte Balken, Abbildung 24).

Im Einzelnen zeigt sich, dass die mittleren Konzentrationen von CO, HC und der Partikelmasse etwa um 50 % über den Emissionen von Dieselkraftstoff liegen. Die 34 bzw. 28 Einzelmesswerte von CO und HC zeigen, dass bei der Verwendung von Pflanzenöl sowohl eine Halbierung als auch eine Verdreifachung der Abgaskonzentrationen gegenüber dem Dieselbetrieb möglich ist. Bei einem konventionellen Wirbelkammermotor wurde mit dem instationären Testzyklus FTP 75 in einem Einzelfall eine um den Faktor 6 höhere Partikelmasseemission bei Pflanzenölkraftstoff verzeichnet.

Eine Erhöhung der Konzentration der **Gesamt-Kohlenwasserstoffe** (HC) im Abgas bei der Verbrennung von Pflanzenölkraftstoff über das Niveau des Dieselmotors kann u.a. auf „unangepasste“, nur bedingt pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren zurückgeführt werden. Aufgrund der für den niedrig-viskosen Dieselmotorkraftstoff konzipierten Motoren wird das Kraftstoff/Luft-Gemisch im Brennraum nur ungenügend aufbereitet. Dadurch kommt es zu Zonen fetten Gemisches, in denen die Verbrennung unvollständig abläuft (vgl. Kap. 5.2). Zudem erschwert der höhere Siedepunkt von Rapsöl das Abdampfen des Kraftstofffilms von den Brennraumwänden des Motors, was die Entstehung unverbrannter oder teilverbrannter Kohlenwasserstoffe begünstigt. Dies ist insbesondere bei den im unteren Lastbereich vorherrschenden tieferen Brennraumtemperaturen oder während des Warmlaufs des Motors der Fall.

Durch eine veränderte Einspritztechnik (Düsenbauweise, höherer Einspritzdruck), Verlegung des Zündzeitpunkts sowie Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses (höhere Brennraumtemperatur) kann der Verbrennungsprozess für Pflanzenöl verbessert werden, so dass in einem optimierten Motor die Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas auch niedriger sein kann als bei Dieselmotoren (Abbildung 24, rechter Balken). Die im Allgemeinen höheren Betriebstemperaturen von Pflanzenölmotoren können neben einer Reduzierung der HC-Konzentration auch zu einem Rückgang von Kohlenmonoxid und der Partikelmasse führen, da für ihre Bildung ähnliche Bedingungen gegeben sein müssen. Dagegen steht allerdings eine erhöhte Belastung der Bauteile und ein Anstieg der Stickstoffoxidemissionen.

Untersuchungen von MAY 1994 ergaben einen erheblichen Vorteil von Rapsöl hinsichtlich der Partikelemissionen [54].

Bei SYASSEN 1992 [75] wird ein rußmindernder Effekt von dem im Pflanzenölmolekül enthaltenen Sauerstoff (ca. 9-14 %) beschrieben.

Zu den wichtigsten Faktoren, die die Entstehung von **Stickstoffoxidemissionen** ( $\text{NO}_x$ ) begünstigen, gehören hohe Brennraumtemperaturen, großes Sauerstoffangebot sowie die, für die Bildung zur Verfügung stehende Zeit. Die vorliegende Literaturliteraturauswertung ergibt im Wesentlichen keine Änderung der  $\text{NO}_x$ -Abgaskonzentration beim Einsatz von Pflanzenöl im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Bei der Verwendung von Rapsölmethylester wurden dagegen auch höhere  $\text{NO}_x$ -

Emissionen festgestellt [23]. Dies kann auf den vorhandenen Sauerstoff im Kraftstoff und auf ein schnelleres Durchbrennen des Kraftstoffs (geringere Temperaturspanne zwischen Siedebeginn und Siedeende) zurückgeführt werden [72].

KAMPMANN 1993 [39] vergleicht die  $\text{NO}_x$ -Emissionen eines optimalen Dieselmotors (4 D 13.5 AL) mit einem optimalen Pflanzenölmotor (4 P 13.5 AL) bei unterschiedlichen Drehzahl/Lastverhältnissen. Die Untersuchung zeigt, dass die Stickstoffoxidemissionen des Pflanzenölmotors im niederen Lastbereich und bei mittlerer Drehzahl (1320 U/min) niedriger, unter Volllast dagegen höher sind als beim Dieselmotor. Für Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen verhält es sich genau umgekehrt.

SYASSEN 1993 [75] beschreibt den möglichen Einfluss der Pflanzenölarart (evtl. Fettsäuremuster) auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Grund der Annahme ist der Vergleich von Stickstoffoxidkonzentrationen, die z.B. bei RME höher und bei Palmölmethylester z.T. wesentlich niedriger als bei Dieselmotorkraftstoff liegen. Allerdings ist hierbei auch die Motorbauweise von entscheidender Bedeutung.

Auch Untersuchungen von DOBIASCH [18] lassen einen Einfluss der Fettsäurezusammensetzung auf die Stickstoffoxid-Emissionen vermuten.

BOUCHÉ et al. bestätigen diese Erkenntnisse durch Motorenversuche mit verschiedenen Kraftstoffen, wonach die Stickstoffoxidemissionen tendenziell in der Reihenfolge Raps-, Palm- und Kokosöl abnehmen [7].

Bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Reduzierung durch den Einsatz von Pflanzenölkraftstoff/Wasseremulsionen in pflanzenöлтаuglichen Motoren - ähnlich wie bei Dieselmotorkraftstoff - ist nichts bekannt (vgl. Kap. 5.4). Angesichts des natürlichen Wassergehalts von Pflanzenöl und der besseren Mischbarkeit mit Wasser wären diesbezügliche Untersuchungen wünschenswert.

Der im Vergleich zu mineralischem Diesel deutlich niedrigere **Schwefeldioxid** ( $\text{SO}_2$ ) - Ausstoß bei der Verwendung von Pflanzenöl ist auf dessen annähernde Schwefelfreiheit zurückzuführen (vgl. Kap. 2.3) und unterstreicht den bekannten Vorteil bezüglich einer Reduzierung der Umweltbelastung (z.B. saurer Regen).

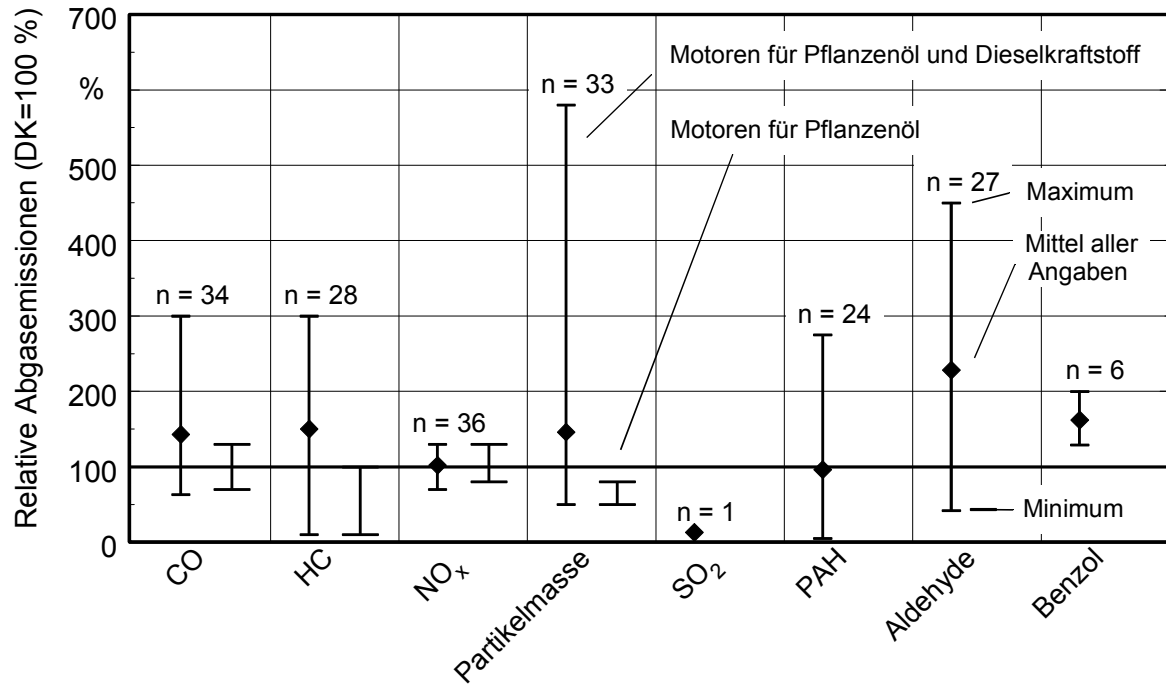


Abbildung 24: Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren im Vergleich zu Dieselkraftstoff (Mittelwerte, Minima, Maxima) [7],[11],[18],[27],[29],[30],[44],[45],[53],[57],[55],[64],[69],[88],[93]

Die Summe der emittierten **polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe** (PAH) entspricht im Durchschnitt den Angaben für Dieselbetrieb. Bei Betrachtung aller 24 Einzelangaben sind sowohl deutlich niedrigere aber auch bis zu 2,8 mal so hohe PAH-Werte zu beobachten (vgl. Abbildung 24). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Angaben aus Summen verschiedener PAH-Komponenten mit unterschiedlicher gesundheitlicher Relevanz zusammensetzen.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe entstehen in den sauerstoffarmen Bereichen einer Flamme bei hohen Temperaturen und in kurzer Reaktionszeit. Die Bildung verstärkt sich, wenn im Brennstoff bereits entsprechende aromatische Verbindungen enthalten sind [64]. Deshalb wurde für Dieselkraftstoff ein Grenzwert für den Aromatengehalt in die DIN EN 590 aufgenommen. Da im Pflanzenöl von Natur aus keine Aromaten enthalten sind, könnte aus diesem Grund mit niedrigeren PAH Emissionen als beim Einsatz von Dieselkraftstoff gerechnet werden. An anderen Stellen wird jedoch davon ausgegangen, dass der Aromatengehalt im Kraftstoff keinen oder nur wenig Einfluss auf die komplexen Bildungsmechanismen von PAH hat [40].

Einen Rückgang von PAH-Emissionen bei der Verwendung von Pflanzenöl bestätigen auch Untersuchungen von MAY 1994 [54]. Danach ist die Menge der emittierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bei einem aufgeladenen Motor und einer Drehzahl von 1500 U/min ( $M_d = 320 \text{ Nm}$ ) im Rapsölbetrieb nur etwa ein Drittel so hoch wie im Dieselbetrieb. Werden nur die als kanzerogen eingestuft bzw. verdächtigten Komponenten betrachtet, ist der Vorteil von Rapsöl noch wesentlich deutlicher.

Von ähnlich hohen Minderungsraten beim Einsatz von Rapsöl berichtet KRAHL [46]. Allerdings variieren die absoluten PAH-Konzentrationen beim Pflanzenölbetrieb von verschiedenen Fahrzeugen mitunter beträchtlich.

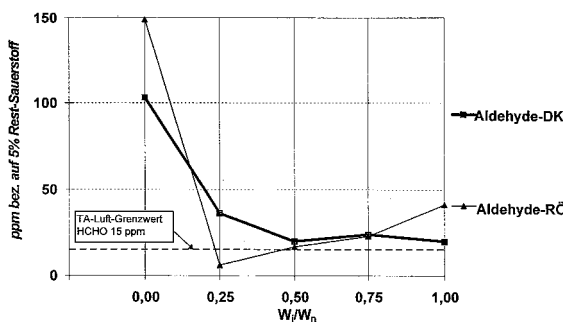
Als Zwischenprodukt bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen verhält sich die Konzentration von **Aldehyden** im Abgas ähnlich der von unverbrannten Kohlenwasserstoffen. Die ausgewerteten Literaturstellen zeigen jedoch bei der motorischen Verbrennung von Pflanzenölkraftstoffen einen Anstieg bei den Aldehyden im Durchschnitt um mehr als das Doppelte mit Höchstwerten von 450 % im Vergleich zu Dieselkraftstoff.

Bei PRESCHER [65] wurden Untersuchungen zu den Aldehydemissionen beim Einsatz von Rapsöl und Dieselkraftstoff in einem schweröltauglichen 1-Zylinder 4-Takt Motor 1VDS 18/15 mit einer Maximalleistung von 80 kW und einer Nenn-drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Die Emissionswerte wurden mit Hilfe eines nach FTIR-Methode (Fourier Transformierte Infrarot Spektroskopie) arbeitenden Abgasanalysators (SESAM 2) erfasst.

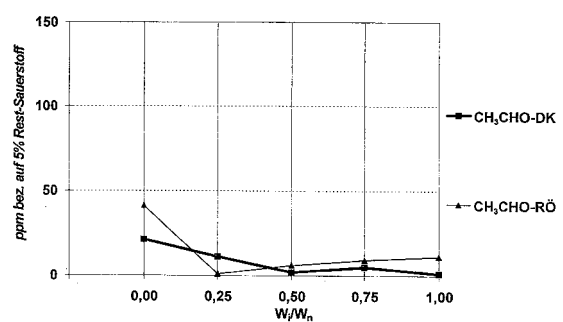
Dabei zeigte sich, dass die Aldehydkonzentrationen im Abgas bei beiden verwendeten Kraftstoffen in besonderem Maße lastabhängig waren (vgl. Abbildung 25). Im unteren Lastbereich wurden infolge niedriger Verbrennungs- und Abgastemperaturen bei beiden Kraftstoffen stark erhöhte Aldehydemissionen verzeichnet. Bei der Verwendung von Rapsöl lagen die Aldehydemissionen (als Summe der Komponenten Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein) im Leerlauf und unter Volllast um 50 % bzw. 100 % höher als bei Dieselkraftstoff. Im mittleren Lastbereich wurden dagegen niedrigere oder gleich hohe Aldehydkonzentrationen im Rapsölbetrieb festgestellt.

Eine differenzierte Betrachtung der Aldehydemissionen macht deutlich, dass die überhöhten Abgasemissionen im Leerlauf beim Einsatz von Pflanzenöl weniger auf Formaldehyd als vielmehr auf die Komponenten Acetaldehyd und Acrolein zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 25). Diese Ergebnisse unterstützen die

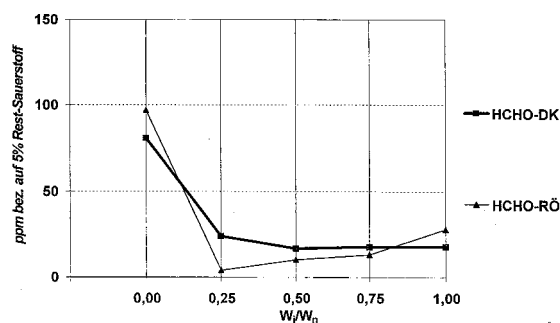
Aldehydemissionen (Summe)



Acetaldehydemissionen



Formaldehydemissionen



Acroleinemissionen

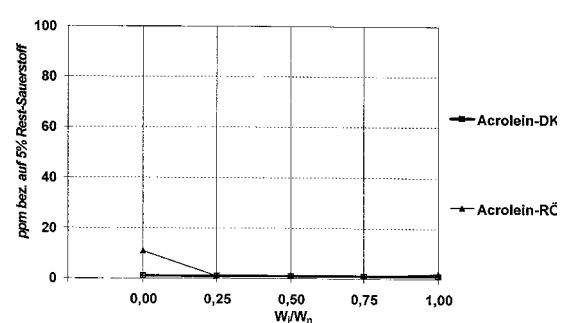


Abbildung 25: Aldehydemissionen beim Einsatz von Rapsöl (entschleimt) und handelsüblichen Dieselkraftstoff in Abhängigkeit von der Laststufe nach: PRESCHER 1997 [65]

Annahme, dass der typische Abgasgeruch bei der Verbrennung von Rapsöl in erster Linie durch das Aldehyd Acrolein verursacht wird. An anderer Stelle wird davon berichtet, dass vor allem längerkettige Aldehyde für diesen typischen Abgasgeruch verantwortlich sind.

Diese Untersuchungen stimmen mit den Erkenntnissen bei SCHULZ et al. [71] überein, wonach Aldehydemissionen durch eine sogenannte milde Oxidation, d.h. bei relativ niedriger Verbrennungstemperatur und langer Reaktionszeit gebildet werden. Diese Bedingungen herrschen bei kaltem Motor oder beim Motorbetrieb im unteren Lastbereich, wo die Aldehydemissionen ein Maximum aufweisen.

SCHULZ et al. [71] führen die erhöhten Aldehydemissionen bei RME direkt auf den höheren Sauerstoffanteil im Kraftstoff zurück, weil bei der Bildung von Aldehyden aus den Kohlenwasserstoffen keine Zwischenprodukte nachgewiesen werden konnten.

Weitere Untersuchungen zu Aldehydemissionen von drei unterschiedlichen Motorvarianten (Saugversion, aufgeladener Motor, aufgeladener Motor mit Oxikat) wurden bei MAY 1994 [54] durchgeführt. Als Ursache für das erhöhte Bildungspotenzial für Aldehyde wurde auch hier der im Molekül eingebundene Sauerstoff verantwortlich gemacht. Durch die Verwendung von aufgeladenen Motoren und beim Einsatz von Oxidationskatalysatoren können die Aldehydemissionen jedoch deutlich reduziert werden.

Eine Recherche von TSCHÖKE [80] fasst Untersuchungen aus den Jahren 1985-1996 zu Abgasemissionen von Pflanzenölmotoren zusammen. Dabei wurden 39 Literaturstellen zu Rapsöl und RME ausgewertet. Die untersuchten Motoren kommen vorzugsweise aus dem Gebiet der Landwirtschaft und weisen ein Zylindervolumen zwischen 250 und 2000 cm<sup>3</sup> auf. Die Daten werden unterschieden nach

- dem Testverfahren: FTP-75, ECE-R15 (entspricht ECE/EUDC), 13-Punkte-Test und 5-Punkte-Test,
- dem Arbeitsverfahren der Motoren: indirekt (IDI) und direkt einspritzend (DI)
- und der Motorenanpassung.

Nachfolgend sollen die für naturbelassenes Pflanzenöl gewonnenen Ergebnisse der Literaturrecherche von TSCHÖKE zusammengefasst werden. Dabei werden die Emissionen beim Betrieb konventioneller Dieselmotoren und spezieller Pflanzenölmotoren auch getrennt voneinander betrachtet.

Die Kohlenmonoxidemissionen (CO) liegen in einem Bereich von ca. 60 bis 300 % bezogen auf Dieselkraftstoff (vgl. Abbildung 26) und zeigen somit gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Abbildung 24. Werden jedoch die speziell für den Pflanzenöleinsatz ausgerüsteten Motoren gesondert betrachtet, so können zwischen den Kraftstoffen keine Unterschiede bei den CO-Abgaskonzentrationen festgestellt werden. Da ein Einfluss des Testverfahrens nicht festzustellen war, kann davon ausgegangen werden, dass der Kohlenmonoxid-Ausstoß beim Einsatz von Pflanzenöl in Pflanzenölmotoren in etwa dem von Dieselkraftstoff entspricht, sofern die Motoren auf den jeweiligen Kraftstoff abgestimmt sind.

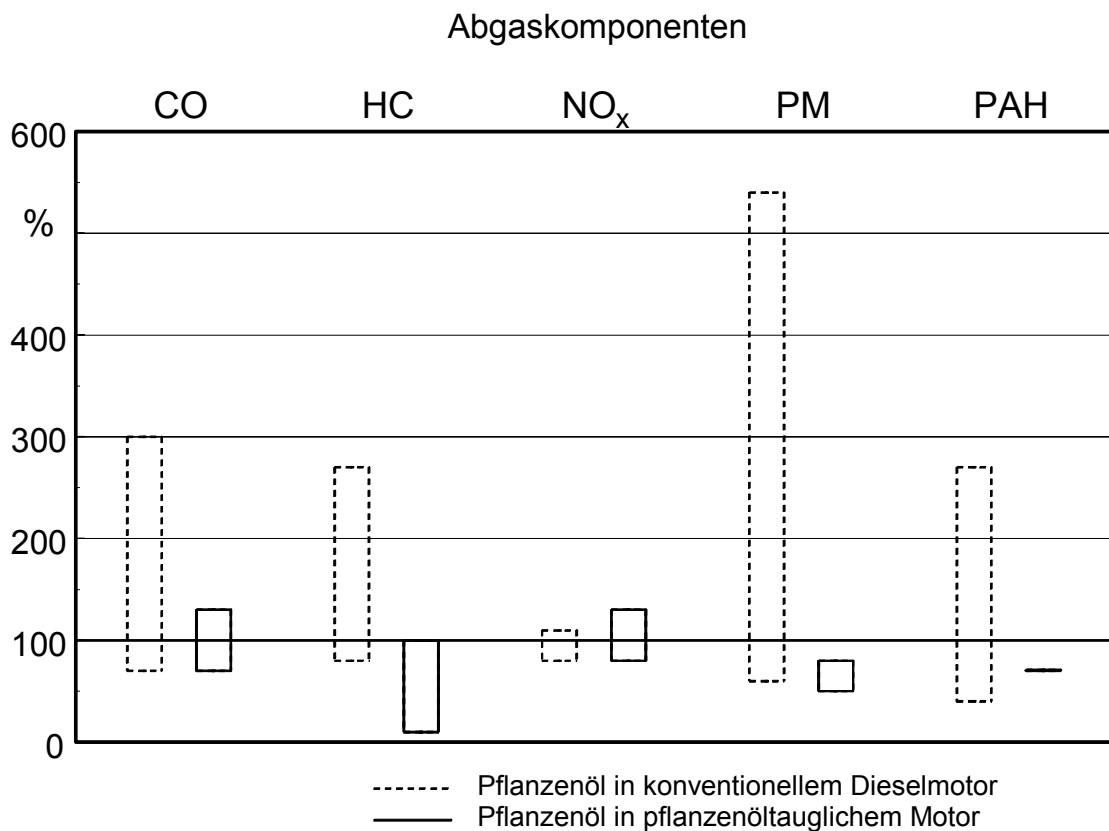


Abbildung 26: Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren im Vergleich zu Dieselkraftstoff (DK = 100 %) nach TSCHÖKE [80]



Die *Gesamt - Kohlenwasserstoffemissionen (HC)* der pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren bewegen sich in einem Bereich zwischen ca. 10 und 270 % (DK = 100 %). Auffällig ist auch hier, dass die erhöhten Werte ausschließlich den nicht angepassten konventionellen Motoren zuzuschreiben sind. Die auf Pflanzenölbetrieb ausgelegten Motoren weisen Kohlenwasserstoffemissionen auf, die gleich oder deutlich niedriger als die von Dieseldieselkraftstoff - allerdings in den nicht für Dieseldieselbetrieb optimierten Motoren - sind. Eine eindeutige Auswirkung verschiedener Testverfahren wurde nicht verzeichnet.

Die *Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>x</sub>)* der pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren weisen insgesamt nur eine geringe Abweichung vom Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff auf (80 bis 130 %, vgl. Abbildung 26). Die geringsten Abweichungen zeigen die konventionellen Motoren und der für Pflanzenöl entwickelte Motor. Lediglich ein für den Pflanzenölbetrieb angepasster Motor ruft höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen hervor. Die Testverfahren zeigen keine Auswirkung auf die vergleichende Betrachtung der Emissionen von Pflanzenöl und Dieseldieselkraftstoff.

Die *Partikelemissionen (PM)* der pflanzenölbetriebenen Motoren weichen z.T. drastisch gegenüber dem Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff ab (vgl. Abbildung 26). Die höchsten Werte liegen bei 540 %, die niedrigsten bei 50 %. Offensichtlich wirkt sich auch hier das Testverfahren stark aus, da die Emissionen bei instationären Tests deutlich über denen stationärer Testverfahren liegen. Der für Pflanzenöl entwickelte Motor und die beiden angepassten Motoren emittieren beim Betrieb mit Pflanzenöl im Durchschnitt nur etwa 2/3 der Partikelmasse als mit Dieseldieselkraftstoff.

Bei den Emissionen von *polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH)* sind auf Diesel bezogene Werte zwischen 10 und 270 % feststellbar. Zwar ist die Datenbasis vergleichsweise gering, aber auch hier zeichnet sich ab, dass die PAH-Emissionen von speziellen Pflanzenölmotoren tendenziell niedriger liegen als bei Dieseldieselbetrieb.

Die Ergebnisse der Untersuchung von TSCHÖKE [80] zeigen gute Übereinstimmung mit einer Studie des Umweltbundesamtes [23] sowie mit der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Literaturrecherche. Dadurch wird bestätigt, dass die

Abgasemissionen beim Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl in dafür geeigneten Motoren, Vorteile gegenüber Dieselmotoren besitzen können.

Der Vergleich der relativen Emissionskonzentrationen sagt jedoch nichts über die tatsächliche Höhe der Emissionen und damit über die Gefährdung für Mensch und Umwelt aus. Deshalb sollen nachfolgend die Massenkonzentrationen wesentlicher Abgaskomponenten, die beim Betrieb von verschiedenen pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerken ermittelt wurden, aufgezeigt werden.

### 6.2.2 Emissionen von BHKW-Motoren

Ergebnisse von Messungen zum Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken wurden anhand einer telefonischen Umfrage bei Betreibern, Anfragen bei Motorherstellern sowie einer umfangreichen Literaturrecherche zusammengestellt.

Insgesamt wurden 15 Betreiber von BHKW-Praxisanlagen mit Modulleistungen von 16 bis 180 kW<sub>el</sub> im süddeutschen Raum befragt. Weiter wurde Informationsmaterial von Herstellern für Pflanzenöl-BHKW der Firmen VWP, AAN (früher: TMW) und AMS ausgewertet. Die Analyse von Ergebnissen bisheriger Veröffentlichungen erfolgte mit Hilfe einer Fachliteratur-Datenbank der Arbeitsgruppe Pflanzenöle an der Landtechnik Weihenstephan mit mehr als 5000 Literaturstellen.

Die Umfrage ergab, dass Emissionsmessungen an Praxisanlagen entweder nicht durchgeführt werden, oder dass die bei der Abnahme erfolgten Messungen nur in Ausnahmefällen dokumentiert wurden. Ein Grund dafür ist, dass bis zu einer Anlagengröße von 1 MW Feuerungswärmeleistung (FWL) die Einhaltung bestimmter Abgasgrenzwerte von Seiten des Gesetzgebers nicht vorgeschrieben ist. Von den 15 befragten BHKW-Betreibern konnte nur einer Datenmaterial zu den Emissionskomponenten NO<sub>x</sub>, CO und Staub zur Verfügung stellen. Umfangreiche Messungen vom TÜV Bayern an einer Praxisanlage wurden im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz durchgeführt.

Auch die Motorenhersteller gaben nur wenig detaillierte Auskünfte. Zwar garantieren sie dafür, dass auch neuere Aggregate < 1 MW, FWL die Abgasbegrenzung

gen nach TA-Luft einhalten, konkrete Emissionsangaben von Praxis-BHKW wurden jedoch nicht gemacht.

Die Literaturstudie ergab insgesamt nur zwei Aussagen zu Abgaskonzentrationen von BHKW-Motoren, wobei ein Aggregat in erster Linie als Versuchsanlage dient und primär für den Betrieb mit Kraftstoffen aus Altspisefetten umgerüstet wurde.

In Abbildung 27 sind die CO-Konzentrationen im Abgas von 6 verschiedenen BHKW-Motoren dargestellt. Die Messwerte an den Aggregaten ohne Oxidationskatalysator liegen relativ einheitlich in einem Bereich von 0,46 bis 0,60 g/m<sup>3</sup> (bezogen auf trockenes Abgas, Normbedingungen, 5 Vol.-% O<sub>2</sub>). Gemäß TA Luft ist für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Verbrennungsmotoranlagen ( $\geq 1$  MW, FWL) eine CO-Emissionsbegrenzung von 0,65 g/Nm<sup>3</sup> einschlägig. Die Kohlenmonoxidemissionen bei Anlagen mit Oxidationskatalysator (dunkle Balken) liegen erwartungsgemäß zum Teil deutlich niedriger als ohne Abgasreinigung (schraffierte Balken). Bei dem Motor Typ B (80 kW<sub>el</sub>) konnte eine CO-

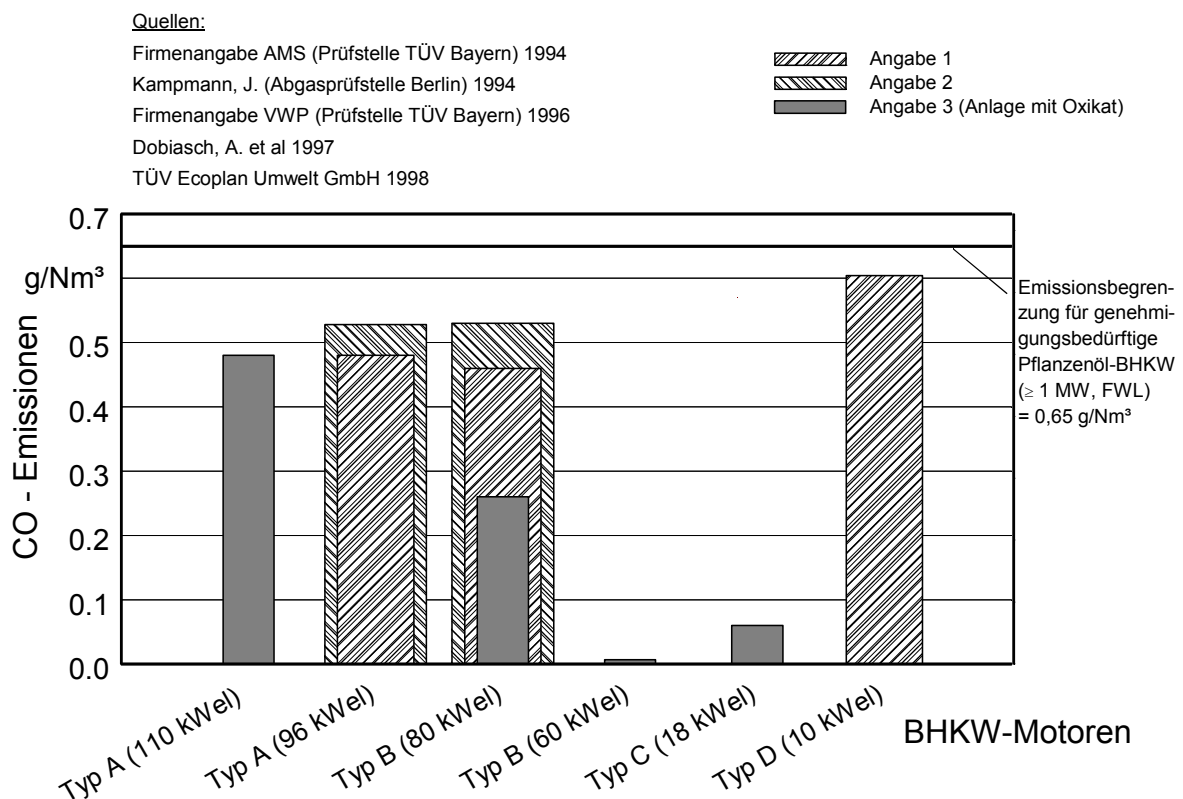


Abbildung 27: Kohlenmonoxidemissionen pflanzenölbetriebener BHKW-Motoren bei Nennlastbetrieb (1500 U/min) (Werte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen, O<sub>2</sub>-Gehalt: 5 Vol.-%) Quellen: [1], [2], [18], [38], [60], [85]

Reduzierung um ca. 50 % erzielt werden. Allerdings schwanken die Messergebnisse zwischen den einzelnen Anlagen stark zwischen ca. 0,01 und 0,48 g/Nm<sup>3</sup>.

Die Stickstoffoxidkonzentrationen im Abgas betragen zwischen ca. 0,5 und 3,3 g/Nm<sup>3</sup> (Abbildung 28). Die empfohlene Emissionsbegrenzung von 3,0 g/Nm<sup>3</sup> für nicht genehmigungsbedürftige Pflanzenöl-BHKW < 0,5 MW FWL (für alle hier dargestellten BHKW zutreffend) wird bei je einer Messung von drei BHKW geringfügig überschritten. Den für größere (genehmigungsbedürftige) Anlagen anzustrebenden NO<sub>x</sub> - Wert von 1,0 g/m<sup>3</sup> erfüllt ein Aggregat. Auffallend ist eine NO<sub>x</sub>-Reduktion bei Verwendung eines Oxidationskatalysators bei Motor Typ B (80 kW<sub>el</sub>). Die Stickstoffoxidemissionen dieses Motors können bei katalytischer Abgasnachbehandlung fast auf die Hälfte abgesenkt werden. Die Eigenschaft von Oxidationskatalysatoren, auch den Stickstoffoxidausstoß in geringem Umfang zu reduzieren, ist bekannt. Höhere Minderungsraten sind bei einer NO<sub>x</sub>-optimierten

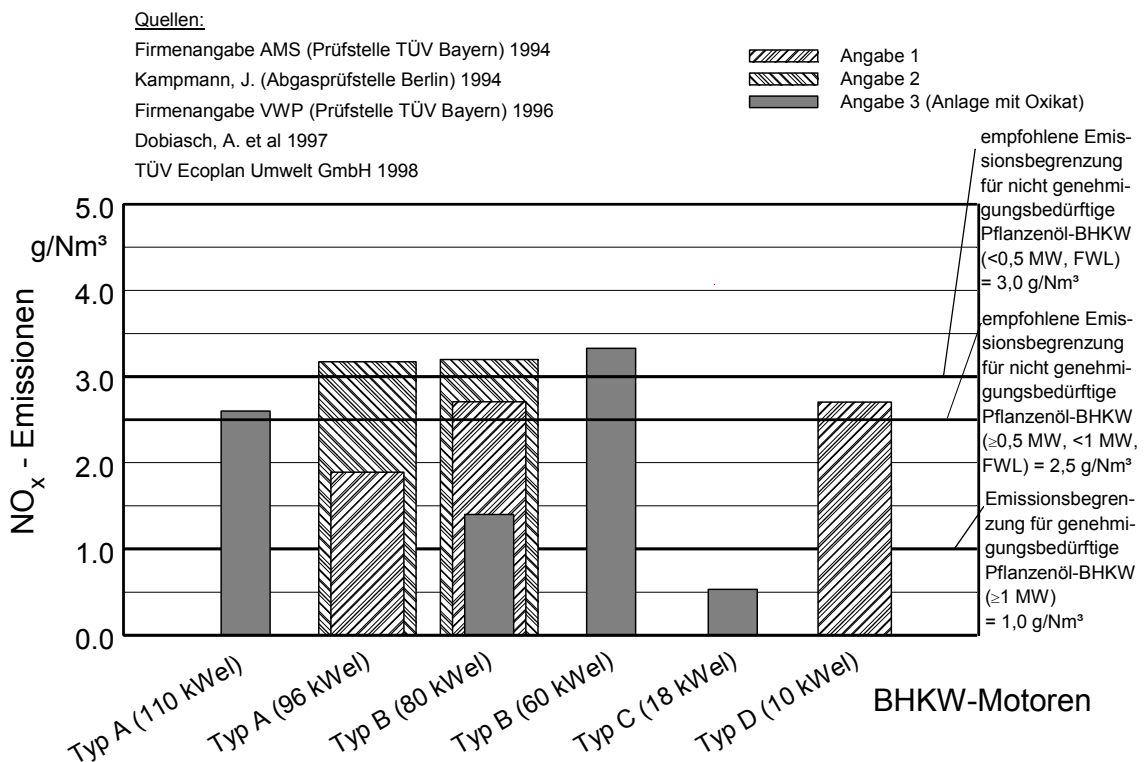


Abbildung 28: Stickstoffoxidemissionen pflanzenölbetriebener BHKW-Motoren bei Nennlastbetrieb, 1500 U/min (Werte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen, O<sub>2</sub>-Gehalt: 5 Vol.-%) Quellen: [1], [2], [18], [38], [60], [85]

Einstellung des Motors (fetteres Gemisch) mit nachgeschalteter Oxidation der unverbrannten CO und HC im Katalysator möglich. Als Nachteil ist dabei allerdings der höhere Kraftstoffverbrauch anzuführen, der sich nach dem eingestellten Kraftstoff/Luftverhältnis richtet. Ebenso kann der erhöhte Abgasgegendruck bei Verwendung eines Katalysators zum Rückstau sauerstoffarmen Abgases führen, was der Entstehung von Stickstoffoxiden entgegenwirkt (niedrigere Verbrennungstemperaturen und niedrigere O<sub>2</sub>-Konzentration im Brennraum). Eine eindeutige Erklärung für diese hohe NO<sub>x</sub>-Minderung beim Einsatz eines Oxidationskatalysators kann nicht gegeben werden, zumal nicht bekannt ist, ob die in Abbildung 28 angegebenen Abgaskonzentrationen an dem selben Motor unter gleichen Rahmenbedingungen gemessen wurden.

Die ausgestoßenen Partikelmassen betragen zwischen ca. 23 und 90 mg/Nm<sup>3</sup> (Abbildung 29). Alle Einzelmesswerte liegen damit über der empfohlenen Emissionsbegrenzung von 20 mg/Nm<sup>3</sup> für Anlagen < 1 MW FWL. Für die beiden BHKW

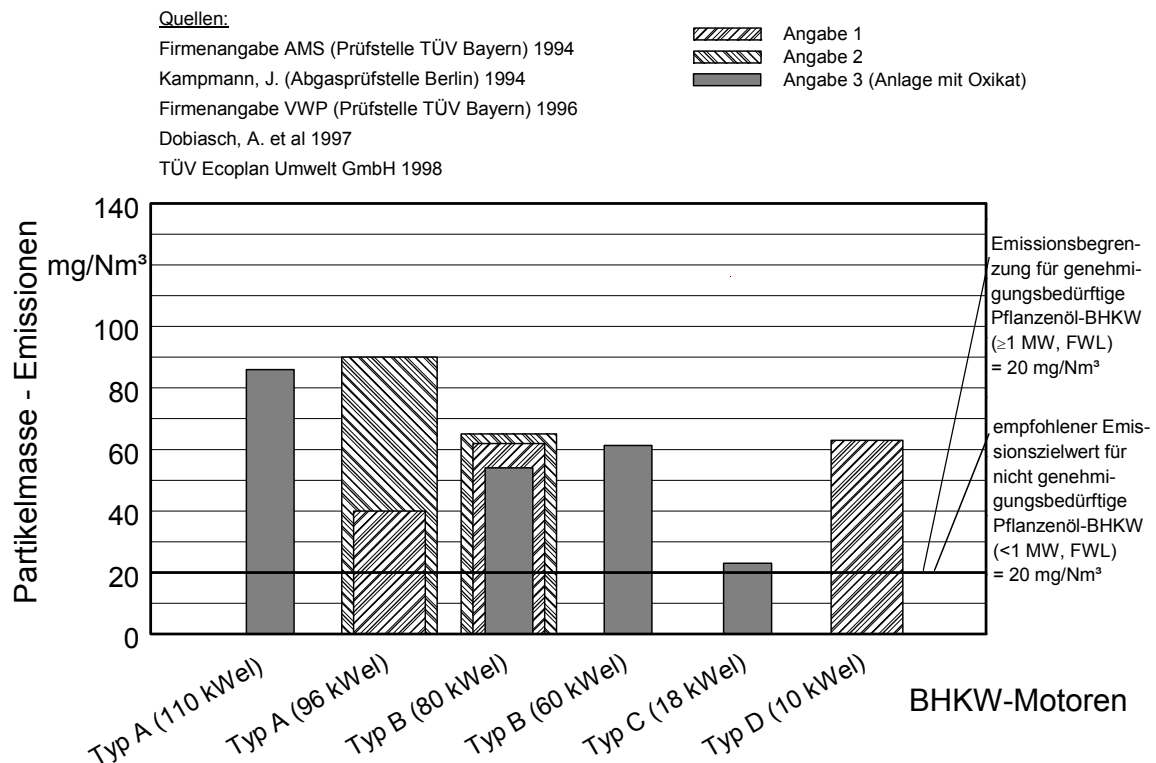


Abbildung 29: Partikelmasseemissionen pflanzenölbetriebener BHKW-Motoren bei Nennlastbetrieb (1500 U/min) Werte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen, O<sub>2</sub>-Gehalt: 5 Vol.-% Quellen: [1], [2], [18], [38], [60], [85]

mit dem 96 kW<sub>el</sub> Motor Typ A sind zwei deutlich voneinander abweichende Partikelmassen angegeben (40 und 90 mg/Nm<sup>3</sup>). Die Ursachen dafür können vielfältig sein.

Die gemessenen Konzentrationen einzelner Abgaskomponenten schwanken sowohl zwischen verschiedenen Motortypen, als auch bei mehreren Messungen an einem Motortyp beträchtlich. Die genauen Ursachen dafür können aufgrund fehlender Informationen zu den jeweils vorherrschenden Versuchsbedingungen nicht ermittelt werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass die gegenübergestellten Emissionswerte bei Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen, Ausführungen und technischem Entwicklungsstand gemessen wurden. Eine Vergleichbarkeit der Blockheizkraftwerke hinsichtlich des Emissionsverhaltens ist darüber hinaus aufgrund fehlender Dokumentation der verwendeten Kraftstoffqualität, dem nicht bekannten Optimierungsgrad der jeweiligen Motoreinstellung sowie des zugrunde liegenden Datenumfangs eines Messwerts nicht gegeben. Entsprechend können auch keine Aussagen über eventuelle Zusammenhänge zwischen Kraftstoff und Betriebsverhalten gemacht werden.

Trotzdem zeigt der Vergleich mit den Emissionsbegrenzungen nach TA-Luft, bzw. den empfohlenen Emissionsbegrenzungen, dass deren Einhaltung zumindest bei Verwendung moderner Abgasreinigungstechniken (Oxidationskatalysator) bei CO ganz und bei NO<sub>x</sub> überwiegend möglich ist. Die empfohlenen Emissionsbegrenzungen für Partikelmasse-Emissionen können gemäß den vorliegenden Daten nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund und weil von einer fortschreitenden Verschärfung der Abgasgesetzgebung auszugehen ist und die Umweltvorteile von Pflanzenölkraftstoffen auch auf dem Gebiet der Luftreinhaltung voll auszuschöpfen sind, muss Emissionsminimierung ein wesentliches Ziel bei der weiteren Entwicklung von Pflanzenöl-BHKW sein. Die große Schwankungsbreite der dargestellten Emissionsmesswerte lässt auf ein hohes Optimierungspotential schließen.

Neben konstruktiven motorischen Maßnahmen müssen auch der Verbesserung des Kraftstoffes sowie der Verwendung von Abgasreinigungssystemen eine große Bedeutung zugemessen werden.

Eine abschließende Zusammenstellung wichtiger Kenngrößen und Inhaltsstoffe und deren Einfluss auf den motorischen Betrieb liefert Tabelle 17.

Tabelle 17: Eigenschaften/Inhaltsstoffe von naturbelassenem Pflanzenölkraftstoff und ihre möglichen spezifischen Wirkungen

Kennwert	Einheit	Lagerfähigkeit	Angriff Dichtungen Einspritzp.	Kälteauglichkeit	Filterverstopfung	Ablag. Einspr.-düse/ Brennraum	Verbrennungsablauf	Emissionen	Katalysator
kin. Viskosität	mm <sup>2</sup> /s					X	X	X	
Flammpunkt	°C	X							
Cetanzahl	-						X	X	
Cloudpoint	°C			X					
Pourpoint	°C			X					
CFPP	°C			X	X				
Kälteverhalten				X	X				
Siedeverlauf	°C					X	X	X	
Siedepunkt	°C						X	X	
Koksrückstand	Masse-%					X	X	?	
Destillationsrückst.	Masse-%					X			
Gesamtverschm.	mg/kg				X	X		?	
Partikelgröße	µm				X	X		?	
Asche	Masse-%					X		?	
Wassergehalt	Masse-%	X			X		X	X	
Sauerstoff	Masse-%						X	X	
Stickstoff	mg/kg							X	
Phosphor	mg/kg					X		?	X
Schwefel	mg/kg							X	X
Chlor	mg/kg					?		X	
Eisen	mg/kg					?			
Kalium	mg/kg					?			
Natrium	mg/kg					?			
Kalzium	mg/kg					?			
Cu-Korrosionswirk.	Korr.-grad		X						
Neutralisationszahl	mg KOH/g	X					X	?	
Verseifungszahl	mgKOH/100g	X					X		
Fettsäuremuster	Masse-%	X		X			X	X	
freie Fettsäuren	Masse-%	X	X			X	X	?	
unges. Fetts.	Masse-%	X		X		X	X	?	
Iodzahl	g /100g	X	?			X	X	?	
Oxidationsstab.	h	X						?	
Sterole	Masse-%	?				?			
pH-Wert	-		?						
Keimzahl	-	X			X				

## 7 Bewertung der Untersuchungsergebnisse, Schlussfolgerungen

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass derzeit etwa 20 Untersuchungen zum Emissionsverhalten von naturbelassenem Pflanzenöl in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren vorliegen. Den Versuchen lagen dabei unterschiedliche Zielsetzungen zu Grunde. Überprüft wurden neben der Tauglichkeit unterschiedlicher Motoren auch Auswirkungen verschiedener Betriebszustände und Kraftstoffarten auf das Abgasverhalten. Entsprechend vielfältig waren die Einflussfaktoren, was sich in Umfang und Qualität der Daten sowie den dokumentierten Rahmenbedingungen widerspiegelte.

Die Motoren waren in unterschiedlichem Maße für den Pflanzenölbetrieb geeignet. Eingesetzt wurden konventionelle Dieselmotoren, Motoren, die auf den Pflanzenölkraftstoff mit verschiedenartigen technischen Maßnahmen abgestimmt waren, und spezielle Pflanzenölmotoren unterschiedlicher Entwicklungsstufen. Aufgrund ständig fortschreitender Motorenoptimierung beziehen sich die dargestellten Ergebnisse zum Teil auf heute nicht mehr übliche Bauarten. Somit gibt das aufgezeigte Abgasverhalten nicht den aktuellen Stand der Technik wieder. Dadurch lassen sich unter anderem auch die zum Teil sehr großen Spannweiten einzelner Abgaskonzentrationen erklären.

Generell ist ein Vergleich der Emissionen zwischen Pflanzenöl- und Dieselbetrieb problematisch, da die Motoren nur für eine Kraftstoffart optimiert sein können. Demzufolge kann ein ungünstigeres Abgasverhalten auch auf mangelnde Motoreignung zurückzuführen sein. Notwendig ist es deshalb, unterschiedliche Kraftstoffe in speziellen Prüfmotoren zu testen, die es allerdings bislang nicht für den Einsatz von Pflanzenöl gibt.

Die meisten Untersuchungsergebnisse liegen zu den Abgaskomponenten Gesamt-Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Partikelmasse vor. Während die Emissionen von  $\text{NO}_x$  beim Einsatz von Pflanzenöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff nahezu unverändert bleiben, liegen die HC-, CO- und Partikelmasse-Emissionen im Mittel etwas über dem Niveau von Dieselkraftstoff. Dies wird auch durch andere Untersuchungen bestätigt [23], [80]. Insbesondere während der Warmlaufphase sowie im unteren Lastbereich des Motors wurde für



diese Komponenten ein höherer Abgasausstoß festgestellt. Ursache dafür ist häufig eine aufgrund ungenügender Gemischverteilung im Brennraum unvollständig ablaufende Verbrennung. Andererseits können sich für die gleichen Komponenten (HC, CO und Partikelmasse) bei konstanter Drehzahl und mittlerer Laststufe, auch Vorteile für den Pflanzenölbetrieb ergeben. Hierbei kann sich der Sauerstoffgehalt des Pflanzenölmoleküls günstig auf den Verbrennungsablauf auswirken. In verschiedenen Untersuchungen wurde auch ein Zusammenhang zwischen dem Fettsäuremuster und der Höhe der Stickstoffoxidemissionen festgestellt.

Eindeutige Aussagen über den Einfluss weiterer Inhaltsstoffe und Kenngrößen von Pflanzenöl auf die Entstehung von  $\text{NO}_x$ , HC-, CO- und Partikelemissionen können aus den bisherigen Untersuchungen nicht abgeleitet werden, zumal die Zusammensetzung und Qualität der verwendeten Kraftstoffe nur in wenigen Fällen ausreichend dokumentiert wurde. Gleiches gilt entsprechend für Abgaskomponenten der Gruppen PAH, BTX sowie Aldehyde und Ketone.

Gegenüber Dieselkraftstoff ist beim Pflanzenölbetrieb vor allem bei mittlerer Drehzahl und Last mit einer Minderung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) zu rechnen. Allerdings können bei wechselnden Drehzahl/Last-Verhältnissen auch wesentlich höhere PAH-Emissionen auftreten. Es wird vermutet, dass der Polyaromatengehalt in mineralischem Kraftstoff Einfluss auf die Höhe der PAH-Emissionen hat, und deshalb Pflanzenöl infolge der natürlichen Abwesenheit von aromatischen Verbindungen Vorteile gegenüber Dieselkraftstoff aufweisen kann; aber auch hier ist die Betriebsweise des Motors von großer Bedeutung. Ein bewertender Vergleich verschiedener Kraftstoffarten bzw. -qualitäten hinsichtlich der Emission von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen wird dadurch erschwert, dass sich die PAH, für die in der Literatur Konzentrationsangaben vorliegen, in ihrer Zusammensetzung unterscheiden.

Untersuchungen zu Aldehyden ergaben bei Pflanzenölbetrieb besonders hohe Werte im unteren und oberen Lastbereich. Bei mittlerer Motorlast dagegen traten Aldehydkonzentrationen auf, die teilweise unter dem Niveau von Dieselkraftstoff liegen. Inwieweit hierbei der Sauerstoffgehalt im Pflanzenölmolekül die Bildung von Aldehyden beeinflusst, ist nicht geklärt. Da Verbindungen, die zu dieser Stoffgruppe gehören, für den typischen Abgasgeruch von Pflanzenöl verantwortlich

gemacht werden, der bei exponierten Personen Unwohlsein hervorrufen kann, ist nicht nur aus Gründen der Akzeptanz von Pflanzenölmotoren in der Bevölkerung eine Minimierung der Aldehyde anzustreben. Der Einsatz von Oxidationskatalysatoren kann dazu einen entscheidenden Beitrag leisten und ist deshalb bei allen pflanzenölbetriebenen Motoren unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit anzustreben.

Zu den Komponenten Benzol, Toluol und Xylol liegen in der Literatur wesentlich weniger, zu Dioxinen und Furanen keine Ergebnisse vor. Gerade aber zu diesen Stoffgruppen gehören Verbindungen, die besonders schädlich für die Gesundheit oder das Klima sind. Darüber hinaus gibt es bei der Verbrennung von Pflanzenöl keine gesicherten Erkenntnisse zu weiteren umweltrelevanten Gasen, wie z.B. Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Jedoch deuten Untersuchungen mit Dieselkraftstoff daraufhin, dass bei der Verwendung von Entstickungskatalysatoren die Bildung von Lachgas und der Durchbruch von überschüssigem Reduktionsmittel (v.a. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )) begünstigt werden kann [89].

Insgesamt betrachtet ist der Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff wegen den bekannten Umweltvorteilen und der niedrigen Gefahrklasse bei Transport und Lagerung aber auch aus Gründen der Luftreinhaltung positiv zu bewerten. Speziell bei mittlerer Drehzahl und mittlerer Laststufe liegt der Abgasausstoß von Pflanzenölmotoren häufig auf gleichem oder niedrigerem Niveau als bei herkömmlichen Dieselmotoren. Diese Bedingungen herrschen beim Betrieb von Blockheizkraftwerken vor, so dass dort der Einsatz von Pflanzenölkraftstoff besonders positiv zu bewerten ist. Erste Daten von Messungen an Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken haben gezeigt, dass die CO-Emissionsbegrenzungen für genehmigungsbedürftige BHKW ( $\geq 1$  MW, FWL) ausnahmslos, die empfohlenen  $\text{NO}_x$ -Emissionsbegrenzung für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen ( $< 0,5$  MW, FWL) weitgehend eingehalten werden können. Die nach dem derzeitigen Stand der Überarbeitung der TA-Luft empfohlene Emissionsbegrenzung für Staubemissionen (Partikelmasse) jedoch konnte bei keiner der verfügbaren Emissionsdaten eingehalten werden. Hier wäre zu prüfen inwieweit eine motorische Optimierung oder die Verwendung von Partikelfiltersystemen zu einer Reduzierung der Partikelmassemmissionen beitragen könnten. Es ist zu berücksichtigen, dass Umfang und Belastbarkeit der zum Zeitpunkt dieser Untersuchung vorliegenden Daten von Emissions-

messungen an BHKW als sehr gering einzustufen ist. Zudem war zum Zeitpunkt der Untersuchung die Entwicklung der Emissionen über einen längeren Betriebszeitraum hinweg unbekannt. Die Schwankungen der Ergebnisse von Messungen an verschiedenen Aggregaten deuten auf weiteres Entwicklungspotential bei den Motoren, den Abgasreinigungssystemen und den Kraftstoffen hinsichtlich der Minimierung des Schadstoffausstoßes hin. Dieses Potenzial ist in Anbetracht einer fortschreitenden Verschärfung der Abgasgesetzgebung insbesondere aber im Interesse der Luftreinhaltung zu nutzen.

## 8 Handlungsbedarf und weiteres Vorgehen

Um das hinsichtlich der Emissionsminderung aufgezeigte Optimierungspotenzial nutzen zu können, müssen Zusammenhänge zwischen Inhaltsstoffen und Kenngrößen von Pflanzenölkraftstoffen und der Entstehung von Emissionen bekannt sein. Da dies in bisherigen Arbeiten nur in geringem Umfang geschehen ist, sind Untersuchungen notwendig, mit denen gezielt Einflüsse relevanter Pflanzenölmerkmale auf die Abgaszusammensetzung eines Motors unter typischen Betriebsbedingungen ermittelt werden können. Zur Gewährleistung möglichst langer Motorlaufzeiten sollten dabei immer auch die Auswirkungen der Kraftstoffeigenschaften auf die Betriebssicherheit des Motors berücksichtigt werden.

Aufgrund der sich abzeichnenden Emissionsvorteile beim Einsatz von Pflanzenöl in Motoren mit konstanter mittlerer Drehzahl und Last, erscheint der Betrieb von pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerken besonders günstig. Da belastbare Literaturdaten über die Höhe der Abgasemissionen von Pflanzenöl-BHKW fehlen, ist es erforderlich, das Abgasverhalten mehrerer, dem Stand der Technik entsprechender Praxisanlagen über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Bei gleichzeitiger Dokumentation relevanter Betriebsparameter können die Daten als Grundlage sowohl für eine technische Optimierung als auch zur ökologischen Bilanzierung von pflanzenölbetriebenen BHKW dienen. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird es möglich sein, die Umweltwirkungen von Pflanzenöl-BHKW mit anderen Energiebereitstellungskonzepten vergleichend zu bewerten. Dies könnte auch in eine Festlegung von Grenzwerten für den Betrieb kleinerer BHKW-Aggregate münden. Die Einführung einer entsprechenden dynamischen Abgasgesetzgebung würde auch die Weiterentwicklung von Motoren, Katalysatoren und Kraftstoffen fördern.

Aufgrund der Ergebnisse bisheriger Untersuchungen sind mehrere Möglichkeiten zur Reduzierung von Abgasemissionen durch die Optimierung von Kraftstoff, Motor und Abgasreinigungssystemen erkennbar. Ein besonders großes Optimierungspotenzial kann dabei den Pflanzenölkraftstoffen zugesprochen werden, da hier die Eigenschaften des Pflanzenöls durch Züchtung und Sortenwahl, Anbauverfahren sowie Ölgewinnung und Ölaufbereitung gemäß den jeweiligen Anforderungen angepasst werden können.

## 9 Zusammenfassung

Die Verwendung von naturbelassenem Pflanzenöl als Kraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren entlastet die Umwelt durch einen geringeren CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Atmosphäre als bei der Nutzung von Dieselmotoren. Dieser Vorteil kommt beim mobilen Betrieb aber insbesondere beim Einsatz in Blockheizkraftwerken zur dezentralen Strom- und Wärmegewinnung mit hohen Gesamtwirkungsgraden zu tragen. Dabei sind jedoch die gesundheits- und umweltschädlichen Abgasemissionen, wie beispielsweise Stickstoffoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Partikel, möglichst gering zu halten.

Zur Minimierung dieser Schadstoffe wird auch der Verbesserung der Kraftstoffqualität ein gewisses Potenzial eingeräumt. Dies gilt vor allem für Pflanzenölkraftstoffe, für die sich während des Produktionsverfahrens zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten bieten.

Im Pflanzenöl unterliegen Eigenschaften wie *Oxidationsstabilität* und *Neutralisationszahl* als Maß für den Ölalterungsgrad und Inhaltsstoffe wie *Gesamtverschmutzung*, *Phosphor-*, *Asche-*, *Schwefel-*, *Sauerstoff-* und *Wassergehalt* sowie *weitere Elementgehalte (N, Fe, Na, Ca, K, Cl)* sorten- und standort- sowie produktions- und lagerungsbedingten Schwankungen, die sich auf das Emissionsverhalten und den motorischen Betrieb auswirken können. Speziell die gegenüber Dieselmotoren etwa um den Faktor 10 höhere Viskosität von Pflanzenöl, erfordert eine geeignete Motorentechnik.

Ebenso wie bei herkömmlichen Dieselmotoren werden bei Pflanzenölmotoren indirekt und direkt einspritzende Verfahren unterschieden. Pflanzenöлтаugliche *Deutz*-Motoren mit indirekter Einspritzung werden von der Firma *Henkelhausen* angeboten. *Elsbett*-Motoren arbeiten dagegen mit direkt einspritzenden, tangential angeordneten Einloch-Zapfendüsen. Eine Weiterentwicklung davon sind die von der Firma *MWS/AMS* hergestellten Motoren mit zwei Einspritzdüsen. Wassergekühlte direkteinspritzende Pflanzenölmotoren werden von der Firma *AAN* mit Kraftstoffvorwärmung und Spezialkolben gefertigt. Des Weiteren wurden andere direkteinspritzende Konzepte mit einer Brennmulde im Zylinderkopf (*Mahler*) oder einem Knickpleuel (*Mederer*) realisiert. Neben diesen Spezialentwicklungen wer-

den heute überwiegend konventionelle Serien-Dieselmotoren durch verschiedene technische Änderungen (z.B. Kraftstoffvorwärmung, Veränderungen an der Einspritzanlage, umgestaltete Vorglühanlage) von mehreren Firmen auf Pflanzenölbetrieb umgerüstet.

Zur Reduzierung von Abgasemissionen eignen sich nachmotorische Maßnahmen wie *Abgasrückführung* zur Verminderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen, *Oxidationskatalysatoren* zur Umsetzung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und CO, *Denoxkatalysatoren* zur Entstickung des Abgases (NO<sub>x</sub>-Reduktion) und *Partikelfilter* mit aktiven oder passiven Maßnahmen zur Regeneration sowie verschiedene Kombinationen dieser Techniken. Pflanzenöl wirkt sich aufgrund des geringen Schwefelgehalts günstig auf die Lebensdauer von Katalysatoren aus. Gleichzeitig können die Katalysatoren durch spezielle Beschichtungen, die speziell für den Pflanzenöleinsatz optimiert wurden, in einem größeren Temperaturbereich arbeiten und bessere Umsetzungsraten erzielen.

Entscheidend für die Entstehung von Abgasemissionen sind die Temperatur sowie das lokale Kraftstoff/Luftverhältnis im Brennraum. Diese Faktoren sind abhängig von der konstruktiven Ausführung des Motors sowie dem jeweiligen Betriebszustand (Warmlauf, Drehzahl/Laststufen). Zur Abgasuntersuchung werden deshalb, je nach Einsatzgebiet des Motors, unterschiedliche Prüfmodi herangezogen. Bei mineralischem Diesel haben insbesondere Eigenschaften wie Zündwilligkeit, Siedeverhalten, Polyaromatengehalt und Schwefelgehalt Einfluss auf die Emissionen.

Um die Auswirkung von Pflanzenöl auf die Abgaszusammensetzung zu untersuchen, wurden 20 Literaturstellen mit Angaben zu Emissionen von unterschiedlichen pflanzenöлтаuglichen Motoren ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Betrieb mit Pflanzenöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff nahezu unverändert bleiben, die HC-, CO- und Partikelmasse-Emissionen liegen dagegen beim Betrieb mit Pflanzenöl im Mittel aller Angaben um 50 % höher. Dies ist vor allem im unteren und oberen Lastbereich, beim Einsatz von nicht speziell auf den Pflanzenölbetrieb abgestimmten oder nicht dem Stand der Technik entsprechenden Motoren der Fall. Werden dagegen die speziell auf Pflanzenöl angepassten Motoren gesondert betrachtet, so können zwischen den Kraftstoffen keine Unter-

schiede bei den CO-Emissionen und bei HC sogar deutlich niedrigere Emissionen festgestellt werden. Fundierte Aussagen über den Einfluss der Pflanzenölqualität auf die Emissionen lassen sich nicht ableiten, weil dies nur selten Gegenstand bisheriger Untersuchungen war und darüber hinaus die Qualität des Pflanzenöls nur bei etwa einem Drittel aller Untersuchungen dokumentiert wurde. Trotzdem zeichnet sich ab, dass sich das Fettsäuremuster auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen auswirkt. Daneben kann der Sauerstoffgehalt im Pflanzenölmolekül für die im Vergleich zu Dieselkraftstoff höheren Aldehydemissionen verantwortlich gemacht werden. Zur Gruppe Benzol, Toluol, Xylol liegen bisher nur wenige, zu anderen Verbindungen wie Dioxine und Furane sowie Lachgas oder Ammoniak keine Messungen vor. Aufgrund der stationären Betriebsbedingungen erscheint der Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen in BHKW hinsichtlich eines niedrigen Schadstoffausstoßes besonders vorteilhaft.

Erste Messungen an Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken haben gezeigt, dass die für diese Anlagengrößen empfohlenen Emissionsbegrenzungen nach TA-Luft (neu) für CO durchwegs und für NO<sub>x</sub> überwiegend eingehalten werden. Die empfohlenen Staub-Emissionsbegrenzungen für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (< 1MW, FWL) werden von keiner der Anlagen, für die Messwerte zur Verfügung standen, erreicht. Sowohl beim Betrieb eines Blockheizkraftwerktyps aber auch zwischen den verschiedenen Anlagen gibt es große Unterschiede bei der Zusammensetzung des Abgases. Dies ist unter anderem auf die teilweise sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen zurückzuführen (z.B. Motorbauart, Motoreinstellung, Abgasreinigung, Kraftstoffqualität), die jedoch häufig nur unzureichend dokumentiert sind. Aus diesen großen Spannbreiten von Emissionsmesswerten kann ein umfangreiches Optimierungspotential zur Minimierung von Schadstoffen geschlossen werden.

Um dieses Potenzial nutzen zu können, müssen zuerst wesentliche Zusammenhänge zwischen der Kraftstoffqualität und den Emissionen aufgedeckt werden. Dafür ist es sinnvoll über einen längeren Zeitraum hinweg, gezielt definierte Kraftstoffqualitäten in Motoren einzusetzen und dabei die wesentlichen Betriebsparameter, insbesondere die Abgaskonzentrationen, zu dokumentieren. Die gewonnenen Daten können sowohl als Grundlage für eine technische Bewertung, als auch zur ökologischen Bilanzierung von pflanzenölbetriebenen BHKW dienen.

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] **AMS:** Abgaswerte nach TA-Luft gemessen durch A.M.U. GmbH Unternehmensgruppe TÜV Bayern. 1994
- [2] **AMS:** Abgaswerte nach TA-Luft. 1993
- [3] **Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU):** Mustergutachten zum Immissionschutz für stationäre Dieselmotore, Augsburg; Stand 2001
- [4] **Becker, R.F.:** Potential zur Verbesserung des Abgasverhaltens konventioneller Kraftstoffe. In: Kraftstoffe und Ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren, Lehrgang Nr. 23421/64.139, 14. u. 15. Mai 1998, Technische Akademie Esslingen.
- [5] **Belitz, H.-D. und W. Grosch:** Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1992. 966 Seiten
- [6] **Binder, K.:** Minderung der Stickoxid- und Partikelemission durch Diesel/Wasser-Emulsion. mineralöl technik (1992), Nr. 12, S. 1-20
- [7] **Bouché, T.; M. Hinz; D. Hieber und H. Tschöke:** Einfluß verschiedener Pflanzenöleigenschaften auf Verbrennung und Schadstoffbildung in einem direkteinspritzenden Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift, Vol. 58 (1997), Nr. 3, S. 148-154
- [8] **Bockisch, M.:** Nahrungsfette und -öle. Ulmer-Verlag Stuttgart 1993. 694 Seiten
- [9] **Bosch GmbH:** Diesel-Einspritztechnik. 1. Ausg., Düsseldorf, VDI-Verl., 1993, 199 S.
- [10] **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)** vom 15.03.1974, i.d.F. vom 14.05.1990 (BGBl. I. S.880), zuletzt geändert am 09.10.1996 (BGBl. I. S.1498)
- [11] **Burggraf, J. und K. Ullrich:** Die neuen ölgekühlten ECO-Pflanzenölmotoren MF-RTA von DMS. AAJOURNAL367 (1995), Vol. 56, Nr. 2, S. 101-103
- [12] **Cabra, L.:** The European Auto-Oil Results: Questions and Challenges for the Future. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 35 - 46.
- [13] **Dabelstein, W.E.A.; J.A. Cooke und J.M. Marriott:** Zum Einfluß der Kraftstoffqualität auf die Abgasemissionen moderner Fahrzeugdieselmotoren. Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim, am 13. März 1991. mineralöl technik, Vol. 36, Nr. 12, S. 1-18
- [14] **Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaft e.V., Münster (Hrsg.):** DGF-Einheitmethoden, Deutsche Einheitmethoden zur Untersuchung von Fetten, Fettprodukten, Tensiden und verwandten Stoffen. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart 1994.
- [15] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 8178: Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Abgasmessung; Teil 1, Teil 2, Teil 4, Teil 6; Beuth Verlag GmbH. 1996
- [16] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN 590: Dieselkraftstoff. Mindestanforderungen und Prüfverfahren. Beuth Verlag GmbH. 1993
- [17] **Dickerson, R.E. und I. Geis:** Chemie. Verlag Chemie Weinheim, Germany, S. 366 ff.



- [18] **Dobiasch, A.; R. Meyer-Pittroff; A. Gifhorn und H. Schöberl:** Emission Situation of Regenerative-Fuel-Powered Diesel Engines. (1997), S. 1-7
- [19] **Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz** (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27. Februar 1986 (GMBI. S. 95, ber. S. 202)
- [20] **Europäische Union:** Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates. Amtsblatt Nr. L 350 vom 28.12.1998, S. 0001-0057
- [21] **Europäische Union:** Richtlinie 2001/63/EG der Kommission vom 17. August 2001 zur Anpassung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte an den technischen Fortschritt. Amtsblatt Nr. L 227 vom 23.08.2001, S. 0041 - 0043
- [22] **Fränkle, G.:** Zur Abgasgesetzgebung für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. In: Essers, U. (Hrsg.): Dieselmotorentechnik 98 (1997). Renningen-Malmsheim; expert-Verlag, 553, S. 15-55
- [23] **Friedrich, A. et al.:** Ökologische Bilanz von Rapsöl und Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselmotorkraftstoff, Mindestanforderungen und Prüfverfahren (Ökobilanz Rapsöl), TEXTE 4/93 Berlin; Umweltbundesamt, 1993
- [24] **Gairing, M.:** Anforderungen von Dieselmotoren an ihre Kraftstoffe. In: Kraftstoffe und Ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren, Lehrgang Nr. 23421/64.139, 14. u. 15. Mai 1998 Technische Akademie Esslingen.
- [25] **Geiger, M.:** Einsatz von Oxidationskatalysatoren für RME-betriebene Fahrzeuge - Untersuchung von Katalysatoren hinsichtlich ihrer Alterung mittels Abgasmessung. Diplomarbeit, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt-Aschaffenburg, Abteilung Schweinfurt, Fachbereich Maschinenbau, 12.1995
- [26] **Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG** Fassung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880, 1193; 1997 S. 808; 1998 S. 510, S. 3178)
- [27] **Glass, R.; T. Bouche und K. Ullrich:** Engine Test Stand Studies on Performance, Emissions and Durability of a DI Diesel Engine Fuelled with Rapeseed Oil [Motorprüfstandsuntersuchungen der Leistung, Emissionen und Lebensdauer eines direkteinspritzenden Dieselmotors]. In: (Hrsg.): Konferenz-Einzelbericht: 21st International Congress on Combustion Engines CIMAC in Intelaken (CH), (1995), S. 1-17
- [28] **Gruden, D.:** Kraftstoffe, PKW-Motoren und Umwelt. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 1 - 11
- [29] **Häntsche, J.:** Ergebnisse des Anwendungsprojektes "Pflanzenöl Sachsen-Anhalt". In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126, (1994), S. 279-304
- [30] **Havenith, C.:** Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugmotoren bei Verwendung von Pflanzenölen. In: (Hrsg.): VDI Bericht Nr. 885 (1991), S. 129-144

- [31] **Henschler, D.:** Bedeutung der Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren für den Menschen und die Umwelt. Tagungsband zum Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. CARMEN e.V.; S. 14 - 18
- [32] **Herrmann, S.:** Einsatz unveränderter alternativer Treibstoffe und ihrer Mischungen im direkteinspritzenden Dieselmotor. Diplomarbeit. Schweizerische Ingenieurschule für Landwirtschaft CH-Zollikofen. 1995
- [33] **Houben, M. und G. Lepperhoff:** Der Kraftstoffeinfluß auf die Partikelemission von Dieselmotoren. Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim, am 28. März 1990. mineralöl technik, Vol. 35 (1990), Nr. 10, S. 1-24
- [34] **Hüthwohl, J.:** Der Dieselmotor - Ein gleichzeitig wirtschaftliches und umweltfreundliches Antriebsaggregat durch Abgasreinigung. In: Tagungsband 2. Nahverkehrsforum Paderborn, Umweltgerecht und Bezahlbar, Antriebskonzepte des Nahverkehrs in Zukunft 11.-12. März 1998 Paderborn, S. 39-50.
- [35] **HUG Engineering AG:** Informationsmaterial
- [36] **Jansen, H.D. und M.C. Steffen:** Abpressen von Öl aus Nachwachsenden Rohstoffen. Die Mühle + Mischfuttertechnik 129 (1992), Nr. 17, S. 211-214
- [37] **Kampmann, J.:** Abgaszusammensetzung von Pflanzenölmotoren der Baureihe P 13,5. In: Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Tagungsband. Hrsg. C.A.R.M.E.N. e.V. Centrales Agrar-, Rohstoff-, Marketing und Entwicklungsnetzwerk, Rimpfing/Würzburg. 1994
- [38] **Kampmann, J.:** Wege zur Reduzierung der schädlichen Abgasemission an Pflanzenölmotoren. In Tagungsband: Katalysatoren für Pflanzenölmotoren, 2. Nordhäuser Motorenfachgespräch vom 12.07.1994, Nordhausen
- [39] **Kampmann, J.:** Dieselmotor mit Direkteinspritzung für Pflanzenöl. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 54, (1990), Nr. 7/8, S. 378-383.
- [40] **Kern, C. und B.A. Widmann:** Bewertung der Emissionen von Dieselmotoren beim Betrieb mit Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis und normalem Dieselmotorkraftstoff - Datenauswertung der bisherigen Labor- und Flottenversuche. Abschlußbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, November 1997
- [41] **Kern, C.; Widmann, B., Schön, H., Maurer, K. und T. Wilharm:** Standardisierung von Pflanzenöl - Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren. Landtechnik 52. Jg., Heft 2 1997, S. 68 - 69
- [42] **Klingenberg, H.:** Automobile Exhaust Emission Testing - Measurement of Regulated and Unregulated Exhaust Gas Components, Exhaust Emission Tests. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1996
- [43] **Koßmehl, S.-O.:** Statement von Volkswagen in der Arbeitsgruppe „Interactions between Engines and Fuel“. International Conference on Standardization and Analysis of Biodiesel, 11.1995, Wien, S. 100 - 101
- [44] **Krahl, J.; G. Vellguth; A. Munack; K. Stalder und M. Bahadir:** Exhaust Gas Emissions and Environmental Effects by Use of Rape Seed Oil Based Fuels in Agricultural Tractors. SAE Technical Paper Series (1996), Nr. 961847, S. 1-13
- [45] **Krahl, J.; A. Munack und M. Bahadir:** Emissionen bei der Verwendung von Rapsöl, RME oder Dieselmotorkraftstoff sowie vergleichende Abschätzung ihrer Umweltwirkungen - eine Übersicht. Landbauforschung Völknerode, Vol. 44 (1994), Nr. 2, S. 182-196

- [46] **Krahl, J. und G. Vellguth:** Vergleichende Untersuchungen von Leistungen, Verbrauch und Emissionen der verschiedenen Motorkonzepte. Bericht zum erweiterten Versuchsvorhaben mit Rapsölmotoren des Landes Niedersachsen. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL) 1993. 147 S.
- [47] **Krumm, H.; und Reglitzky, A. A.:** Saubere Luft und Klimaschutz - zwei gegensätzliche Ziele? Mineralöltechnik, Heft 1, 01.1995, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik mbH
- [48] **Lange, W.W.; H. Schlögl, P. Gadd; K. Richter, A.A. Reglitzky und J.J. Zürner:** Das Potential der Kraftstoffqualität für die Verbesserung von Verbrennung und Emissionsverhalten abgasoptimierter Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Dieselmotorentechnik, Hrsg.: Essers, U.; Prescher K.-H. 5. Symposium am 7. und 8. 12. 1995, Esslingen, S. 3 - 14
- [49] **Lange, W. et al.:** Kraftstoffeigenschaften und deren Einfluß auf die Abgasemissionen moderner Mercedes-Benz Dieselmotoren; Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim, am 12. April 1994. mineralöl technik, Vol. 39 (1994), Nr. 11, S. 1-24
- [50] **Lange, W.; A.A. Reglitzky, H. Krumm und L.T. Cowley:** Einfluß des Dieselmotorkraftstoffes auf die Abgasemissionen von Nutzfahrzeugen. mineralöl technik, Vol. 38 (1993), Nr. 11, S. 1-20
- [51] **Lüde, R.:** Die Gewinnung von Fetten und Ölen. In: Rassow, B.: Technische Fortschrittsberichte, Bd. 47, 3. Auflage. Verlag Steinkop Leipzig 1954
- [52] **Maurer, B.:** Das CRT-System (Continuously Regenerating Trap) im Biodiesel-Einsatz. In: Fachtagung Biodiesel - Optimierungspotentiale und Umwelteffekte, Informationen, Erfahrungsaustausch, Perspektiven. 12.-13. Juni 1998, Forum der FAL Braunschweig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Fachhochschule Coburg.
- [53] **Maurer, K.:** Umweltverträglichkeit von pflanzenölbetriebenen BHKW. Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen (Universität Hohenheim)
- [54] **May, H.; W. Dietrich, U. Hattingen und C. Birkner:** Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Dieselmotoren. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 183-204
- [55] **May, R.; U. Hattingen, C. Birkner und H.U. Adt:** Neuere Untersuchungen über die Umweltverträglichkeit und die Dauerstandfestigkeit von Vorkammer- und direkteinspritzenden Dieselmotoren bei Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (Hrsg.): Aspekte alternativer Energieträger für Fahrzeugantriebe - Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik, Wolfsburg, 24. bis 26. November 1992. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1020 (1992), S. 189-212
- [56] **May, H.; U. Hattingen, P. Klee und M. Spitz:** Untersuchungen zum vergleichenden Einsatz von Dieselmotorkraftstoff und Rapsölmethylester an verschiedenen Dieselmotoren. Bericht an das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, 1994
- [57] **Menrad, H.; K. Weidmann, W. Bernhardt, G. Heilmann und U. Behn:** Rapsöl als Motorenkraftstoff? Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim, am 12 April 1989. mineralöl technik, Vol. 34 (1989), Nr. 5-6, S. 1-48
- [58] **Mollenhauer, K.:** Handbuch - Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag (1997). 1029 S.
- [59] **Neuendorf, S.:** Experimentelle Untersuchungen zur Minderung der Partikel- und Stickoxidemissionen aus Pkw-Dieselmotoren mit Oxidationskatalysatoren und selektiver katalytischer Reduktion. Dissertation (1994), Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal.
- [60] **N.N.:** Messung bei Abnahme (BHKW), Abgaswerte nach TA-Luft.

- [61] **N.N.:** Richtlinie 88/77/EWG: Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen (geändert durch 91/542/EWG). Rat der Europäischen Gemeinschaften.
- [62] **N.N.:** Regelung Nr. 49: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Motoren mit Selbstzündung und der mit einem Motor mit Selbstzündung ausgerüsteten Fahrzeuge hinsichtlich der Emissionen von Schadstoffen aus dem Motor. ECE Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa.
- [63] **Oberland Mangold GmbH**, Garmisch-Partenkirchen, Informationsmaterial
- [64] **Obernberger, I.:** Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung Band 1, dbv-Verlag für die Technische Universität Graz 1997, 349 S.
- [65] **Prescher, K. und A. Stanev:** Die Aldehydemission von Dieselmotoren in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität und Maßnahmen zur Verringerung. In: Essers, U. (Hrsg.): Dieselmotorenteknik 98 (1997). Renningen-Malmsheim; Expert-Verlag, 553, S. 152-173
- [66] **Remmele, E.; K. Thuneke; B. Widmann; T. Wilharm und H. Schön:** Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenölaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - Endbericht zum Forschungsvorhaben., Bd. "Gelbes Heft" Nr. 69. München: Hrsg. und Druck: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2000) 217 S.
- [67] **Remmels, W. und A. Velji:** Grundsatzstudie: Einfluß der Abgasrückführung auf Emission und Wirkungsgrad. In: Die Stickoxidemission - Die Herausforderung an den Dieselmotor“ 2. Dresdner Motorenkolloquium. 15. und 16. Mai 1997.
- [68] **Richter, H.; V. Korte und N. Hemmerlein:** Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Forschungsbericht: Dr.-Ing.hc. F. Porsche AG, Entwicklungszentrum Weissach (1991). 113 S.
- [69] **Sachse, J.:** Minimierung der Abgasemission von Pflanzenölmotoren. In: Thüringer Motorenwerke GmbH Nordhausen (Hrsg.): Katalysatoren für Pflanzenölmotoren. 2. Nordhäuser Motorenfachgespräch. Nordhausen (1994): Eigenverlag, S. 7-19
- [70] **Sams, T. und J. Tieber:** Raps- und Altspeiseölmethylester im realen Fahrzeugbetrieb. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 391 - 404
- [71] **Schulz, H.; G. Bandeira de Melo und F. Ousmanov:** Volatile Organic Compounds and Particulates as Constitutes of Diesel Engine Exhaust Gas. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 111 - 123
- [72] **Stiesch, G.; P. Günter und K. Groth:** Anpassung eines Schleppermotors an die Anforderungen des Betriebs mit RME. In: Fachtagung Biodiesel - Optimierungspotentiale und Umwelteffekte, Informationen, Erfahrungsaustausch, Perspektiven. 12.-13. Juni 1998, Forum der FAL Braunschweig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Fachhochschule Coburg.
- [73] **StMLU:** Schreiben vom 26.11.1996, Az.: 8267-7/84-41178 zum Vollzug des BImSchG; Rußfiltertechnologie bei stationären Selbstzündungsmotoren, 1996.
- [74] **StMLU:** Schreiben vom 06.08.1991 Nr. 8221-333-37615 (AllMBI Nr.22/1991, S.634), 1991.
- [75] **Syassen, O.:** Chancen und Problematik nachwachsender Kraftstoffe. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 53 (1992), Nr. 11/12, S. 510-518 und 560-568

- [76] **Thomas, A.F.:** Fette und Öle. In: Bartholomé, E. et al.: Ullmann's Enzyklopädie der technischen Chemie. 4., Neubearb. und erw. Auflage Band 11. Verlag Chemie. Weinheim/Bergstr. S. 455-548
- [77] **Ter Rele; Houser und Crosby:** Der Einfluß von Einlaßventilablagerungen auf Abgasemissionen; Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim am 12. April 1994. mineralöl technik, Vol. 39 (1994), Nr. 10, S. 1-20
- [78] **Thuneke, K., H. Link, B. Widmann und E. Remmele:** Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung - Endbericht zum Forschungsvorhaben (2001) 152 S.
- [79] **Tritthart, P.:** Dieselpartikelemissionen: Analysetechniken - Erfahrungen - Ergebnisse - Vortrag, gehalten auf der Technischen Arbeitstagung Hohenheim, am 14. April 1994. mineralöl technik, Vol. 39 (1994), Nr. 8, S. 1-20
- [80] **Tschöke, H:** Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren - Chance oder Irrweg? Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 405 - 420
- [81] **Tschöke, H; Heinze, H.E.; Hieber, D.:** Raps und Rapsölmethylester - wirklich eine Alternative zum Dieselmotoren aus Erdöl? Dieselmotorentchnik, Hrsg.: Essers, U.; Prescher K.-H. 5. Symposium am 7. und 8. 12. 1995, Esslingen, S. 43 - 69
- [82] **Vellguth, G.:** Emissionen bei Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schlepper-Dieselmotoren. Grundlagen der Landtechnik, Vol. 37 (1987), Nr. 6, S. 207-213
- [83] **Verband Deutscher Ölmühlen (Hrsg.):** Warum der 00-Raps so interessant für uns ist... (Arbeitsheft zur Foliensammlung)
- [84] **Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 4. BImSchV - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen Fassung vom 14. März 1997 (BGBl. I 1997 S. 504, S. 548; 1998 S. 723; 1999 S. 186)**
- [85] **VWP:**, Abgaswerte nach TA-Luft Prüfstelle TÜV Bayern und Abgasprüfstelle Berlin-Adlershof GmbH
- [86] **Wahl, T.; E. Jacob und W. Weisweiler:** NOx-Verminderung bei Dieselmotoren - Teil 1: Modellgasuntersuchungen mit stickstofffreien Reduktionsmitteln. AAJOURNAL367, Vol. 57 (1987), Nr. 9, S. 506-514
- [87] **Wedel, v.H.:** Erhaltung und Schmierfähigkeit von Niedrigschwefel-Dieselmotoren durch Additivierung. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 203- 212
- [88] **Weidmann, K.:** Einsatz von rapsölstämmigen Kraftstoffen in Dieselmotoren. Schriftenreihe Praxis-Forum, Nr. 14 (1994), S. 151-172
- [89] **Weisweiler, W. und B. Maurer:** Stickoxid-Verminderung in Abgasen von Diesel- und Mager-Otto-Motoren nach dem SCR-Verfahren. In: Essers, U. (Hrsg.): Dieselmotorentchnik 98. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 553 (1997), S. 92-117
- [90] **Widmann, B.A.:** Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung des Phosphorgehaltes von Rapsöl bei der Gewinnung in dezentralen Anlagen . Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan. Forschungsbericht Agrartechnik MEG 262. Freising-Weihenstephan 1994 (157 Seiten)
- [91] **Widmann, B.A.; T. Kaiser und D. Brand:** Technische Eignung von naturbelassenem, nicht additiviertem Rapsöl für den Einsatz als Sägekettenöl. Abschlußbericht: Landtechnik Weihenstephan, Freising und Institut für Energie- und Umwelttechnik, München (1994). 61 S.

- [92] **Widmann, B.A.:** Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen - Einflußfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozeß. Forschungsbericht. „Gelbes Heft“ Nr. 51. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1994, 310 S.
- [93] **Widmann, B.A., R. Apfelbeck, B.H. Gessner, P. Pontius:** Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht. „Gelbes Heft“ Nr. 40. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München 1992, 650 S.
- [94] **Zeiner, W.:** Beeinflussung von Abgaskatalysatoren durch Phosphor im Kraftstoff. International Conference on Standardization and Analysis of Biodiesel, 11.1995, Wien, S. 79 - 83
- [95] **Zelenka, P.:** Abgasnachbehandlungssysteme im Hinblick auf die Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte. Dieselmotorentchnik, Hrsg.: Essers, U.; Prescher K.-H. 5. Symposium am 7. und 8. 12. 1995, Esslingen, S. 241 – 262
- [96] **Zell, B.:** Bayerisches Landesamt für Umweltschutz „Emissionsauflagen und Genehmigungspraxis bei Biogas- und Pflanzenöl-BHKW“, Zweites Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg; 23. November 2000 in Kloster Banz, Staffelstein

