



**„regOel“  
regionales, regeneratives Pflanzenöl als  
Kraftstoff**

Endbericht zum AP 100

Kurzfassung

„Technisch wissenschaftliche Grundlagen der  
Pflanzenöltechnik“

Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Amberg, den 7. März 2004

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Biogene Flüssigkraftstoffe .....</b>	<b>6</b>
2.1. Nachhaltigkeit.....	6
2.2. Bereitstellungsketten von Biodiesel, Vollraffinat, Rapsöl.....	7
2.2.1. Biodiesel.....	8
2.2.2. Kaltgepresstes Pflanzenöl.....	10
2.2.3. Vollraffinat .....	11
2.3. Qualitätsnorm Pflanzenöl .....	13
2.4. Notwendigkeit der Anpassung von Verbrennungsmotoren an die Kraftstoffeigenschaften von kaltgepressten Pflanzenölen.....	14
<b>3. Pflanzenöлтаugliche Verbrennungsmotoren.....</b>	<b>16</b>
3.1. Die Anpassung von Seriendieselmotoren an den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen .....	16
3.1.1. Die Maßnahmen zur Umrüstung von Seriendieselmotoren auf den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen .....	16
3.1.2. Die Umrüstkonzepete der verschiedenen Anbieter .....	19
<b>4. Motorbetrieb mit Pflanzenöl.....</b>	<b>24</b>
4.1. Bisher durchgeführte Praxis- und Feldversuche .....	24
4.1.1. Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren – Studie der Porsche AG .....	24
4.1.2. Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Studie des BayStMELF .....	25
4.1.3. Betriebs- und Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener BHKW – Studie des BayStMLU .....	25



4.1.4. Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke im Alpengebiet – Erhebung der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik.....	26
4.1.5. Betriebsverhalten und Emissionen von rapsölbetriebenen BHKW – Studie der Österreichischen Bundesanstalt für Landtechnik.....	26
4.1.6. Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen – Studie der Universität Hohenheim im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. ....	27
4.1.7. Flottenversuch Pflanzenölbetriebene Fahrzeuge in Bayern.....	27
4.1.8. Flottenversuch Pflanzenölbetriebene Fahrzeuge in Sachsen.....	28
4.1.9. Projekt Regioöl Nordrhein-Westfalen.....	28
4.1.10. 100-Schlepper-Programm.....	29
<b>5. Zusammenfassung.....</b>	<b>30</b>

## 1. Einleitung

Die Nutzung biogener Kraftstoffe auf Pflanzenölbasis kann ein wichtiger Baustein in der nachhaltigen Regionalentwicklung sein.

Das Landesentwicklungsprogramm Bayern ( LEP ) ist das landesplanerische Gesamtkonzept für die räumliche Entwicklung und Ordnung Bayerns. Die wesentlichen Vorsorgeschwerpunkte sind der Klimaschutz, der Hochwasserschutz, der Alpenschutz, die Flächenvorsorge, der Naturschutz, das zentrale-Orte-System, eine leistungsfähige Infrastruktur sowie die Stärkung der regionalen Verantwortung.

Vor dem Hintergrund des rapiden Wandels in Wissenschaft und Technik sowie der Globalisierung und EU-Osterweiterung hat das LEP das Ziel, einen nachhaltigen Entwicklungskurs für heutige und künftige Generationen zu bestimmen. Oberste Maxime der Landesplanung ist die Schaffung und Erhaltung gleichwertiger, gesunder Lebens- und Arbeitsbedingungen. Das Nachhaltigkeitsprinzip im Sinne der 1992 in Rio aufgestellten Agenda 21 mit dem Gleichklang von Ökologie, Ökonomie und Soziales / Kultur ist Wertmaßstab.

Zur Wahrung nachhaltiger Lebensbedingungen ist darauf hinzuwirken, dass Energie stets in ausreichender Menge kostengünstig, sicher und umweltschonend in allen Landesteilen zur Verfügung gestellt wird. Die bayerische Energieversorgung soll im Interesse der Nachhaltigkeit auch künftig auf einem ökologisch und ökonomisch ausgewogenen Energiemix aus den herkömmlichen Energieträgern Mineralöl, Kohle, Erdgas und Kernenergie, verstärkt aber auch erneuerbaren Energien beruhen. Auf allen Sektoren und Ebenen soll auf sparsamen, rationellen Umgang mit Energie und den Einsatz besonders effizienter Energieerzeugungs- und verbrauchstechnologien hingewirkt werden. Der Ausbau und die Optimierung der Energieversorgung soll insbesondere in enger Abstimmung mit den an Bayern angrenzenden Ländern erfolgen. Darüber hinaus soll auf eine verstärkte europäische Integration im Energiebereich hingewirkt werden.

Im Themfeld der Erneuerbaren Energien gilt es die Wasserkraft, Biomasse, direkte und indirekte Sonnenenergienutzung, Windkraft und Geothermie verstärkt zu erschließen und zu nutzen.

Im Themenfeld Klimaschutz und Luftreinhaltung wird auf die Verringerung verkehrsbedingter Schadstoffemissionen, insbesondere der Stickstoffoxide und der Partikel hingewiesen. Auf die Verwendung von schadstoffarmen oder schadstofffreien Energieträgern und Energieversorgungssystemen und auf besonders emissions- und immissionsmindernde Maßnahmen soll hingewirkt werden. Auch einer grenzüberschreitenden großräumigen Verfrachtung von Luftverunreinigungen soll entgegengewirkt werden.

Durch verstärkten Einsatz schadstofffreier oder besonders schadstoffarmer Kraftfahrzeuge soll auf eine Verringerung verkehrsbedingter Luftschadstoffe insbesondere in den Verdichtungsräumen oder lufthygienisch besonders schutzwürdigen Gebieten hingewirkt werden.

Biogene Flüssigkraftstoffe können in konventionellen modifizierten Seriidieselmotoren in PkW-, LkW- und Stationärdieselmotoren genutzt werden und sämtliche Forderungen eines nachhaltigen und zukunftsfähigen Energieträgers erfüllen.

- Pflanzenöl kann verfahrenstechnisch einfach in mechanischen Pressen von der Bevölkerung hergestellt, gelagert und transportiert werden und somit Dieselkraftstoff und Benzin substituieren.
- Pflanzenöl ist CO<sub>2</sub>-neutral, d.h. bei der Verbrennung wird nur die Menge an CO<sub>2</sub> emittiert, die während der Vegetationsphase von der Pflanze absorbiert wurde. Darüber hinaus geht von Pflanzenöl als Motorkraftstoff keinerlei Trinkwasser- und Gesundheitsgefährdungspotential aus und es ist zudem schwefelfrei.
- Die Schadstoffemissionen der mit Pflanzenkraftstoff betriebenen Dieselmotoren sind niedriger als bei Verwendung von Dieselkraftstoff. Hierbei sind insbesondere die Partikelemissionen zu nennen.
- Die Kaufkraft für Kraftstoffe wird regional gebunden.
- Es können Arbeitsplätze in der Kraftstoffgewinnung, der Motorwartung und -umrüstung geschaffen werden.
- Die wirtschaftliche Entwicklung, insbesondere der Aufbau weiterer mittelständischer Strukturen, wird günstig beeinflusst.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen der Pflanzenöltechnologie und geht speziell auf bisher durchgeführte Praxistests und Betriebserfahrungen ein. Allen Beteiligten, insbesondere Frau Mitterbauer, Herrn Dipl.-Ing. Pionkowski, Herrn Lechner sowie den Kollegen von regOel gilt für die angenehme Zusammenarbeit herzlicher Dank.

Amberg, den 7.3.2004

Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

## 2. Biogene Flüssigkraftstoffe

Biogene Flüssigkraftstoffe sind keinesfalls neu. Mit Pflanzenöl experimentierte um die Jahrhundertwende bereits Rudolf Diesel. 1912 formulierte er in seiner Patentschrift zu einem Zeitpunkt als Energiekrisen, Klimaveränderung und Ozonloch noch nicht diskutiert wurden: „Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute.“

### 2.1. Nachhaltigkeit

Aufgrund ihrer Eigenschaften bieten Pflanzenölkraftstoffe besondere Vorteile hinsichtlich Ökologie, Sozialverträglichkeit und Ökonomie:

- Pflanzenölkraftstoffe sind CO<sub>2</sub>-neutral, d. h. bei der Verbrennung wird nur die Menge an CO<sub>2</sub> emittiert, die während der Vegetationsphase von der Pflanze absorbiert wurde. Es liegt ein geschlossener Kohlendioxidkreislauf vor.
- Da Pflanzenölkraftstoffe nahezu schwefelfrei sind, lassen sich Schwefeldioxidemissionen und auch die Gefahr der Katalysatorvergiftung durch Schwefel im Kraftstoff vermeiden.
- Die Schadstoffemissionen sind beim Betrieb von Dieselmotoren mit PÖ-Kraftstoffen niedriger als beim Betrieb mit Dieselmotoren. Hierbei sind insbesondere die Partikelemissionen und die an den Partikeln angelagerten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe zu nennen.
- Pflanzenölkraftstoffe sind durch ihre schnelle biologische Abbaubarkeit und durch ihre geringe Toxizität ökologisch wesentlich günstiger als Dieselmotoren und eignen sich somit auch für umweltsensible Gebiete mit besonderen Anforderungen an den Boden- und Gewässerschutz.
- Pflanzenöle stellen einfachere Anforderungen an Lagerung und Transport: Da Pflanzenöle ein flüssiger Energieträger mit hoher Energiedichte sind, bedürfen sie eines geringen Lager- und Transportraumbedarfs. Zudem bieten sie aufgrund ihres hohen Flammpunktes Sicherheit bei Lagerung und Transport.
- Da Pflanzenölkraftstoffe von der Mineralölsteuer befreit sind, bieten sie zudem einen Kostenvorteil.
- Pflanzenöle werden als regenerative Energieträger in der Landwirtschaft hergestellt und schonen somit nicht nur endliche Ressourcen, sondern sind auch regional verfügbar. Erzeugung, Transport, Lagerung und Verwertung erfolgt vor Ort und damit

kann die Wertschöpfung und Arbeitsplätze auch in strukturschwachen Gebieten gesichert und geschaffen werden.

## 2.2. Bereitstellungsketten von Biodiesel, Vollraffinat, Rapsöl

Pflanzenöle werden aus den Samen oder Früchten von Ölpflanzen gewonnen. Eine kleine Übersicht über wichtige europäische und außereuropäische Ölpflanzen ist in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Übersicht über europäische und außereuropäische Ölpflanzen**

Europäische Ölpflanzen	Außereuropäische Ölpflanzen
Olivenbaum (Ölbaum)	Ölpalme
Raps	Kokospalme
Rübsen (Rübsamen, Rübsaat)	Sesam
Sonnenblume	Rizinus (Christpalme)
Schwarzer und weißer Senf	Purgiernuß
Dotter (Lein- oder Flachsdotterkraut)	Baumwolle
Mohn	Kapokbaum(Baumwollbaum)
Flachs (Lein)	Erdnuß
Hanf	Sojabohne
Madie (Korbblüterkraut)	Mandelbaum
Koriander	
Fenchel	
Wolfsmilch (Euphorbia)	

Im Folgenden dieser Arbeit wird ausschließlich auf Kraftstoffe aus Rapsöl eingegangen.

Ausgangsbasis für die Herstellung von Rapsöl ist das Rapskorn, das bei der Ernte vom Stroh getrennt wird. Das Rapsöl kann entweder in Kleinanlagen ausschließlich durch Pressung oder in großen Ölmühlen durch Pressung und/oder Raffination gewonnen werden. Bei der Ölgewinnung entstehen dabei Öl und Rückstände, die je nach eingesetztem Verfahren als Presskuchen bzw. Extraktionsschrot bezeichnet werden.

RME wird durch Veränderung des molekularen Aufbaus von Pflanzenöl durch Umesterung gewonnen. Die derzeit existierenden und geplanten Umesterungsanlagen erfordern Ölmengen, die ausschließlich im großindustriellen Maßstab bereitgestellt werden können.



sind für Pflanzenölmethylester in mehreren Ländern Normungsaktivitäten weit fortgeschritten, die die motorrelevanten Eigenschaften solche Kraftstoffe festschreiben soll. Tabelle 2 zeigt die Mindestanforderung an Fettsäuremethylester gemäß dem deutschen Normungsentwurf DIN 51606.

Tabelle 2: Mindestanforderungen an Fettsäuremethylester in Deutschland

Eigenschaften	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		Min.	Max.	
Dichte bei 15° C	g/ml	0,875	0,900	ISO 3675
Kinematische Viskosität bei 40° C	mm <sup>2</sup> /s	3,5	5,0	ISO 3104
Flammpunkt im geschlossenen Tiegel nach Pensky-Martens	° C	100		ISO 2719
Grenzwert der Filtrierbarkeit (CFPP) 15.04. bis 30.09. 01.10. bis 15.11. 16.11. bis 28.02. (in Schaltjahren bis 29.02.) 01.03. bis 14.04.	° C		0 -10 -20 <sup>1)</sup> -10	DIN EN 116
Schwefelgehalt (Massenanteil)	%		0,01	ISO 4260
Koksrückstand (Massenanteil) von 10 % Destillationsrückstand nach Destillation unter vermindertem Druck bei 1,33 Pa (1,33·10 <sup>-2</sup> mbar)	%		0,30	ISO 10370
Zündwilligkeit (Cetarizahl)		49		ISO 5165
Asche (Massenanteil)	%		0,01	ISO 6245
Wassergehalt (Massenanteil)	mg/kg		300	ASTM D 1744
Gesamtverschmutzung (Massenanteil)	mg/kg		20	DIN 51 419
Korrosionswirkung auf Kupfer (3 h bei 50° C)	Korrosionsgrad		1	ISO 2160
Oxidationsstabilität (UA, S, SA, TOP)		muß angegeben werden		IP 306
Neutralisationszahl	mg KOH/g		0,5	DIN 51 558 Teil 1
Methanolgehalt (Massenanteil)	%		0,3	ist noch zu normen
Monoglyceride (Massenanteil) Diglyceride (Massenanteil) Triglyceride (Massenanteil) Freies Glycerin (Massenanteil) Gesamtglycerin (Massenanteil)	Gew. -%		0,8 0,1 0,1 0,02 0,25	ist noch zu normen

Jodzahl (Massenanteil)	mg/kg		115	DIN 53 241 Teil 1
Phosphorgehalt (Massenanteil)			10	ist noch zu normen
<sup>1)</sup> Die Korrelation zwischen dem CFPP und dem Kaltfahrverhalten ist noch nicht hinreichend bekannt.				

### 2.2.2. Kaltgepresstes Pflanzenöl

Kaltgepresstes Pflanzenöl wird im so genannten kleintechnischen Verfahren (vgl. Abbildung 2) ohne thermische Vorbehandlung gepresst, so dass „im auslaufenden Öl keine höheren Temperaturen als 40°C auftreten“.

In der anschließenden Ölireinigung mit Sedimentation oder Filtration und der folgenden Feinfiltration werden die im Öl nach der Pressung enthaltenen Samenpartikel entfernt. Die in großtechnischen Anlagen üblichen Verfahrensschritte Konditionierung, Extraktion und Raffination des Pflanzenöls erfolgen bei diesem Verfahren nicht.

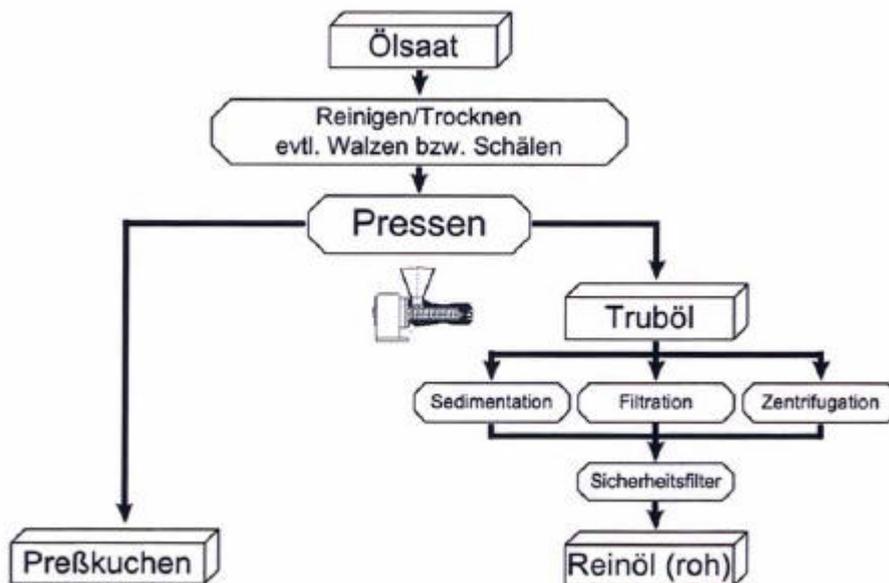


Abbildung 2: Verfahren der Ölgewinnung in dezentralen Anlagen

### 2.2.3. Vollraffinat

Das beim Vollraffinat angewandte Ölgewinnungsverfahren in zentralen Anlagen im industriellen Maßstab arbeitet wie in Abbildung 3 dargestellt mit einer Wärmebehandlung der Ölsaaten, anschließender Vorpressung und Lösungsmittelextraktion sowie mit einigen Schritten zur Raffination, um die in das Öl übergeführten unerwünschten Fettbegleitstoffe zu entfernen.

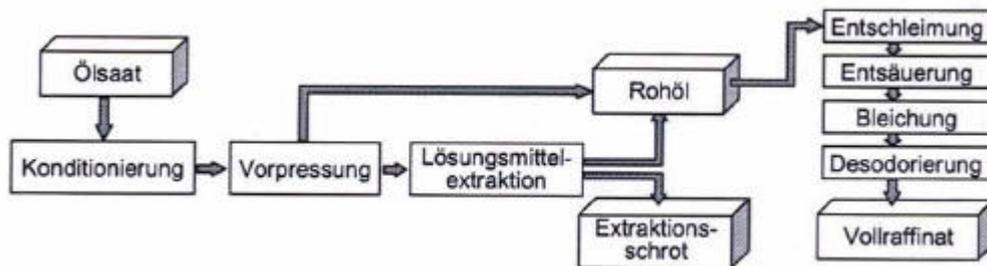


Abbildung 3: Verfahren der Ölgewinnung in zentralen Anlagen

Nach der Anlieferung in der Ölmühle wird die Rapssaaten zerkleinert und anschließend konditioniert, d.h. Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur werden eingestellt, um verschiedene Eigenschaften für die darauf folgende Pressung positiv zu beeinflussen.

Bei der Pressung fällt neben dem Rapsöl als weiteres Produkt Rapskuchen an, der einen Restölgehalt von ca. 15 bis 20 % aufweist. Bei der nun folgenden Lösungsmittelextraktion wird das restliche Öl durch Hexan aus dem Rapskuchen herausgelöst.

Die Entschleimung dient der Entfernung so genannter Schleimstoffe, in erster Linie Phospholipide, die sich negativ auf die Haltbarkeit und die Verwendbarkeit der Pflanzenöle in technischen Prozessen auswirken, da sie die Fließeigenschaften des Öls behindern. Werden die Schleimstoffe mit Wasser ausgewaschen, spricht man von wasserentschleimtem Öl.

Bei der Entsäuerung werden freie Fettsäuren durch Neutralisation oder Destillation entfernt.

Mit Hilfe der Bleichung werden Farbstoffe und deren Abbauprodukte sowie Reste von Seifen, Spurenmetallen und Schwefelverbindungen abgetrennt.

Durch die Desodorierung (Wasserdampfdestillation unter Vakuum) werden schließlich noch Oxidationsprodukte, die für unangenehmen Geschmack verantwortlich sind, und andere, arteigene Geschmacks- und Geruchsstoffe eliminiert.

Kalt gepresstes Pflanzenöl weist im Vergleich zu raffiniertem Pflanzenöl eine kräftigere Farbe und eine geringere Viskosität auf wie Abbildung 4 verdeutlicht.

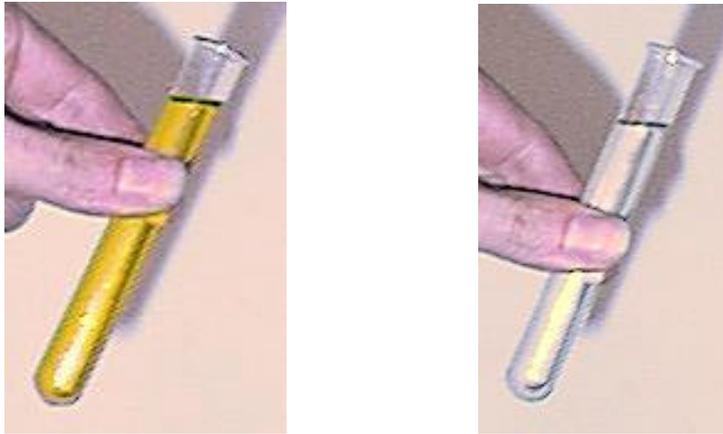


Abbildung 4: Kalt gepresstes Pflanzenöl (honigfarben, dickflüssig) und raffiniertes Pflanzenöl (klare Farbe, dünnflüssiger)

Abbildung 19 zeigt die Energiebilanz der Bereitstellung biogener Kraftstoffe vom Landbau bis zur Nutzung von kaltgepressten Ölen, Vollraffinaten bzw. Biodiesel. Es zeigen sich deutliche Vorteile für die dezentrale Nutzung heimischer kaltgepresster Rapsöle.

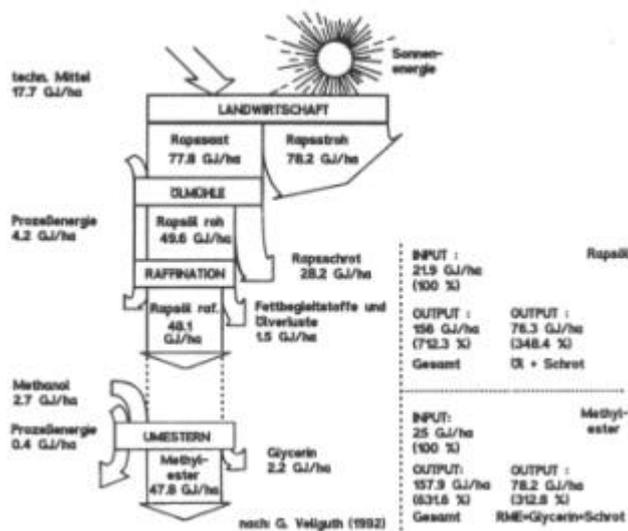


Abbildung 5: Energiefluss bei der Herstellung von kaltgepresstem Rapsöl, Vollraffinat und RME

### 2.3. Qualitätsnorm Pflanzenöl

Beim Einsatz von Rapsöl in dafür geeigneten Motoren ist es ebenso wie bei Dieselmotoren oder Rapsmethylester zwingend erforderlich, dass eine festgelegte und gesicherte Qualität des Kraftstoffes zugrunde gelegt wird. Ähnlich den Normen für Dieselmotoren EN 590 und Fettsäuremethylester E DIN 51 606 („Biodiesel“) wurde ein Qualitätsstandard erarbeitet, der im Mai 2000 verabschiedet wurde.

Eigenschaften / Inhaltsstoffe		Einheiten	Grenzwerte min.   max.		Prüfverfahren
<b>für Rapsöl charakteristische Eigenschaften</b>					
Dichte (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185	
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 22719	
Heizwert	kJ/kg	35000		DIN 51900-3	
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm <sup>2</sup> /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 6: Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) 05/2000

Im RK-Qualitätsstandard sind alle für den motorischen Betrieb wesentlichen Kenngrößen festgelegt und darüber hinaus Eigenschaften, die Rapsöl als solches identifizieren und von anderen Pflanzenölen bzw. Beimischungen zu unterscheiden helfen.

#### **2.4. Notwendigkeit der Anpassung von Verbrennungsmotoren an die Kraftstoffeigenschaften von kaltgepressten Pflanzenölen**

Pflanzenöle sind ebenso wie Dieselkraftstoff flüssige Kohlenwasserstoffe. Daher können alle Dieselmotoren grundsätzlich auch mit kaltgepressten Pflanzenölen betrieben werden. In der Praxis treten jedoch verschiedene Schwierigkeiten auf, die v. a. in der chemischen Struktur der Pflanzenöle begründet sind und denen mit geeigneten motorischen Maßnahmen begegnet werden muss.

Aufgrund der im Vergleich zu Dieselkraftstoff wesentlich höheren mittleren Molmasse ist die Viskosität der Pflanzenöle um ein Vielfaches höher und nähert sich erst bei höheren Temperaturen der von Dieselkraftstoff an (vgl. Abbildung 16). Die Filtrierbarkeit ist bereits ab relativ hohen Temperaturen nicht mehr gegeben. Für einen sicheren Motorbetrieb muss daher das Kraftstoff- und Einspritzsystem auf die veränderten Anforderungen angepasst werden.

Die Cetanzahl als Maß für die Zündwilligkeit des Kraftstoffs ist bei Pflanzenölen geringer als bei Dieselkraftstoff, was ein schlechteres Startverhalten bedingt. Abhilfe schafft hier v. a. eine Veränderung der Vorglühanlage und des Einspritzsystems, sowie eventuell eine Erhöhung des Kompressionsverhältnisses.

Besonderes Augenmerk muss auf die thermische Zersetzung von Pflanzenölen schon vor Erreichen der Siedetemperatur mit der Folge der Ölkohlebildung gelegt werden. Im Gegensatz zu Dieselkraftstoff sind kaltgepresste Pflanzenöle keinem Destillationsprozess unterworfen und enthalten daher auch Bestandteile, die sich vor dem Verdampfen zersetzen und Ölkohle bilden können. Diese Ölkohlebildung führt zu Ablagerungen an den Wänden des Verbrennungsraums und an den Einspritzdüsen. Vor allem bei direkt einspritzenden Motoren treten Verkokungen an den Einspritzdüsen auf, die die Kraftstoffstrahlaufbereitung stark beeinträchtigen. Zudem kann es zum Feststecken der Kolbenringe und infolgedessen zum Ausfall des Motors kommen.

Um Pflanzenöle unverändert in herkömmlichen Dieselmotoren als Kraftstoff nutzen zu können, werden diese „in einem größeren Brennraum in meist stärkerer Verwirbelung des Kraftstoff-/Luft-Gemisches bei höheren Temperaturen“ verbrannt.

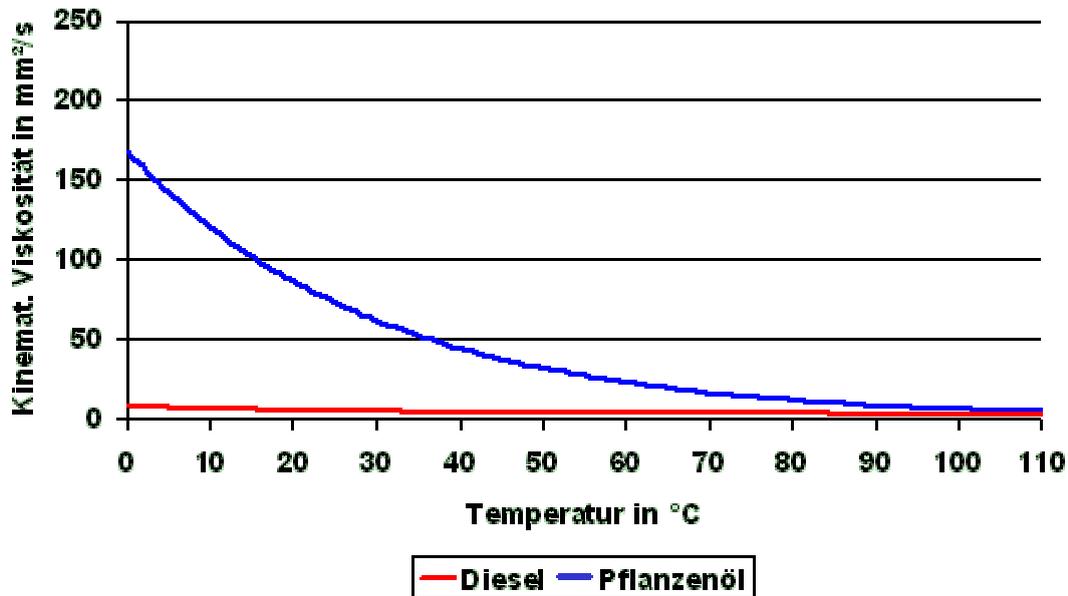


Abbildung 7: Abhängigkeit der kinematischen Viskosität von der Temperatur bei Diesel und Pflanzenöl

Naturbelassenes Rapsöl ist aufgrund seiner gegenüber Diesel insbesondere höheren Viskosität, schlechteren Zündwilligkeit und seinem hohen Flammpunkt als Kraftstoff für moderne, direkteinspritzende Dieselmotoren nicht geeignet. Deshalb sind motorseitig Anpassungen notwendig, die bei den gegebenen kraftstoffspezifischen Eigenschaften von Rapsöl einen störungsfreien Motorbetrieb bei zulässigen Schadstoffemissionen ermöglichen.

Weiterhin besteht beim Abstellen des Motors die Gefahr, dass das in den Einspritzdüsen befindliche Pflanzenöl diese verklebt, und so ein Starten des Motors nicht mehr möglich ist. Um dies zu vermeiden, muss der Wärmeeintrag in die Einspritzdüsen minimiert werden.

Beim Betrieb mit Pflanzenölkraftstoffen kann je nach Ventil-Sitz-Werkstoffpaarung mit erhöhtem Verschleiß gerechnet werden. Dies kann durch den sehr geringen Schwefelgehalt der Pflanzenöle erklärt werden. Abhilfe schafft hierbei eine Änderung der Werkstoffpaarung.

### **3. Pflanzenöлтаugliche Verbrennungsmotoren**

#### **3.1. Die Anpassung von Seriidieselmotoren an den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen**

Neben dem Einsatz spezieller Pflanzenölmotoren können auch serienmäßige indirekt- und direkteinspritzende Motoren für den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen umgerüstet werden, wobei sich die Umrüstkonzeppte der verschiedenen Anbieter in Ausführung und Qualität zum Teil beträchtlich unterscheiden. Die konkreten Umrüstmaßnahmen an den jeweiligen Motoren sind zumeist Firmengeheimnis und daher nicht veröffentlicht. Eine vergleichende Untersuchung und Bewertung der verschiedenen Umrüstkonzeppte hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für den Pflanzenölbetrieb wurde bis jetzt noch nicht durchgeführt. Im Folgenden sollen bekannte Umrüstmaßnahmen zunächst allgemein vorgestellt werden, um dann näher auf die Konzepte der einzelnen Umrüster einzugehen.

##### **3.1.1. Die Maßnahmen zur Umrüstung von Seriidieselmotoren auf den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen**

Grundsätzlich lassen sich die Umrüstmaßnahmen für den Betrieb mit kaltgepressten Pflanzenölen nach Eintank- und Zweitanksystemen unterscheiden. Bei letzteren erfolgt der Startvorgang mit Dieselkraftstoff, die Umschaltung auf Pflanzenöl findet erst nach Erreichen der Betriebstemperatur statt. Vor dem Abstellen des Motors wird wieder auf Diesel umgeschaltet, damit Einspritzleitungen und -düsen gespült werden und für den nächsten Startvorgang mit Diesel gefüllt sind, so dass sich keine Pflanzenölablagerungen bilden können. Die Umbauten beim Zweitankprinzip betreffen meist nur die Kraftstoffperipherie, Eingriffe in den Motor als solches sind nicht notwendig. Im Gegensatz dazu werden beim Eintanksystem die Motoren vollständig an die Erfordernisse von Pflanzenöl angepasst, so dass hier auch der Start- und Abstellvorgang mit Pflanzenöl erfolgen kann.

Die Umbauten an der Kraftstoffperipherie umfassen meist den Austausch nicht pflanzenöлтаuglicher Materialien (z.B. Schläuche, Dichtungen) und den Einbau von Kraftstoffleitungen mit größerem Querschnitt. Für Kraftstoffdurchflüsse von 3 – 30 l/h haben sich dabei Rohrleitungen mit einem Innendurchmesser von 10 – 12mm bewährt, wobei auf

keinen Fall katalytisch wirksame Materialien wie Kupfer und Messing eingesetzt werden sollten. Die ausreichende Versorgung des Motors mit Kraftstoff wird üblicherweise durch eine Kraftstoffvorwärmung oder den Einbau einer stärkeren Kraftstoffförderpumpe sichergestellt. Die Kraftstoffvorwärmung kann elektrisch ausgeführt sein oder mit einem Wärmetauscher mit dem Kühlmedium des Motors erfolgen. Auf eine Vorwärmung des Kraftstoffs im Tank sollte, sofern dabei die Raumtemperatur überschritten wird, verzichtet werden, da dies zu einer irreversiblen Voralterung des Pflanzenöls führt. Aufgrund der schlechteren Filtrierbarkeit von Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselkraftstoff muss die Kapazität des Kraftstofffilters erhöht werden, indem der ursprüngliche Kraftstofffilter ersetzt, bzw. ein zusätzlicher Filter eingebaut wird. Weitere Umrüstmaßnahmen sind der Einbau eines zweiten Tanks und der Elemente für die Kraftstoffumschaltung beim Zweitankprinzip, sowie der Einbau einer Kraftstofferkennung bei Wechselbetankung.

Zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens beim Eintankprinzip kann der Einbau einer Standheizung sinnvoll sein. Daneben kann der Kaltstart durch Modifikationen bzw. Austausch der Glühkerzen und verlängerte Vorglüh- und Nachglühzeiten verbessert werden. Dabei ist es vorteilhaft den Kraftstoffstrahl möglichst nah an die heißen Zonen der Glühkerze zu führen, so dass er leichter verdampfen kann.

Durch eine Erhöhung des Einspritzdrucks in Verbindung mit Einspritzdüsen spezieller Geometrie kann eine bessere Zerstäubung des Kraftstoffs erreicht werden. Besonders bewährt haben sich Zapfendüsen, die im Gegensatz zu Mehrlochdüsen eine geringere Verkokungsanfälligkeit aufweisen. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Gemischaufbereitung besteht im Einsatz von Prallstiften oder der Ausrichtung der Glühkerze in den Bereich des Einspritzstrahls, so dass dieser direkt auftrifft und besser zerstäubt wird. Daneben können die Einspritzdüsen beheizt werden, um die Viskosität des Pflanzenöls zu verringern und den Einspritzvorgang zu optimieren. Eine Vorverlegung des Einspritzbeginns kann den Selbstzündungsvorgang verlängern, um so die bei höheren Temperaturen verdampfenden Pflanzenölmoleküle möglichst vollständig zu oxidieren. Der Leckstrom von den Einspritzdüsen kann konventionell in den Tank zurückgeführt werden (Zweistrangprinzip) oder über eine Rückführeinrichtung mit Filter und Entlüftungseinheit wieder dem Kraftstoffvorlauf beigemischt werden (Einstrangprinzip). Dies hat den Vorteil, dass das erwärmte und damit vorgealterte Pflanzenöl nicht wieder in den Tank fließt. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass sich der Kraftstoff aufgrund der von der Einspritzpumpe eingebrachten Wärmeleistung nicht unzulässig aufheizt, v. a. wenn ein zeitweiser Betrieb mit Dieselkraftstoff gewünscht wird. Die Einspritzpumpe erweist sich in einigen Fällen als nicht geeignet für den Pflanzenölbetrieb und muss daher ausgetauscht werden.

Da bei der Verbrennung von Pflanzenölen i. A. höhere Temperaturen auftreten als beim Einsatz von Dieselkraftstoff ist eine ausreichende Kühlung bzw. thermische Stabilität von Kolben und Zylinder notwendig, so dass diese u. U. ausgetauscht werden müssen bzw. Anpassungen des Kühlsystems nötig werden.

Um dem Eintrag des Pflanzenöls in das Motorschmieröl entgegenzuwirken, wurde auf Basis eines Rapsöl-Schmierstoffes ein System zum kontinuierlichen Schmierölaustausch speziell für stationäre Motoren entwickelt (Abbildung 8). Die unbefriedigende Alterungsbeständigkeit des Schmierstoffes wird durch hochwirksame Antioxidantien ausgeglichen. Damit die Additivzugabe auf ein niedriges Niveau begrenzt werden kann, wird die Einsatzdauer des Motorenöls durch einen kontinuierlichen Austausch kurz gehalten. Etwa 2% des Motorenöls werden ständig aus der Ölwanne abgezogen, in den Kraftstoffvorlauf zugemischt und im Motor mit verbrannt, wobei die verbrannte Menge Öl kontinuierlich nachgefüllt wird.

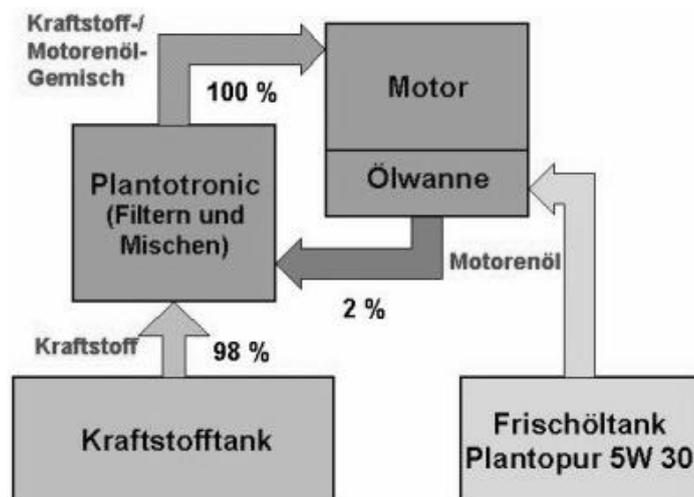


Abbildung 8: Kontinuierlicher Schmierölaustausch nach dem Plantotronic<sup>®</sup>-Verfahren der Fuchs Petrolub AG Mannheim

### 3.1.2. Die Umrüstkonzepte der verschiedenen Anbieter

Die Firmen **Elsbett Aktiengesellschaft** und **Elsbett Technologie GmbH** in Thalmässing entwickeln und produzieren Umrüstsätze für Pkw und Nfz. Während die Elsbett Aktiengesellschaft Nutzfahrzeuge und Busse nach dem Zweitankprinzip umrüstet, konzentriert sich die Elsbett Technologie GmbH auf die Umstellung von Pkw wahlweise nach dem Ein- oder Zweitankprinzip. Die Umrüstung für Nfz umfasst den Einbau eines Zusatztanks für Diesel (50 l bis 140 kW Motorleistung, 100 l darüber), sowie einer Kraftstoff-Vorförderpumpe und eines Kraftstoffwärmetauschers. Für die Pkw-Umrüstung können neben den üblichen Elementen eine Standheizung und beheizte Einspritzdüsen als Option eingebaut werden.

Die **Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie** (VWP) entwickelten ein Umrüstkonzept für indirekt und direkt einspritzende Serien-Dieselmotoren verschiedener Hersteller für den Pflanzenölbetrieb. Dabei werden neben der Anpassung von Komponenten der Kraftstoffversorgung (z.B. Kraftstoffvorwärmung, Kraftstofferkennung mit Anpassung des Einspritzdrucks) je nach Motortyp auch Veränderungen an Zylinderkopf, Ventilen, Ventilführung, Kolben, Ringe, Einspritzdüsen, Einspritzpumpe, Motorelektronik der Einspritztechnik und -regelung vorgenommen. Die von VWP umgerüsteten Motoren werden überwiegend in Pkw oder Kleintransportern, sowie Schleppern eingesetzt. Aber auch die Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes bis 20 kW<sub>el</sub> und pflanzenölbetriebener Stromerzeuger ist inzwischen abgeschlossen. Die Serien- und Alltagstauglichkeit der Motoren wurde durch den Flottenversuch in Berching mit 150 Fahrzeugen und die Teilnahme am 100-Schlepperprogramm mit 56 Traktoren (vorwiegend DEUTZ-FAHR) dokumentiert.

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 Erfahrungen in der Betreuung von Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken zur Energieversorgung von Gebirgshütten. Die Veränderungen am Basismotor betreffen im Wesentlichen das Kraftstoff- und Einspritzsystem, Wärmetauscher zur Pflanzenölvorwärmung werden nicht eingesetzt.

Das Umrüstkonzept der Firma **G. Lohmann Prototypenbau (BioCar)**, München beruht auf einem Zweitanksystem mit Kraftstoffvorwärmung und ist für mobile Anwendungen (Pkw, Lkw, Schlepper und Baumaschinen) vorgesehen. Laut Angaben des Umrüsters können alle bekannten Motortypen auf Pflanzenöl umgestellt werden. Das Zweitanksystem wird unter anderem bei Bussen der Firma **Bühler Omnibusverkehr GmbH & Co.**, Wilhelmsdorf eingesetzt, die selbst Umrüstungen nach dem System von G. Lohmann durchführt.

Von der Firma **Wolf-Pflanzenöl-Technik** können neben Kammermotoren auch TDI-Motoren mittels eines Eintanksystems mit thermopunktuellen Verbrennungsverfahren auf den Betrieb mit Pflanzenöl umgerüstet werden. Der eingespritzte Kraftstoffstrahl trifft dabei auf eine verlängerte Glühkerze, wo er sich erwärmt und zerstäubt wird, so dass auch bei tiefen Temperaturen und kaltem Motor ein Betrieb mit reinem Pflanzenöl möglich ist. Über ein Feinstfiltersystem der Firma Trabold wird das Motorenöl ständig mit hohem Reinheitsgrad gefiltert, so dass der übliche Motorenölwechsel entfallen kann. Die Umrüstung erlaubt weiterhin den wahlweisen Betrieb mit Dieselkraftstoff und lässt sich unabhängig vom Motorenhersteller durchführen. Ein Fahrzeug mit CDI-Motor befindet sich derzeit in der Langzeiterprobung.

Die Firma **Hausmann** rüstet seit mehreren Jahren indirekt und direkt einspritzende Dieselmotoren nach dem Eintanksystem auf Pflanzenölbetrieb um. Umgerüstet werden meist Pkw, Lkw, Baumaschinen und Schlepper, auf Anfrage können auch Speziallösungen für Stationärmotoren (z.B. BHKW) angeboten werden. Die Umrüstung betrifft vor allem die Kraftstoffperipherie und das Einspritzsystem, Veränderungen am Motor selbst werden nicht vorgenommen. Wichtigstes Element des Umrüstkonzeptes sind beheizte Einspritzdüsen, wobei die Heizleistung dem Betriebszustand (Startphase bzw. Dauerbetrieb) angepasst werden kann. Der Einspritzdruck wird geringfügig erhöht, um eine Abnahme über die Laufzeit des Motors zu kompensieren, während Einspritzzeitpunkt und Einspritzdüsengeometrie unverändert bleiben. Die Vorwärmung des Kraftstoffs erfolgt über einen beheizten Kraftstofffilter und bei älteren Motoren zusätzlich mit einem Wärmetauscher über das Kühlwasser. Bei modernen Hochdruckeinspritzsystemen reicht aufgrund der hohen Pumpleistungen die Abwärme der Einspritzpumpe aus, um das Pflanzenöl auf die benötigte Temperatur zu erwärmen, so dass auf den Wärmetauscher verzichtet werden kann. Der Leckstrom von den Einspritzdüsen wird nach dem Zweistrangprinzip in den Tank zurückgeführt, um eine Überhitzung des Kraftstoffs v.a. bei modernen Motoren zu vermeiden. Die Aufrechterhaltung eines ausreichenden Kraftstoffdrucks vor der Einspritzpumpe wird durch stärkere Kraftstoffförderpumpen und vergrößerte Leitungsquerschnitte sichergestellt.

**KPM Krahwinkel** bietet neben pflanzenöлтаuglichen Marine-Motoren auch die Umrüstung von Pkw und Kleintransportern, z.T. mit Komponenten der Firma Hausmann, an. Die Umrüstung erfolgt nach dem Eintanksystem und beschränkt sich bei Fahrzeugen überwiegend auf Kammermotoren der Hersteller Volkswagen, Mercedes-Benz und Peugeot. Im Marine-Bereich werden vornehmlich Motoren der Firma Lombardini und der Mercedes-Benz Baureihe OM 600, teilweise mit Pumpe-Düse-Einspritzsystemen, eingesetzt. Die stärkeren Motoren im Leistungsbereich 160 bzw. 240 kW arbeiten nach einem patentierten duothermischen Brennverfahren.

**OIKO Energy GmbH** bietet seit dem Jahr 2000 pflanzenöлтаugliche BHKW an. Im unteren Leistungsbereich finden Wirbelkammermotoren der Firma Kubota Anwendung, für größere Leistungen kommen direkteinspritzende Motoren der Firma Perkins zum Einsatz. Die Motoren werden jeweils nach den Vorgaben von OIKO Energy an den Einsatz von Pflanzenölen angepasst.

Pflanzenöl-BHKW im höheren Leistungsbereich (430 – 4000 kW<sub>el</sub>) werden von der Firma **MANN Naturenergie GmbH & Co. KG** angeboten. Die Basismotoren stammen meist vom Hersteller MAN B&W und werden an den Pflanzenöleinsatz angepasst.

Von der Firma **Natur-Energie-Technik Dosch & Stumpf GbR** werden Pflanzenöl-BHKW aller Leistungsklassen angeboten. Im unteren Leistungsbereich bis etwa 24 kW<sub>el</sub> werden Wirbelkammermotoren der Firma Antoria eingesetzt, für höhere Leistungen kommen direkteinspritzende Motoren von MAN. Verändert werden im Wesentlichen die Vorglühanlage und das Kraftstoffsystem.

Die Firma **Naturpower** rüstet sowohl nach dem Eintank- als auch nach dem Zweitanksystem um. Das Eintanksystem wird dabei lediglich bei älteren Motoren mit Kammerbrennverfahren eingesetzt, während das Zweitankkonzept bei modernen direkteinspritzenden Motoren Verwendung findet. Das Umrüstkonzept stellt eine Eigenentwicklung dar und umfasst neben einem Wärmetauscher zur Pflanzenölvorwärmung auch spezielle Zahnradförderpumpen und Kraftstofffilter, sowie teilweise isolierte Kraftstoffleitungen größeren Querschnitts. Die Kraftstoffumschaltung erfolgt automatisch ab einer definierten Pflanzenöltemperatur. Um das Volumen des Pflanzenöltanks im Bedarfsfall auch für Dieselkraftstoff nutzen zu können, wird die Tanktemperatur stets unter 45°C gehalten, so dass das ab 70°C beginnende Ausgasen von Diesel sicher vermieden wird. Neben



Motoren für Pkw und Nfz werden auch Motoren für den stationären Einsatz im BHKW umgerüstet.

Neben Gas und Heizöl-BHKW bietet die Firma **Giese, Energie- und Regeltechnik GmbH** auch Pflanzenöl-BHKW an. Die Basismotoren mit einer Leistung bis zu 25 kW<sub>el</sub> stammen von der Firma Kubota und arbeiten nach dem Wirbelkammerverfahren.

Von der Firma **Reconet** werden Umrüstsätze für Pkw verschiedener Hersteller, sowie für Lkw und Baumaschinen angeboten. Solange die mechanische Stabilität der Einspritzpumpe gegeben ist, können alle Motortypen (Kammermotoren, Pumpe-Düse-Systeme, Common-Rail-Einspritzung) umgerüstet werden. Die Umrüstung erfolgt nach dem Zweitankprinzip, je nach Fahrzeugtyp wird das originale Kraftstoffleitungssystem vollständig ersetzt.

Die Firma **ATG, Autozubehör-Technik Glött GmbH**, bietet die Umrüstung von Dieselfahrzeugen nach dem Zweitanksystem an. Umgerüstet werden können Kammermotoren und direkteinspritzende Motoren, auch nach mit Pumpe-Düse-Einspritzsystem. Die Anpassung von Common-Rail-Einspritzsystemen befindet sich derzeit in der Erprobung. Am Originalmotor werden keinerlei Veränderungen vorgenommen, die Umrüstung beschränkt sich auf den Einbau eines Zusatztanks mit elektrischer Umschalteneinheit. Die Kraftstoffvorwärmung erfolgt mit einem Wärmetauscher über das Kühlwasser und zusätzlich mit einem elektrischen Durchlauferhitzer. Neben Pkw, Lkw, Bussen und Schlepfern können auch Boote auf Pflanzenölbetrieb umgerüstet werden.

**Henkelhausen GmbH & Co. KG, Krefeld**, bietet pflanzenöлтаugliche Motoren der Firma Deutz an. Für den mobilen Einsatz stehen die luftgekühlten Deutz-Baureihen FL 912 (Direkteinspritzer) und FL 912W (Wirbelkammer) zur Verfügung. Die Umrüstung beinhaltet einen zweiten Tank für den Startvorgang mit Dieselmotoren, eine Kolbenförderpumpe und einen zusätzlichen Filter für das Pflanzenöl, sowie Bedienelemente für die Kraftstoffumschaltung von der Fahrerkabine aus. Bei den direkteinspritzenden Motoren der Baureihe FL 912 wird das Brennverfahren für den Pflanzenölbetrieb dem Wirbelkammerverfahren angenähert. Als reine Stromaggregate können luftgekühlte Motoren der Baureihen 413 / 513, für den Einsatz als BHKW wassergekühlte Motoren der Baureihe 1008 mittels Dual Brennstoffsystem (Betrieb mit kaltgepresstem Rapsöl und Dieselmotoren) umgerüstet werden.



Die Firma **NET - Neue Energie Technik** aus Salzburg bietet pflanzenöлтаugliche BHKW von 8 – 144 kW elektrischer Leistung an. Die Blockheizkraftwerke werden auf Basis serienmäßiger Motoren aufgebaut, die an die Anforderungen von Pflanzenölkraftstoffen angepasst werden. Darüber hinaus können nach vorheriger Prüfung auch entsprechend aufbereitete Altöle und -fette pflanzlichen Ursprungs, wie z.B. Frittieröl, verbrannt werden.

Das Patent von **Ralph Finger**, Pfronten sieht ein Zweitanksystem mit einem elektrisch beheizten Thermozyylinder zwischen Pflanzenöltank und Motor vor. Der Start- und Abschaltvorgang erfolgt weiterhin mit Dieselmotorkraftstoff, das Pflanzenöl wird jedoch nicht, wie üblich, über einen Wärmetauscher vorgewärmt, sondern von einer Pumpe intermittierend in den Thermozyylinder gefördert. Dort wird der Kraftstoff auf eine vorgegebene Temperatur aufgeheizt, so dass stets die für die Einspritzung optimale Viskosität eingestellt werden kann. Ist die eingestellte Temperatur erreicht, gibt ein Magnetventil die Leitung zum Motor frei und die Dieselmotorkraftstoffzufuhr wird unterbrochen. Zusätzlich ist eine Bypassleitung mit Pumpe vorgesehen, die den Leckstrom vor dem Magnetventil zurück in den Thermozyylinder fördert. Die Vorteile dieses Systems sind eine kurze Aufheizphase aufgrund des vergleichsweise kleinen Volumens des Thermozyinders und die Möglichkeit der genauen Temperaturregelung und damit die Einstellung einer definierten Viskosität, vor allem im Hinblick auf moderne, elektronisch gesteuerte direkteinspritzende Motoren.

## 4. Motorbetrieb mit Pflanzenöl

Der Betrieb von Verbrennungsmotoren mit kaltgepressten Pflanzenölen wurde bisher in zahlreichen Feldversuchen, Studien, sowie Diplom- und Doktorarbeiten untersucht. Während in den Feldversuchen hauptsächlich die technische Machbarkeit und die Alltagstauglichkeit einzelner Umrüstkonzeppte im Vordergrund standen, liegt der Schwerpunkt der Studien bei Laborversuchen an Motorprüfständen bzw. Blockheizkraftwerken mit detaillierter Erfassung aller motorrelevanten Parameter. Neben dem Leistungs- und Verbrauchsverhalten sind v. a. die Dauerstandfestigkeit und das Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Motoren von Interesse.

Im Folgenden sollen wichtige bisher durchgeführte Praxis- und Feldversuche kurz vorgestellt werden, um anschließend eine zusammenfassende Übersicht über den Motorbetrieb mit rohen Pflanzenölen zu geben.

### 4.1. Bisher durchgeführte Praxis- und Feldversuche

#### 4.1.1. Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren – Studie der Porsche AG

Im Jahr 1991 wurde von der Dr.-Ing h.c. F. Porsche AG in Weissach eine experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren durchgeführt. Der Auftrag für die Studie erging vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) in Abstimmung mit dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML) unter Beteiligung der Projektbegleitung Kraftfahrzeuge und Straßenverkehr im TÜV Rheinland e.V.

Untersucht wurden 6 Motoren unterschiedlicher Hersteller, davon zwei großvolumige Nfz-Kammermotoren, eine schnelllaufender Pkw-Wirbelkammermotor, sowie drei direkt einspritzende Nfz-Motoren, davon zwei mit Abgasturboaufladung und Ladeluftkühlung. Die Motoren wurden **nicht** für den Pflanzenölbetrieb umgerüstet. Neben der Bestimmung des Leistungs- und Verbrauchsverhalten wurden limitierte und nicht limitierte Schadstoffemissionen gemessen und ein Dauerversuch über 600 Betriebsstunden durchgeführt. Nach dem Dauerversuch wurden die Motoren hinsichtlich Veränderungen im Schmieröl sowie Ablagerungen und Verschleiß untersucht. Zusätzlich zum Betrieb



mit warmgepresstem, wasserentschleimtem Rapsöl wurde zum Vergleich handelsüblicher Dieselkraftstoff verbrannt

#### **4.1.2. Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Studie des BayStMELF**

Von der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Freising wurde von April 1988 bis Dezember 1990 im Auftrag des damaligen Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eine Studie zur Verwendung von Pflanzenölen als Motorentreibstoff durchgeführt. Für die motorischen Untersuchungen wurden Unteraufträge an den TÜV Bayern e.V. und das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge der TU München vergeben.

Gegenstand der Untersuchung waren Leistung, Wirkungsgrad und Abgasemissionen von pflanzenölbetriebenen Motoren im Vergleich zum Dieselbetrieb. Neben konventionellen Motoren wurden auch pflanzenöлтаugliche Pkw und Nfz-Motoren untersucht. Als pflanzliche Kraftstoffe wurden Rapsmethylester, Rapsölvollraffinat und kaltgepresstes wasserentschleimtes Rapsöl verwendet.

#### **4.1.3. Betriebs- und Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener BHKW – Studie des BayStMLU**

In einem vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) und dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (BayLFU) geförderten Forschungsprojekt wurde das Betriebs- und Emissionsverhalten von ausgewählten, ausschließlich mit Pflanzenöl betriebenen BHKW in einem zweieinhalbjährigen Feldversuch untersucht. Die Untersuchung wurde im Jahr 2002 abgeschlossen.

Bei den ausgewählten BHKW handelte es sich um Pflanzenölmotoren der Hersteller VWP, TMW und DMS mit elektrischen Leistungen von 8, 40, und 2 x 110 kW, die sich hinsichtlich ihrer technischen Ausführung, besonders bei der Abgasnachbehandlung, zum Teil beträchtlich unterschieden. Das eingesetzte Rapsöl entsprach dem RK-Qualitätsstandard 05/2000.

#### **4.1.4. Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke im Alpengebiet – Erhebung der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik**

Die Versorgung von Berghütten im Alpengebiet stellt aufgrund deren oftmals sensiblen ökologischen Lage ein ideales Einsatzgebiet für pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke dar. Den ökologischen Vorteilen wie der nicht vorhandenen Wassergefährdung und der nicht vorhandenen Gefahrgutklassifizierung steht jedoch eine Reihe von Schwierigkeiten bei Errichtung und Betrieb gegenüber. Von der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Freising wurde deshalb im Jahr 2001 eine Erhebung des technischen Standes von pflanzenölbetriebenen BHKW auf Hütten des deutschen Alpenvereins durchgeführt. Dabei wurden neben der Erfassung bisher aufgetretener Störungen auch Kraftstoffproben aus verschiedenen Tanklagern auf ihre Übereinstimmung mit dem RK-Qualitätsstandard 05/2000 untersucht.

#### **4.1.5. Betriebsverhalten und Emissionen von rapsölbetriebenen BHKW – Studie der Österreichischen Bundesanstalt für Landtechnik**

Im Jahr 2001 wurde an der Österreichischen Bundesanstalt für Landtechnik in Wieselburg mit einem Forschungsprojekt zum Stand der Technik, den Emissionen, den praktischen Erfahrungen und der Wirtschaftlichkeit pflanzenölbetriebener Blockheizkraftwerke begonnen. Die Untersuchung erfolgt in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft in Wien.

Bisher wurden Prüfstandsmessungen an drei kommerziell erhältlichen pflanzenöлтаuglichen Aggregaten durchgeführt. Eine der Anlagen verwendet Rapsöl gleichzeitig Kraftstoff sowie als Motorschmierstoff.

#### **4.1.6. Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen – Studie der Universität Hohenheim im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.**

Von der Universität Hohenheim erfolgte 2002/2003 eine experimentelle Untersuchung zur Zumischung von Rapsöl zu Dieselkraftstoff. Durchgeführt wurde die Studie im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. und in Zusammenarbeit mit den Firmen Svendsen, Fellbach, Deutz AG, Köln und ASG Analytik-Service, Täferingen. Ziel des Motorprüflaufs mit einem modernen Schleppermotor der Firma Deutz **ohne** fahrzeug- und motorseitige Anpassungsmaßnahmen war die Überprüfung der Auswirkungen der Beimischung unterschiedlicher Anteile von kaltgepresstem Rapsöl zu Diesel auf das Betriebsverhalten und den Verschleiß. Es sollte jeweils ein Prüflauf mit Dieselkraftstoff und mit Rapsöl-Diesel-Mischungen mit einem Rapsölanteil von 25%, 50% und 75% erfolgen.

#### **4.1.7. Flottenversuch Pflanzenölbetriebene Fahrzeuge in Bayern**

Von 1994 – 1999 wurde in Bayern im Rahmen eines Flottenversuchs die Alltagstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von pflanzenölbetriebenen Fahrzeugen untersucht. Der Flottenversuch wurde vom Maschinen- und Betriebshilfsring Sulz-Altmühl e.V. in Berching betreut und vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (BayStMWVT) gefördert.

In den ersten drei Phasen des Projekts wurden insgesamt 60 Mercedes-Benz-Pkw unterschiedlicher Leistung umgerüstet. Die Umrüstung der ausschließlich nach dem Vorkammerprinzip arbeitenden Motoren wurde von den Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöl (VWP) durchgeführt und umfasste Änderungen an der Einspritzpumpe, den Kraftstoffleitungen, dem Kraftstofffilter, der Vorkammer und den Einspritzdüsen. In der vierten Phase wurde der Flottenversuch auf 30 VW-Fahrzeuge mit Turbodieselmotoren nach dem Kammerbrennverfahren ausgedehnt. Zusätzlich zum bisherigem Umrüster VWP beteiligte sich die Firma Wolf-Pflanzenöl-Technik an dem Vorhaben.

Neben kaltgepresstem Rapsöl aus der Ölmühle der Tochtergesellschaft des Maschinenrings Sulz-Altmühl, der Maschinen- und Betriebshilfsring Sulz-Altmühl Gewerbe GmbH, wurde in der Einführungsphase auch Vollraffinat eingesetzt. Die Kraftstoffversorgung erfolgte dezentral über 1000 l Vorratsbehälter bei den einzelnen Teilnehmern bzw. über eine eigens errichtete Pflanzenöltankstelle.



Ab 1999 wurden vom Maschinenring Sulz-Altmühl beim BayStWVT Fördergelder für einen zweiten Flottenversuch, diesmal mit modernen TDI-Motoren der Volkswagen AG, beantragt. Die Umrüstung wurde wiederum von der Firma VWP durchgeführt. Auch hier erfolgte die Versorgung mit Rapsöl aus der Ölmühle des Maschinenrings Sulz-Altmühl dezentral bei den einzelnen Teilnehmern bzw. über die Pflanzenöltankstelle in Berching.

#### **4.1.8. Flottenversuch Pflanzenölbetriebene Fahrzeuge in Sachsen**

Ziel des Flottenversuchs in Sachsen ist nach dem Vorbild des bayerischen Flottenversuchs die Alltagtauglichkeit pflanzenölbetriebener Fahrzeuge zu beweisen und die Technologie auf dem sächsischen Markt zu etablieren. Das Projekt wird von der Grünen Liga Sachsen e.V. betreut. Im Rahmen des Programms sollen in Dresden und Leipzig Pflanzenöltankstellen errichtet werden.

Bisher wurden elf mit TDI-Motoren ausgerüstete Fahrzeuge vom Umrüster VWP für den Pflanzenölbetrieb modifiziert, die sich im Beobachtungszeitraum von zwölf Monaten in der Praxis bewährt haben.

#### **4.1.9. Projekt Regioöl Nordrhein-Westfalen**

Das Projekt Regioöl in Nordrhein-Westfalen wurde von den Regionalstellen Düren und Mönchengladbach im Bistum Aachen ins Leben gerufen. Für die Projektentwicklung und -realisierung zeigt sich der eigens gegründete Verein P.R.O Projektorganisation regionale Oelpflanzennutzung e.V. verantwortlich.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Regionalwirtschaftskonzept zur Nutzung von kaltgepresstem Rapsöl entwickelt und eine Pflanzenöltankstelle in Aachen errichtet. Neben der Umrüstung von Privat-Pkw wurden auch Fahrzeuge der Stadtwerke Aachen modifiziert und pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke in Betrieb genommen.

#### 4.1.10. 100-Schlepper-Programm

Das „100-Schlepper-Programm“ ist ein Demonstrationsvorhaben zur Markteinführung von Rapsöl als Kraftstoff in der Landwirtschaft, das im September 2000 veröffentlicht wurde und vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) gefördert wird. Über einen Zeitraum von drei Jahren soll dabei die Umweltverträglichkeit und Dauerfestigkeit von für den Pflanzenölbetrieb umgerüsteten Motoren bewiesen werden. Das Vorhaben wird von der Universität Rostock wissenschaftlich begleitet.

Umgerüstet werden ausschließlich Traktoren der neuesten Generation mit weniger als 300 Betriebsstunden. Die jährliche Arbeitsleistung muss mehr als 800 Betriebsstunden betragen und die Schlepper dürfen ausschließlich mit Rapsöl betrieben werden. Zum Einsatz kommt überwiegend Rapsöl, das dem RK-Qualitätsstandard 05/2000 entspricht. An dem Programm sind sechs verschiedene Umrüstfirmen, größtenteils mit Eintankkonzepten, beteiligt, die Traktoren von neun verschiedenen Herstellern modifizieren. Die umgerüsteten Schlepper sind ausschließlich mit direkteinspritzenden Motoren ausgestattet, teilweise mit Pumpe-Düse oder Common-Rail-Einspritzsystemen. Den Umrüstkonzepten gemeinsam ist eine Vorwärmung des Kraftstoffs und eine Vergrößerung der Leitungsquerschnitte. Veränderungen am Wirkprinzip des Motors wurden nicht vorgenommen.

## 5. Zusammenfassung

Der vorliegende Endbericht legt eine umfassende Grundlage zum Themenfeld „kaltgepresstes Pflanzenöl als Motorkraftstoff“, die sich ausschließlich auf wissenschaftliches Datenmaterial, Firmenauskünfte sowie auf Ergebnisse aus Flottenversuchen stützt. Grundsätzlich sind kaltgepresste Pflanzenöle als Motorkraftstoff in Dieselmotoren geeignet. Gegenüber Dieselmotorkraftstoff zeichnet sich z.B. heimisches Rapsöl durch seine nahezu CO<sub>2</sub>-neutrale Verbrennung, die Schwefelfreiheit sowie die geringe Wassergefährdungsklasse aus. Neben den ökologischen Vorteilen trägt die Kraftstoffbereitstellung durch die heimische Landwirtschaft zur regionalen Arbeitsplatzsicherung und Kaufkraftbindung bei.

Aufgrund der veränderten chemisch und physikalischen Kraftstoffeigenschaften von Rapsöl gegenüber Dieselmotorkraftstoff bzw. Biodiesel kommen derzeit entweder speziell entwickelte Pflanzenölmotoren bzw. modifizierte Seriidieselmotoren zum Einsatz. Nach der Einstellung der Pflanzenölmotorfertigung der Fa. Elsbett Konstruktion in Hilpoltstein spielt heute die Motorenmodifikation von handelsüblichen Seriidieselmotoren die dominierende Rolle.

Die Nutzung von Pflanzenöl als Motorkraftstoff setzt grundsätzlich eine ausreichende kontinuierlich hohe Pflanzenölqualität zur Vermeidung pflanzenölbedingter Schäden voraus. Empfohlen wird übereinstimmend die Verwendung von Rapsöl nach dem RK-Qualitätsstandard 05/2000.

Besonders hinsichtlich der Oxidationsstabilität und der Gesamtverschmutzung sollte auf eine Einhaltung der Grenzwerte geachtet werden, um die Bildung von Ablagerungen und Verstopfungen des Kraftstoff- und Einspritzsystems zu vermeiden. Die Einhaltung des RK-Qualitätsstandards sollte von der Herstellung über den Transport und die Lagerung bis zur Verbrennung im Motor gewährleistet werden. Maßnahmen hierfür sind die Vermeidung von Schmutzeinträgen beim Umfüllen, der Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung und möglichst konstant niedrige Lagerungstemperaturen von 5 – 10 °C. Auf Tankheizungen sollte nach Möglichkeit ebenso verzichtet werden wie auf die Verwendung katalytisch aktiver Materialien wie Kupfer oder Messing für die Kraftstoffleitungen. Weiterhin sollte der Eintrag von Sauerstoff und Wasser gering gehalten werden und die Kraftstoffentnahme nicht unmittelbar am Tankboden erfolgen, so dass sich Verunreinigungen absetzen können.

Um die Verharzung von Kraftstoff- und Einspritzsystem zu vermeiden, kann bei längeren Stillstandszeiten eine Spülung des gesamten Kraftstoffkreislaufes mit Dieselmotorkraftstoff durchgeführt werden. Generell bringt die Mischung von Pflanzenölen mit anderen Kraftstoffen

jedoch eher Nachteile als Vorteile, vor allem bei großen Tankvolumina und langen Lagerzeiten.

Auch bei Einhaltung des RK-Qualitätsstandards muss für einen störungsfreien Motorbetrieb eine geeignete Kraftstofffilteranlage vorhanden sein. Für Reiheneinspritzpumpen beträgt die notwendige mittlere Filterfeinheit etwa 5 µm und für Verteilereinspritzpumpen 10 µm. Da das Einspritzsystem im Pflanzenölbetrieb stärker belastet wird als bei Verwendung von Dieselkraftstoff sollte bei Einspritzpumpe und Einspritzdüsen auf qualitativ hochwertige Modelle bewährter Hersteller zurückgegriffen werden.

Zur Minimierung des Kraftstoffeintrags ins Schmieröl sollte der Kaltbetrieb des Motors (Teillast und Leerlauf nach dem Kaltstart) auf das unbedingt notwendige Maß begrenzt werden. Daneben ist eine laufende sensorische Überwachung des Ölzustandes, ähnlich wie für Öldruck und Öltemperatur, erstrebenswert.

Eine Motoranpassung beinhaltet periphere Maßnahmen im Kraftstoffkreislauf, welche der höheren Viskosität des Pflanzenöls Rechnung tragen. Darüber hinaus kann die problematische Kaltstartphase des Motors im Zweitanksystem durch Dieselkraftstoff überbrückt werden. Im betriebswarmen Zustand wird der Motor dann mit Pflanzenöl betrieben. Alternativ dazu werden Eintanksysteme mit z.T. speziell entwickelten motorisch und thermodynamisch angepassten Motoreigenschaften angeboten.

Motoren nach dem *Vor- und Wirbelkammerprinzip* sind technisch gut für den Pflanzenölbetrieb geeignet und daher wenig aufwendig an den Betrieb mit kaltgepresstem Rapsöl anzupassen. Technisch einfache Zweitanklösungen bzw. Eintanklösungen mit peripheren Modifikationsschritten ( Kraftstoffkreislauf, Filterheizung, etc. ) sowie motorischen Modifikationsschritten ( Glühkerzenvorziehen, dauerglühfähige Glühkerzen, Düsenvorziehen, beheizbare Düsen, andere Düsengeometrie ) sind technisch bewährt.

Dieselmotoren nach dem *TDI-Brennverfahren* werden im Eintanksystem sowohl peripher ( Standheizung, Kraftstoffkreislauf, Filterheizung, etc. ) als auch motorisch ( Glühkerzenvorziehen, dauerglühfähige Glühkerzen, Düsenvorziehen, beheizbare Düsen, andere Düsengeometrie ) ausreichend umgerüstet. Darüber hinaus wird oftmals die zweistufige Piloteinspritzung zur Vermeidung unverbrannter Kraftstoffanteile unterbunden und das Verdichtungsverhältnis über den Austausch der Zylinderkopfdichtung erhöht. Alternativ dazu werden Zweitanklösungen mit weniger aufwendigen ergänzenden Umrüstschritten angeboten.



Dieselmotoren nach dem *PDI-Verfahren* setzen im Eintanksystem eine technisch hochwertige Umrüstung voraus. Periphere Maßnahmen ( Standheizung, Kraftstoffkreislauf, Filterheizung, etc. ) müssen durch optimal angepasste Motormodifikationen ( dauerglühfähige Glühkerzen, Düsenvorziehen, beheizbare Düsen, andere Düsengeometrie ) ergänzt werden. Sämtliche Maßnahmen sind durch einen Eingriff in die überwachende Motorsteuerung begleitet. Alternativ dazu werden auch hier Zweitanklösungen angeboten.

Neuere Dieselmotoren nach dem *CDI-Verfahren* setzen im Eintanksystem einen Eingriff in die Motorelektronik voraus, der durch periphere und motorische Umrüstschritte unterstützt wird. Daher werden bisher ausschließlich Zweitanksysteme angeboten.