

# Eignung von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten als Kraftstoff für Dieselmotoren

Von Gerhard Vellguth, Braunschweig-Völkenrode\*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

Professor Dr.-Ing. Wilhelm Batel zum 60. Geburtstag

DK 631.372:621.436:662.756.3

Pflanzenöle haben Eigenschaften, die sie grundsätzlich als Ersatz für Dieselkraftstoff geeignet erscheinen lassen. In Motoren mit direkter Einspritzung, wie sie heute in landwirtschaftlichen Schleppern und in Nutzfahrzeugen gebräuchlich sind, ist jedoch ein Dauerbetrieb mit Pflanzenölen — auch in raffinierter Form — nicht möglich. Maßnahmen zur Vermeidung der auftretenden Probleme wurden auf einem Motorprüfstand systematisch untersucht. Das Ergebnis ist, daß beim Einsatz von Pflanzenölderivaten, die sich durch Umesterung mit Ethanol oder Methanol herstellen lassen, die Probleme nicht auftreten, wenn außerdem die Einspritzung vorverlegt wird.

## Inhalt

1. Einleitung
2. Kraftstoff-Eigenschaften von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten
  - 2.1 Kennwerte
  - 2.2 Verbrauchs- und Leistungswerte
  - 2.3 Probleme bei Dauereinsatz
  - 2.4 Ausgewählte Maßnahmen zur Verbesserung der Kraftstoff-Eigenschaften
3. Systematische Untersuchung
  - 3.1 Prüfstand
  - 3.2 Beurteilung
  - 3.3 Versuchsvarianten und Ergebnisse
    - 3.3.1 Untersuchung der ausgewählten Maßnahmen im Motor mit direkter Einspritzung
    - 3.3.2 Vergleichsversuche im Motor mit Vorkammer
    - 3.3.3 Versuche mit Ethyl- und Methyl-ester von Rapsöl im Motor mit direkter Einspritzung
  - 3.4 Folgerungen
4. Umesterung von Pflanzenölen
5. Zusammenfassung

## 1. Einleitung

Pflanzenöle wurden bereits um die Jahrhundertwende, als die ersten Dieselmotoren entwickelt wurden, als Kraftstoff eingesetzt und haben sich bereits damals als grundsätzlich geeignet erwiesen. Im Verlaufe der weiteren Entwicklung haben sich jedoch aus vielen Gründen ausschließlich Kraftstoffe aus Erdöl durchgesetzt, z.B.

---

Die Untersuchungen wurden von den Firmen Thörls Vereinigte Harburger Ölfabriken, Deutsche BP AG und Motorenfabrik Hatz durch Analysen und Sachleistungen unterstützt, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

---

\*) *Dipl.-Ing. G. Vellguth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

weil sie besser verfügbar und wesentlich preiswerter waren. Hinsichtlich dieser Voraussetzungen ist jedoch in den letzten 10 Jahren eine bedeutsame Veränderung eingetreten. Der hohe Verbrauch an Erdöl für Kraftstoffe und als Grundstoff der chemischen Industrie einerseits und die begrenzten abbaubaren bzw. abbauwürdigen Vorräte andererseits haben die Erschöpfbarkeit aufgezeigt und zusammen mit politischen und wirtschaftlichen Gründen zu einer enormen Verteuerung geführt.

In vielen Ländern der Erde, vor allem in den erdölimportierenden und den landwirtschaftlich orientierten, werden daher Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, d.h. nicht unbegrenzten, jedoch unerschöpflichen Quellen, auf ihre Einsatzmöglichkeiten untersucht. Pflanzenöle haben dabei aufgrund verschiedener günstiger Eigenschaften eine gewisse Bedeutung als Kraftstoff für Dieselmotoren. So könnte nach einer früheren Studie [1] in der Bundesrepublik Deutschland durch Rapsanbau auf weniger als 1/5 der landwirtschaftlich genutzten Fläche der für die Bewirtschaftung der gesamten Fläche benötigte Kraftstoff erzeugt werden.

Seit Erstellen der Studie sind in der Bundesrepublik sowohl die Anbaufläche wie auch die Erträge im Rapsanbau angestiegen [2, 3], damit werden die Stoff- und die Energiebilanz für den Rapsanbau noch günstiger gestaltet.

Einsparungen von Fremdenergie beim Ölgewinnungsprozeß zur Verbesserung der Energiebilanz lassen sich bei einigen Ölfrüchten (z.B. Sonnenblumen) erreichen, wenn minderwertige Nebenprodukte z.B. die Samenschalen zum Erzeugen von Prozeßenergie genutzt werden [4].

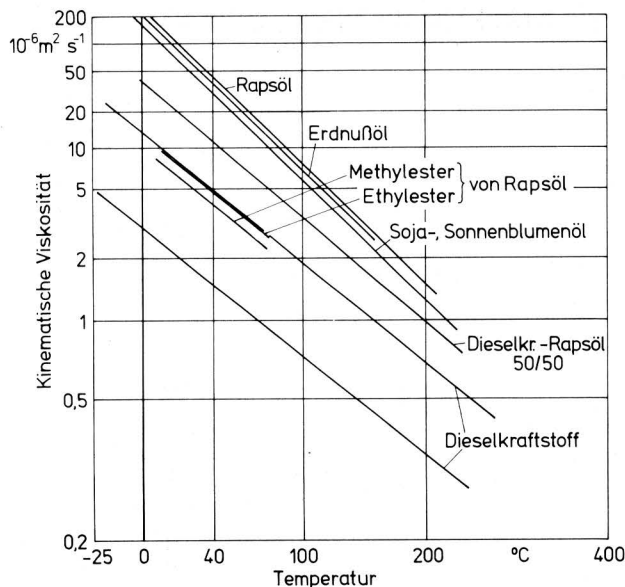
Ein Verbessern der Energiebilanz bei der Ölbereitung zur Nutzung als Kraftstoff durch Einsparen von Raffinationsvorgängen bei der Aufarbeitung des extrahierten Öles scheint nach den bisherigen Erfahrungen nicht möglich; denn sowohl eigene Untersuchungen wie die Ergebnisse anderer Institute [5] haben gezeigt, daß nicht raffinierte, d.h. rohe bzw. rohe entschleimte Pflanzenöle verstärkt zu Rückstandsbildung im Motor neigen.

## 2. Kraftstoff-Eigenschaften von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten

### 2.1 Kennwerte

Um alternative Kraftstoffe in den vorhandenen Dieselmotoren verwenden zu können, sind gewisse Mindestanforderungen an die kinematische Viskosität, die Zündwilligkeit und den Heizwert bzw. den Brennwert und die Dichte zu stellen.

Die Viskosität darf nicht zu hoch sein, um die Fließfähigkeit beim Tanken und bei der Förderung im Kraftstoffsystem (Filter, Pumpe, Einspritzdüse) zu gewährleisten. Nach Bild 1 ist die kinematische Viskosität der am besten verfügbaren Öle nahezu gleich, aber wesentlich höher als die von Dieselkraftstoff. Diese Pflanzenöle sind deshalb ohne Hilfsmittel nur bis herab zu etwa 0 °C verwendbar. Bei tieferen Temperaturen sind Heizeinrichtungen erforderlich. Bei Mischungen von Dieselkraftstoff und Pflanzenölen liegen die Viskositätswerte etwa entsprechend dem Mischungsverhältnis zwischen den Werten der reinen Stoffe.



**Bild 1.** Kinematische Viskosität von Dieselkraftstoff, Pflanzenölen und Estern in Abhängigkeit von der Temperatur.

Eine Verminderung der Viskosität durch Vermischung mit Ethanol oder Methanol ist möglich, jedoch praktisch unbrauchbar, da diese Mischungen instabile Lösungen ergeben. Mit Hilfe von Lösungsvermittlern läßt sich die Beständigkeit der Lösung bei Inkaufnahme anderer Nachteile, z.B. verminderte Zündwilligkeit und höhere Kosten, verbessern, jedoch sind bisher keine zufriedenstellenden Mischungen bekannt geworden. In den USA werden z.Zt. Versuche mit Mikroemulsionen aus 53,3 % Sojaöl, 13,3 % Ethanol (> 94 %ig) und 33,4 % Butanol durchgeführt, obwohl die Zündwilligkeit dieser Mischung mit einer Cetanzahl  $CZ = 25$  sehr gering ist [6]. Das Mischungsverhältnis stellt einen Kompromiß zwischen zu hoher Viskosität bei größeren Ölanteilen und zu niedriger Zündwilligkeit bei größeren Alkoholanteilen dar. Durch Zugabe von ca. 10 % eines Zündverbessers war eine Zündwilligkeit von etwa  $CZ = 40$  zu erreichen.

Die Pflanzenölderivate Ethylester und Methylester haben niedrigere kinematische Viskositäten als die Öle. Für Methyl- und Ethylester von Rapsöl liegen die Werte zwischen Sommer- und Winterdieselmotoren, Bild 1. Die Ester bilden in weiten Bereichen mit Dieselkraftstoff, mit Pflanzenölen und auch mit Alkoholen beständige Lösungen, können als Lösungsvermittler wirken und ermöglichen es so, die Viskosität von Öl-Mischungen zu beeinflussen.

Die Zündwilligkeit der Pflanzenöle ist gut. Als Mindestanforderung für Dieselkraftstoff ist nach DIN 51601 eine Cetanzahl  $CZ = 45$  festgelegt, die zur Zeit angebotenen Markenkraftstoffe haben eine Cetanzahl von 51. Von den Pflanzenölen werden diese Werte im allgemeinen erreicht oder überschritten. Für raffiniertes Rapsöl (Lebensmittelqualität) wurde  $CZ = 51$  ermittelt.

Die Cetanzahlen für Ester liegen im Durchschnitt höher als bei den Pflanzenölen. Für Ethylester und Methylester von Rapsöl wurden Cetanzahlen von 54 bis 55 gemessen. Eine im Labor nochmals gereinigte ("gewaschene") Probe von Ethylester erbrachte eine Cetanzahl von über 65. Durch Mischen dieser Probe mit Dieselkraftstoff ( $CZ = 51$ ) im Verhältnis 50 : 50 wurde eine Cetanzahl von 60 erreicht. Die Ester von Rapsöl können demzufolge als Zündwilligkeitsverbesserer für weniger zündwillige Dieselkraftstoff-schnitte oder für Alkohole (Methanol, Ethanol) wirksam sein (vgl. S. 183). Ein kleiner Einzylinder-Dieselmotor mit direkter Einspritzung konnte mit Mischungen aus 75 % Ethylester und 25 % wasserhaltigem Ethanol (handelsüblicher Spiritus, Ethanolgehalt > 94 %) bei Umgebungstemperaturen von 10 °C kalt ohne Zündhilfe einwandfrei gestartet werden und lief gleichmäßig.

Der Energieinhalt, ein weiterer wichtiger Kennwert für Kraftstoffe, wird durch die kalorimetrische Messung des Brennwertes bestimmt. Die spezifischen Brennwerte der verschiedenen Pflanzenöle sind nahezu gleich. Sie betragen zwischen 39,5 und 40,5 MJ/kg (Tafel 7 in [1]). Für Ethyl- und Methylester von Rapsöl wurden 39,4 bzw. 40,6 MJ/kg ermittelt. Die Brennwerte liegen damit um etwa 12 % unter dem mittleren Brennwert von Dieselmotorkraftstoff (45,0 MJ/kg). Für die Nutzung im Dieselmotor sind jedoch die spezifischen Heizwerte der Energieträger maßgebend (Spez. Heizwert ist gleich dem spez. Brennwert vermindert um die Verdampfungsenthalpie des aus dem Verbrennungsprozess abgeführten Wassers). Die spez. Heizwerte von Pflanzenölen und Estern unterscheiden sich untereinander um weniger als 2 % und liegen bei etwa 37,2 MJ/kg, für Dieselmotorkraftstoff bei 42,4 MJ/kg.

Die Dichte der Pflanzenöle beträgt 0,91–0,94 g/cm<sup>3</sup> bei 15 °C (Tafel 7 in [1]), die von Ethyl- und Methylester von Rapsöl 0,87 bzw. 0,88 g/cm<sup>3</sup>. Im Vergleich zur Dichte von Dieselmotorkraftstoff (0,81–0,86 g/cm<sup>3</sup>) liegen die Dichten der Pflanzenöle etwa 10 %, die der Ester etwa 5 % höher.

## 2.2 Verbrauchs- und Leistungswerte

Die Dosierung des Kraftstoffes bei der Einspritzung in den Dieselmotor erfolgt volumetrisch, so daß — unter der Voraussetzung gleicher thermischer Wirkungsgrade — die mit verschiedenen Kraftstoffen erreichbaren Leistungen vom volumenbezogenen Heizwert abhängig sind. Aus den zuvor angegebenen Werten ergeben sich die volumenbezogenen Heizwerte zu 35,4 MJ/l für die Pflanzenöle und 32,6 MJ/l für die Ester von Rapsöl. Der Unterschied im volumenbezogenen Heizwert zwischen den Pflanzenölen und Dieselmotorkraftstoff beträgt nur etwa 3 %, zwischen den Estern und Dieselmotorkraftstoff jedoch etwa 10 %. Bei unveränderter Einstellung der Einspritzpumpe sind Leistungsminderungen in diesen Größenordnungen zu erwarten.

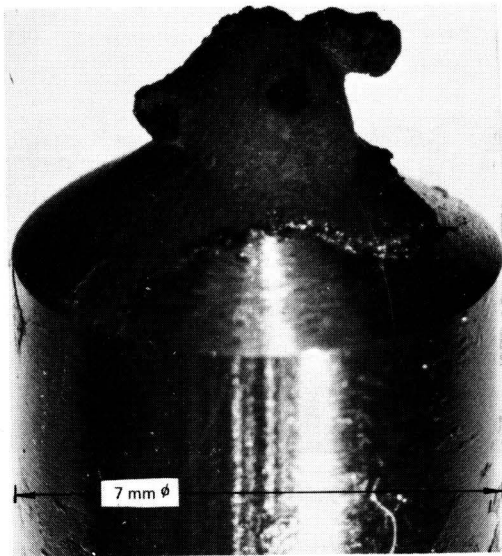
Durch die Umstellung der Einspritzpumpen auf höhere Fördermenge lassen sich gleiche Leistungen wie bei Dieselmotorkraftstoff bei entsprechend höherem volumetrischen Verbrauch erzielen. Verbrauchs- und Leistungsmessungen mit Rapsöl an zwei Schleppern mit direkter Einspritzung bestätigten diese Werte für einen Saugmotor, während für einen Motor mit Aufladung der Verbrauch geringer als erwartet war [1].

Ähnliche Ergebnisse haben andere Institute und Motorenhersteller für Rapsöl veröffentlicht [7, 8], und ähnliche Ergebnisse wurden auch für Öle wie Soja-, Sonnenblumen- und Erdnußöl erzielt, die in anderen Ländern eine größere Bedeutung als Rapsöl haben. Für diese Verbrauchs- und Leistungsmessungen wurden die Motoren mit dem alternativen Kraftstoff jeweils nur kurzfristig betrieben.

## 2.3 Probleme bei Dauereinsatz

Werden Pflanzenöle in den heute als Schleppermotoren fast ausschließlich verwendeten Direkteinspritzmotoren im Dauerbetrieb als Alleinkraftstoff oder zu großen Anteilen vermischt mit Dieselmotorkraftstoff eingesetzt, so treten Störungen in Form oder aufgrund von Verkrustungen an verschiedenen Motorteilen auf. Sie führen schon nach kurzer Zeit — nach wenigen hundert Stunden oder manchmal schon nach wenigen Betriebsstunden — zur Leistungsminderung und schließlich zum Ausfall des Motors.

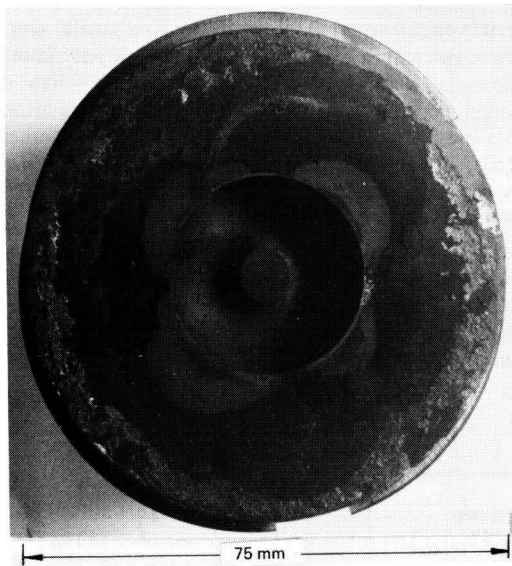
Als Beispiel zeigt Bild 2 eine Vierlochdüse nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Rapsöl. Unverbranntes oder teilverbranntes, verkocktes Rapsöl erzeugt dicke, harte Rückstände, die um jede Einspritzbohrung eine sogenannte Trompete bilden. Hierdurch wird die Tröpfchenbildung und Gemischverteilung des Kraftstoffes beeinträchtigt, so daß es zu einer weiteren Verschlechterung der Verbrennung und zu verstärkter Verkrustung kommt.



**Bild 2.** Verkrustungen an der Einspritzdüse nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.

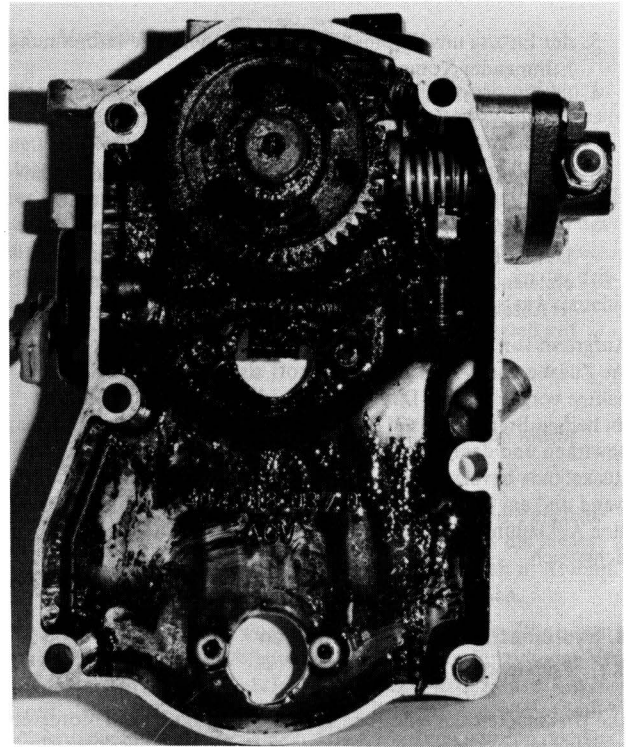
Auch der in **Bild 3** dargestellte Kolben ist nur 50 Stunden bei 3/4-Last mit Pflanzenöl in Betrieb gewesen. Auf dem Kolbenboden hat sich eine schwarze, dicke, feste Kruste gebildet. Im oberen Totpunkt füllt sie am Rand bereits den Spalt zwischen Kolbenfläche und Zylinderkopf aus, so daß sie zusammengepreßt bzw. zum Teil breitgedrückt wird.

Ablagerungen in der obersten Kolbenringnute und an dem Kolbenring stellen das folgenschwerste Problem des Motorbetriebes mit Pflanzenöl dar. Durch sie wird der Kolbenring in der Nute festgeklemmt. Die Folge ist nachlassende Kompression und dadurch weitere Verschlechterung der Verbrennung, Zunahme der Verkrustung und Abnahme der Leistung.



**Bild 3.** Verkrustungen auf dem Kolben nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.

Am klemmenden, die Dichtfunktion nicht mehr hinreichend erfüllenden Kolbenring vorbei gelangt dann Pflanzenöl in das Kurbelgehäuse. Es vermischt sich mit dem Motoröl, führt zu zähen, gummiartigen Belägen an den Motorteilen, **Bild 4**, und zu Funktionsstörungen bis hin zum Ausfall des Motors. Die Analyse eines Motoröls ergab nach 200stündigem Betrieb mit Rapsöl einen Pflanzenölanteil von 12,5 %.



**Bild 4.** Beläge auf Motorteilen nach 200stündigem Betrieb mit raffiniertem Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.

Im Gegensatz zu diesen Problemen bei Dieselmotoren mit direkter Einspritzung können Motoren mit Vorkammer nahezu problemlos mit Pflanzenölen auch über mehr als tausend Stunden betrieben werden, vor allem wenn es sich um raffinierte Pflanzenöle handelt [9, 10].

#### 2.4 Ausgewählte Maßnahmen zur Verbesserung der Kraftstoffeigenschaften

Eine Verwendung der Pflanzenöle als Ersatz für Dieselmotorkraftstoff setzt voraus, daß Maßnahmen gefunden werden, um die beschriebenen im Dauerbetrieb auftretenden Probleme zu lösen. Hierbei ist zunächst das Problem der Verkrustungen und des Festgehens der Kolbenringe zu lösen. Die Schmierölveränderungen sind erst in zweiter Linie von Interesse, da sie vermutlich eine Folgeerscheinung der Verbrennungsprobleme sind.

Grundsätzlich sind 2 verschiedene Wege denkbar

1. die Anpassung der Motoren an den Kraftstoff oder
2. die Anpassung des Kraftstoffes an die Motoren.

Es ist selbstverständlich nicht ausgeschlossen, daß einer der Wege durch Maßnahmen des anderen ergänzt wird. Auf absehbare Zeit und insbesondere für die Verhältnisse der Landwirtschaft in der Bundesrepublik ist der zweite Weg – die Anpassung des Kraftstoffes an den Motor – vorteilhaft, weil er es erlauben würde, kurzfristig, auf begrenzte Zeit, Pflanzenöl als alternativen Kraftstoff – allein oder als Mischungskomponente – statt Dieselmotorkraftstoff einzusetzen.

Die Maßnahmen dieses Weges können sein:

1. der Zusatz von Additiven
  - zur Verbesserung der Gemischbildung durch Verminderung der Oberflächenspannung,
  - zur Verbesserung der Verbrennung durch katalytische Wirkung oder
  - zur Beseitigung von Rückständen;
2. die Mischung mit anderen Kraftstoffen, um durch niedrigere Viskosität des Mischkraftstoffes eine bessere innere Gemischbildung zu erreichen oder durch besser verbrennende Anteile am Gemisch die Verbrennung insgesamt zu fördern;



3. der Entzug unvollkommen verbrennender oder verbrennungshemmender Komponenten;
4. die Vorwärmung zur Verminderung der Viskosität, um damit die innere Gemischbildung und Verbrennung zu verbessern und
5. die chemische Veränderung, d.h. die Herstellung von Pflanzenölderivaten (z.B. Methyl- oder Ethylester), um durch Verkleinerung der Moleküle ein leichteres und schnelleres Durchbrennen und eine geringere Verkokungsneigung zu erzielen. (Eine Beschreibung dieser Maßnahme wird später in Abschn. 4 gegeben.)

Aufgrund von Erfahrungen bei Dieseldieselkraftstoff wurde auch schon die Zugabe von Wasser zum Kraftstoff als weitere mögliche Maßnahme vorgeschlagen. Das schlagartige Verdampfen des Wassers im heißen Brennraum soll dabei die Zerstäubung des Kraftstoffes bewirken und damit die Gemischbildung fördern. Da aber die Rückstände bevorzugt an kälteren Motorteilen, z.B. der Zylinderwand und am Einlaßventil, entstehen und die Wassereinspritzung eine Abkühlung bewirkt, erscheint diese Maßnahme wenig aussichtsreich.

### 3. Systematische Untersuchungen

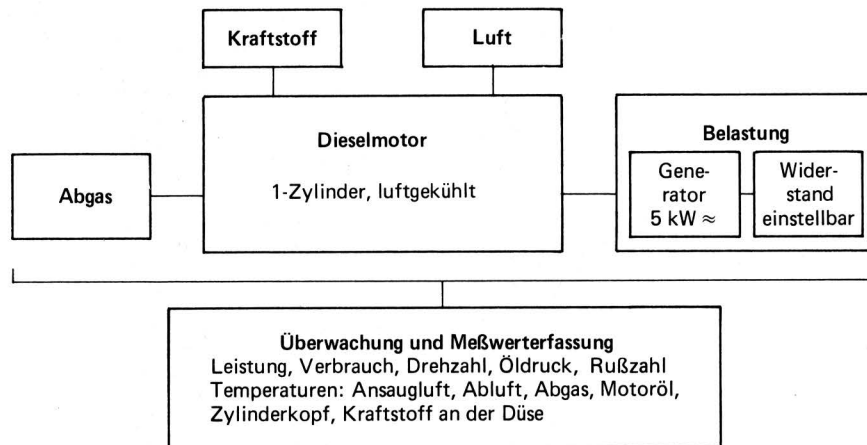
#### 3.1 Prüfstand

Die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen kann nur in Motorversuchen von ausreichender Dauer ermittelt werden. Die Versuchsdurchführung muß Reproduzierbarkeit und Differenzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten, dabei sollten der Aufwand für die Einrichtung, der Wartungs- und Erhaltungsaufwand und die Kraftstoffkosten gering gehalten werden.

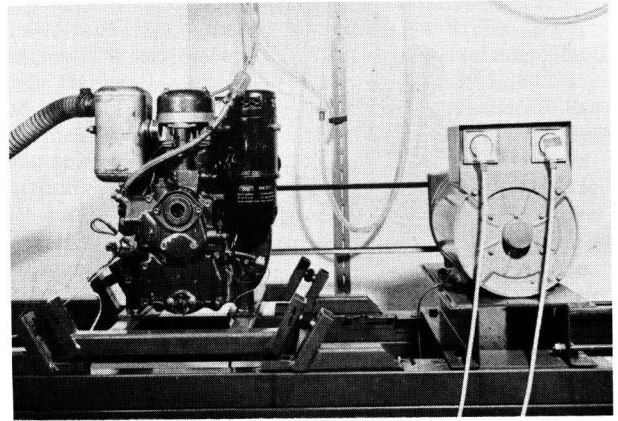
Es wurden deshalb kleine Einzylinder-Dieselmotoren verwendet:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Dieselmotor mit direkter Einspritzung    | 2. Dieselmotor mit Vorkammer             |
| Bohrung $d = 75 \text{ mm } \phi$           | $d = 75 \text{ mm } \phi$                |
| Hub $s = 55 \text{ mm}$                     | $s = 80 \text{ mm}$                      |
| Hubvolumen $V_H = 0,24 \text{ l}$           | $V_H = 0,353 \text{ l}$                  |
| Nennleistung $P_N = 3,5 \text{ kW}$         | $P_N = 4,4 \text{ kW}$                   |
| Nenn Drehzahl $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$ | $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$            |
| (2 Motoren wurden im Wechsel eingesetzt)    | (Vorkammer als Wirbelkammer ausgebildet) |

Wirkungsweise und Aufbau des Prüfstandes gehen aus **Bild 5** und **6** hervor. Belastet wird der Motor durch einen Wechselstromgenerator und einen einstellbaren ohmschen Widerstand. Eine Reihe von Meßelementen dient der Ermittlung und Einhaltung der festgelegten Versuchsparameter, dem Unfallschutz, Brandschutz und Schutz vor einem Totalschaden des Motors. Zur vergleichenden Beurteilung der Versuche und zur Rekonstruktion unvorhergesehener Ausfälle werden die Temperaturen und die Drehzahl fortlaufend mit einem Drucker registriert.



**Bild 5.** Schema des Motor-Prüfstandes zur Untersuchung alternativer Kraftstoffe.



**Bild 6.** Ansicht des Motor-Prüfstandes.

Da das Beurteilungsverfahren (s. folgenden Abschnitt) für jeden Versuch einen neuen Kolben erfordert, findet vor jedem Versuch ein Einfahren der neuen Kolben/Zylinder-Paarung mit Dieseldieselkraftstoff statt. Am Ende der Einfahrzeit werden der Verbrauch und die Rußzahl nach Bosch bestimmt, um den einwandfreien Zustand des Prüfmotors und die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen.

#### 3.2 Beurteilung

Da es ein genormtes Verfahren zur Prüfung der Kraftstoffreinigung im Motorversuch nicht gibt, wurde das genormte Verfahren zur Prüfung von Motorschmieröl entsprechend modifiziert. Nach DIN 51 361 wird die Eignung der zu prüfenden Schmieröle festgestellt, indem bei Betrieb mit genormtem Dieseldieselkraftstoff die Sauberkeit des Kolbens eines Einzylinder-Prüfmotors als Beurteilungsmaßstab herangezogen wird. In Abwandlung dieses Prinzips kann bei Einsatz verschiedener, nicht genormter Kraftstoffe, aber eines bewährten, guten Motorenöls (BP Vanellus TS 30) die Sauberkeit des Kolbens zur Beurteilung der Kraftstoffreinigung – bzw. der Wirksamkeit einer gewählten Verbesserungsmaßnahme dienen. Auch das Vorgehen bei der Beurteilung der Kolbensauberkeit ist in DIN 51 361 festgelegt. Das in **Bild 7** dargestellte Formular zeigt auf, wie aus dem Zustand der fünf Kolbenabschnitte die Bewertungszahl errechnet wird.

Abweichend von den genormten Bedingungen wurde der vorgeschriebene 50-Stunden-Dauertest in Intervallen als 5- bzw. 6-Tage-Test durchgeführt, um möglicherweise während der Stillstandzeiten auftretende Verharzungs- oder Verklebungserscheinungen praxisnah zu berücksichtigen.

Neben der Kolbensauberkeit dienen die täglich ermittelten Rußzahlen und die nach jedem Versuch festgestellten Krusten an den Düsen, auf der Kolbenfläche und am Zylinderkopf nach Menge, Konsistenz und Haftung zur Beurteilung des Erfolges der verschiedenen Maßnahmen. Auch Analysen des Schmieröles wurden zur Differenzierung herangezogen. Der Kraftstoffverbrauch wurde täglich durch Wägung bestimmt, auf die Arbeit bezogen und über die gesamte Versuchsdauer von in der Regel 50 Stunden gemittelt. Wegen der unvermeidbaren Unterschiede im Einlaufverhalten, im Verschleißzustand des Triebwerkes und wegen anderer Einflußgrößen haben diese Werte nur eingeschränkte Aussagekraft.



Motorprüfstand

Datum:

Kraftstoff:

Name:

Kolben-Nr.:

Laufzeit:

Kolbenbewertung nach DIN 51361	Flächenanteil	Farb- bzw. Kohlefaktor	Produkt	Summe	Mittelwert
1 1.Nuten- grund	Sauber	100			
	Verfärbt	65			
	Schwarz	30			
	Kohle	- 30			
2 2.Nuten- grund	Sauber	100			
	Verfärbt	65			
	Schwarz	30			
	Kohle	- 30			
3 3.Nuten- grund	Sauber	100			
	Verfärbt	65			
	Schwarz	30			
	Kohle	- 30			
4 1.Steg	Sauber	100			
	Verfärbt	65			
	Schwarz	30			
5 2.Steg	Sauber	100			
	Verfärbt	65			
	Schwarz	30			

Mittelwert  $1 \div 5$

Bild 7. Formular zur Bewertung der Kolbensauberkeit in Anlehnung an DIN 51361 T 2 [11].

### 3.3 Versuchsvarianten und Ergebnisse

Die einzelnen Versuche sind drei Versuchsreihen zuzuordnen. In der ersten Reihe wurden die verschiedenen ausgewählten Maßnahmen zur Verbesserung des Brennverhaltens der Pflanzenöle im Motor mit direkter Einspritzung untersucht (Abschn. 3.3.1). In der zweiten Versuchsreihe (Abschn. 3.3.2) wurden zum Vergleich einige dieser Versuche im Vorkammermotor wiederholt, um das aus dem Schrifttum bekannte wesentlich bessere Verhalten von Pflanzenölen in Motoren dieser Bauart zu überprüfen. In der dritten Versuchsreihe (Abschn. 3.3.3) wurden aufgrund der Versuchsergebnisse der ersten Reihe ergänzende Versuche speziell mit Estern durchgeführt.

#### 3.3.1 Untersuchung der ausgewählten Maßnahmen im Motor mit direkter Einspritzung

Eine Übersicht und ausgewählte Ergebnisse der ersten Versuchsreihe gibt **Tafel 1** wieder. In der ersten Spalte stehen die bisher untersuchten Kraftstoffvarianten in Gruppen, die den in Abschn. 2.4 erläuterten ausgewählten Maßnahmen entsprechen.

Die ersten vier Versuche wurden bei Vollast gefahren. Wie schon bei den Messungen an Schleppern [1] ist auch im Einzylinder-Versuchsmotor beim Vergleich von Rapsöl mit Dieselmotorkraftstoff der spezifische Verbrauch beim Pflanzenöl gravimetrisch höher, jedoch energetisch gleich. Die Rußzahlen wurden bei diesen Versuchen nicht bestimmt. Die Kolbensauberkeit ist bei Rapsöl wesentlich schlechter als bei Dieselmotorkraftstoff. Der oberste Kolbenring war beim Dieselmotorkraftstoff sauber, bei Rapsöl auf dem halben Umfang in der Nute fest verklemt, so daß er beim Abnehmen zu Bruch ging. Während die Düse bei Dieselmotorkraftstoff schwarz

Kraftstoff	Leistung W	Verbrauch g/kWh	MJ/kWh	Rußzahl n. Bosch					Kolben-Sauberkeit	Kolbenring	Düse	Verkrustung
				1	2	3	4	5				
Dieselmotorkraftstoff	3400	267	11,3						86	sauber	schwarz o.K.	(Ruß)
Rapsöl raff.	3400	307	11,4						50	1/2 fest, Bruch	verkrustet	mittelfest

Rapsöl + Add. 1	3400	321	11,9						37	3/4 fest, Bruch	verkrustet	mittelfest
Rapsöl + Add. 2	3400	nach 30 Min. abgebrochen; Motoröltemp. 140 °C, Soll-Leistung nicht erreicht										

Dieselmotorkraftstoff	2475	311	13,1	0,4	0,6	0,6	0,5	0,4	74	sauber	verkrustet	dünn, locker
Rapsöl raff.	2475	330	12,3	0,9	1,4	2,4	2,9	2,2	56	fest, Bruch	verkrustet	hart, grob
Sojaöl raff.	2475	338	12,6	0,6	0,6	0,7	0,7	1,1	58	klemmt	verkrustet	grob, feucht
Erdnußöl raff.	2475	347	12,9	0,6	0,6	1,2	1,1	0,6	55	3/4 fest	v., abstreifb.	fein, trocken

Rapsöl roh	2475	498	(18,5)						(55)	nach 5 Std. abgebrochen, Öl 145 °C		
------------	------	-----	--------	--	--	--	--	--	------	------------------------------------	--	--

DK/Rö 50/50 *)	2475	317	12,6	0,4	0,5	0,9	1,4	1,4	57	noch lose	verkrustet	hart
----------------	------	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----------	------------	------

Rapsöl raff.erw.	2475	384	14,3	1,4	2,0	2,8	2,6	2,6	43	total fest	verkrustet	mittelgroß
Erdnußöl r.erw.	2475	366	13,7	1,0	1,8				(45)	1/3 fest	nach 23 Std. Anl. n. mögl.	

Rapsöl umgeest.	2475	355	13,2	0,2	0,4	1,0	1,2	1,8	74	sauber	verkrustet	dünn, locker
-----------------	------	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	----	--------	------------	--------------

\*) DK Dieselmotorkraftstoff  
Rö Rapsöl

Tafel 1. Übersicht und Ergebnisse von 50-Stunden-Versuchen mit Pflanzenölen im Motor mit direkter Einspritzung.

und ohne nennenswerte Kruste war und sich auf dem Kolben, dem Zylinderkopf und an den Ventilen nur Ruß befand, waren diese Teile bei Rapsöl mit mittelfesten Verkrustungen belegt.

Die Zugabe von Additiven brachte keine Verbesserung. Vielmehr hatte ein bekanntes, bei Dieseldieselkraftstoff verbrennungsförderndes Mittel noch geringere Kolbensauberkeit und einen auf noch größerem Teil des Umfangs festgelegten Kolbenring zur Folge. Das Additiv 2 ist als Heizölzusatz zur Rußverminderung und -beseitigung geprüft und anerkannt. Der Versuch, mit dieser Maßnahme die Verkrustungen zu beseitigen, wenn ihre Bildung schon nicht verhindert werden kann, mußte jedoch nach kurzer Zeit wegen zu hoher Temperaturen abgebrochen werden. Da die Soll-Leistung nicht erreicht werden konnte, wurden die weiteren Versuche bei 3/4-Last durchgeführt.

Entgegen diesen negativen Ergebnissen beim Einsatz von Additiven zu Pflanzenölen wurde von *van der Walt u. Hugo* [12] über Teilerfolge berichtet. Aus einer großen Anzahl geprüfter Additive hatten zwei geringfügige, partielle Verbesserungen, z.B. bei der Düsenverkrustung, zur Folge. Durch Entwicklung spezieller Additive für Pflanzenöle werden größere Fortschritte erwartet.

Bei der Wiederholung des Vergleiches von Dieseldieselkraftstoff und Rapsöl bei 3/4-Last fällt auf, daß auch beim Dieseldieselkraftstoff an der Düse Verkrustungen auftreten. Sie sind aber wie im übrigen Brennraum dünn und sitzen locker. Bei wechselnder Motorlast im praktischen Betrieb ist zu erwarten, daß sie rechtzeitig abplatzen oder abbrechen und nicht zu Störungen der inneren Gemischbildung und Verbrennung führen.

Der Versuch mit Rapsöl bei 3/4-Last hat etwa das gleiche Ergebnis wie bei Vollast, nur sind die Verkrustungsschichten stärker und härter. Bemerkenswert ist die Veränderung der Werte für die Rußzahl. Als Ursache für die laufende Zunahme ist die Düsenverkrustung anzusehen. Der Abfall am 5. Tag deutet darauf hin, daß ein teilweises Abbrechen der Verkrustung mit der Folge vorübergehender Verbrennungsverbesserung möglich ist.

Vergleichsversuche mit verschiedenen Pflanzenölen (raffiniertem Soja- und Erdnußöl) erbrachten ähnliche Ergebnisse wie beim Rapsöl. Die festgestellten Unterschiede waren nur graduell, nicht prinzipiell. So klemmte der Ring bei Sojaöl nur, er war noch nicht fest. Die Krusten waren grob und feucht. Bei Erdnußöl war der Ring bereits auf 3/4 des Umfangs fest, die Krusten an der Düse waren abstreifbar, die Krusten im übrigen Brennraum feinkörnig und trocken.

Die Frage, ob durch die Raffination unvollkommen verbrennende oder verbrennungshemmende Komponenten entzogen werden oder auch die Verwendung rohen Rapsöls möglich ist, läßt sich eindeutig beantworten; denn nach 5 Stunden mußte der Versuch mit rohem Rapsöl abgebrochen werden. Eine Wiederholung des Versuches mit rohem, jedoch entschleimtem Rapsöl erbrachte das gleiche Ergebnis. Er mußte nach 6 Stunden abgebrochen werden, und nach dieser kurzen Zeit klemmte der Kolbenring bereits.

Beim Betrieb des Versuchsmotors mit einer Mischung aus Dieseldieselkraftstoff und raffiniertem Rapsöl 50/50 zeigte sich, daß die Probleme nur entsprechend dem verringerten Rapsöl-Einsatz verzögert auftraten, z.B. hatte der Kolbenring nach 50 Stunden kein Spiel mehr, war aber gerade noch lose.

Der Versuch, durch Erwärmen die Viskosität der Pflanzenöle zu vermindern und damit die Verbrennung zu verbessern, hatte keinen Erfolg. Ausgehend von der Temperatur des Kraftstoffes in der Düse von 82–84 °C bei Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff, war die Temperatur der Pflanzenöle gegenüber diesem Wert um ca. 100 K zu erhöhen, um die gleiche Viskosität zu erreichen (Bild 1). Mit einer elektrischen Heizung an der Einspritzleitung unmittelbar vor dem Düsenhalter wurde dies gewährleistet. Die erstrebte Verbrennungsverbesserung konnte jedoch nicht erreicht werden. Der Verbrauch stieg, die Rußzahlen waren sehr hoch, die Kolbensauberkeit war sehr schlecht und der Kolbenring nach 50 Stunden auf ganzem Umfang fest. Bei Erdnußöl waren die Verkrustungen an der Düse so stark, daß nach 23 Stunden zu Beginn des 3. Versuchstages ein

Wiederanlassen des Motors nicht mehr möglich war. Der Kolbenring war zu dieser Zeit bereits auf 1/3 des Umfangs fest.

Bei den Maßnahmen, durch chemische Veränderung des Pflanzenöles eine Verbesserung der Brenneigenschaften zu erzielen, bietet sich eine Umesterung an (Abschn. 4). Der Einsatz von Ethylester, d.h. mit Ethanol umgeestertem Rapsöl, brachte ein positives Ergebnis: Der energetische Verbrauch war unverändert so gut wie bei Dieseldieselkraftstoff oder Pflanzenöl, die Kolbensauberkeit so gut wie bei Dieseldieselkraftstoff, der oberste Kolbenring war sauber und zeigte keine Anzeichen für ein Festwerden. Krusten traten zwar auf, sie waren dünn und saßen locker, entsprechend denen von Dieseldieselkraftstoff. Auch die Rußzahlen waren anfangs sehr niedrig; ob ihre Werte mit der Betriebsdauer weiter zunehmen oder durch Abbrechen von Krusten wieder sinken, kann aus dem Ergebnis dieses Versuches nicht abgeleitet werden. Zur Klärung dieser und weiterer mit Esterkraftstoff zusammenhängender Fragen wurde die 3. Versuchsreihe durchgeführt.

Zusammenfassend ist als Ergebnis der ausgewählten Maßnahmen zur Verbesserung der Kraftstoffigenschaften von Pflanzenöl festzustellen:

- Die Zugabe von Additiven ergab keine Verbesserungen;
- der Einsatz von 3 verschiedenen Pflanzenölen ließ keinen gravierenden Einfluß der unterschiedlichen Zusammensetzung dieser Pflanzenöle erkennen;
- eine Teilraffination ist nicht ausreichend; auch für kurzzeitigen Betrieb sollten die Pflanzenöle zumindest raffiniert sein;
- Mischungen vermindern die Probleme nur in gleichem Maß, wie der Anteil des Pflanzenöles vermindert ist;
- Erwärmen zur Verminderung der Viskosität bringt keine Verbesserung, sondern kann sich auch verschlechternd auswirken;
- nur die chemische Veränderung der Pflanzenöle, die Verkleinerung der Moleküle durch Umestern mit Ethanol oder Methanol, scheint erfolgversprechend.

### 3.3.2 Vergleichsversuche im Motor mit Vorkammer

Berichte von problemlosen oder nahezu problemlosen Dauerläufen mit Pflanzenölen in Vorkammerdieselmotoren [9, 10] waren Anlaß, zum Vergleich entsprechende Versuche unter den gleichen Bedingungen wie beim Direkteinspritzmotor anzustellen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Versuche sind in **Tafel 2** wiedergegeben.

Der Motor konnte mit rohem, aber entschleimtem Rapsöl bei Einsatz der üblichen Starthilfe gestartet und betrieben werden. Das rohe Öl führte jedoch nach wenigen Stunden zu starken Düsenverkrustungen und schwankenden Abgastemperaturen. Mit raffiniertem Raps-, Erdnuß- und Sojaölen wurden die guten Ergebnisse anderer mit Vorkammermotoren bestätigt. Das Verhalten in bezug auf Krustenbildung im Brennraum, Kolbensauberkeit, **Bild 8**, und Kolbenringstecken ist wesentlich besser als beim Direkteinspritzmotor. Erste, geringe Ansätze von Krusten an der Innenfläche der Kolbenringe und in der obersten Kolbenringnute sowie die Krusten an den Düsen und in der Vorkammer, **Bild 9**, lassen jedoch erwarten, daß auch Vorkammermotoren auf Dauer nicht ohne Schwierigkeiten mit Pflanzenölen betrieben werden können.

Mit einem Gemisch 50/50 aus Dieseldieselkraftstoff und Methylester von Rapsöl war der Motor sauberer als mit reinem Dieseldieselkraftstoff. Die mit Ethyl- oder Methylalkohol umgeesterten Pflanzenöle sind also nicht nur im direkteinspritzenden Motor erfolgversprechend, sondern verhalten sich auch im Vorkammermotor besser als raffinierte Pflanzenöle. Sie könnten der Dieselerersatz-Kraftstoffe für beide Motortypen sein, was auch aus logistischen Gründen vorteilhafter als zwei verschiedene Kraftstoffe ist.

Kraftstoff	Leistung W	Verbrauch		Rußzahl nach Bosch						Kolben- Saubereit	Kolbenring
		g/kWh	MJ/kWh	1	2	3	4	5	6		
Diesel- kraftstoff	3195	290	12,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	100	lose, sauber
	Vorkammer: leicht verußt      Düse: dünn, schwarz belegt Brennraum: dünner, schwarzer Ruß, Zyl.-ende auf 1/2 U feste, glatte Kruste										
Rapsöl roh, entschl.	3195	365	13,6	0,2	0,3	0,2	0,2	—	—	(86)	lose, sauber, Kohleansatz
	Vorkammer: Krusten      Düse: dicke Krusten, Schirm, D-Nadel fest (33 Std.) Brennraum: dünner, schwarzer Ruß, z.T. Krusten      schwankende Abgastemperatur										
Rapsöl raff.	3195	374	13,9	1,6	2,2	1,7	1,4	1,8	1,6	97	lose, sauber, 1/3 berußt
	Vorkammer: leicht verußt      Düse: dünn, schwarz belegt, Schaft verkrustet Brennraum: dünner, schwarzer Ruß, Zyl.-ende auf 3/4 U feste, glatte Kruste										
Erdnußöl raff.	3195	361	13,4	—	1,4	1,8	1,6	1,3	1,8	94	lose, sauber, 1/4 berußt
	Vorkammer: leicht verußt      Düse: schwarz belegt, Krater am Zapfen, Schaft verkrustet Brennraum: dünner, schwarzer Ruß, Zyl.-ende auf ganzem U schwarze, starke Kruste										
Sojaöl raff.	3195	344	12,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	96	lose, sauber, 1/3 berußt
	Vorkammer: leicht verußt      Düse: schwarz belegt, graue Fahne Brennraum: dünner, schwarzer Ruß, Zyl.-ende mehr als 2/3 U feste, schwarze Kruste										
DK/ME 50/50*)	3195	327	13,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	100	lose, sauber
	Vorkammer: weniger verußt      Düse: dünn, schwarz belegt Brennraum: dünner, schwarz-grauer Ruß, Zyl.-ende auf 2/3 U schwarz										

\*) DK Dieselkraftstoff  
ME Methyl ester von Rapsöl

**Tafel 2.** Übersicht und Ergebnisse von 50-Stunden-Versuchen mit Pflanzenölen im Vorkammernmotor.



**Bild 8.** Kolben nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Rapsöl; Einzylindermotor mit Vorkammer.

### 3.3.3 Versuche mit Ethyl- und Methyl ester von Rapsöl im Motor mit direkter Einspritzung

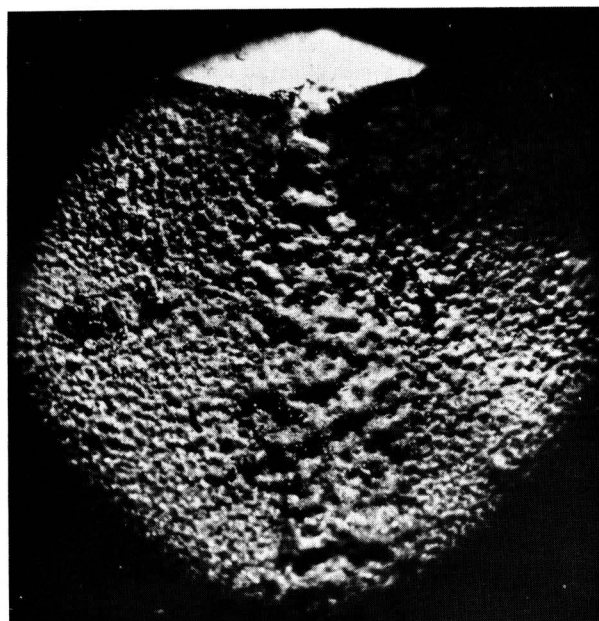
Die Umesterung — auch die industrielle — könnte wirtschaftlicher sein, wenn Zugeständnisse in bezug auf die Reinheit der Ester möglich sind, d.h. wenn der zur vollständigen Umesterung erforderliche Alkoholüberschuß nicht wieder abgetrennt werden muß oder wenn bei geringerem Einsatz von Alkohol ein Teil des Rapsöls unverändert bleiben kann.

Beide Fälle wurden überprüft und ergaben Schwierigkeiten, **Tafel 3.** Unreine Ester verursachten einen Anstieg der Rußzahlen, schlechte Kolbensauberkeit und Düsenverkrustung. Bei Alkoholresten im Ester mußte der Versuch vorzeitig wegen Düsenschlagens abgebrochen werden. Bei Resten unveränderten Öles im Ester saß der Kolbenring bei Beendigung des Versuches nach 50 Stunden bereits fest. Die Ester sollten also rein sein.

In der Praxis wird es nicht zu vermeiden sein, daß Ester mit Dieselkraftstoff gemischt wird, sei es, daß der Dieselkraftstoffvorrat nur verlängert werden soll oder daß sich noch Reste im Kraftstoffsystem befinden. Die Mischung Dieselkraftstoff/Ethyl-ester 50/50 ergab die erwünschte und erwartete Sauberkeit des Kolbens wie bei Dieselkraftstoff,

und der Kolbenring war lose, aber die Bildung einer lockeren Kruste vor der Einspritzdüse im Schußkanal ließ die Rußzahlen von Tag zu Tag ansteigen; so daß bereits nach 37 Stunden wegen zu hoher Werte die Düse ausgebaut und die Kruste vor dem Schußkanal abgestoßen werden mußte. Danach war das Verhalten bis zum Versuchsende einwandfrei.

**Bild 9.** Krusten in der Vorkammer nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Sojaöl.



**Bild 9.** Krusten in der Vorkammer nach 50stündigem Betrieb mit raffiniertem Sojaöl.



Kraftstoff	Leistung W	Verbrauch		Rußzahl n. Bosch					Kolben- Sauberkeit	Kolbenring	Düse	Verkrustung
		g/kWh	MJ/kWh	1	2	3	4	5				
Ethylester von Rapsöl	2475	355	13,2	0,2	0,4	1,0	1,2	1,8	74	sauber	verkrustet	dünn, locker
EE*)/Ethanol 90/10	2475	393	14,2	0,2	0,4	0,8	1,4	-	58	lose, sauber	verkrustet	dick, schwarz
EE/Rapsöl 50/50	2475	349	13,0	0,2	0,6	1,0	1,6	1,7	54	1/3 fest	zieml. sauber	dünn bis dick z.T. grau/aschig
EE/DK 50/50	2475	349	13,9	0,7	1,4	1,8	2,8 0,8	0,8	75	lose, sauber	z.T. verkr.	dünn bis dick grau/aschig, locker
EE/DK 50/50	2475	309	12,3	0,3	0,9	0,6	0,9	0,9	91	lose, sehr sauber	z.T. verkr. D.-bohrung frei	dünn, staubig grau/schwarz, locker

\*) EE Ethylester von Rapsöl  
DK Dieselkraftstoff

Tafel 3. Übersicht und Ergebnisse von 50-Stunden-Versuchen mit Ethylester von Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.

Um diese Schwierigkeiten zu beseitigen, die sich auch schon bei reinem Esterbetrieb (100 % Ethylester) in der ersten Versuchsreihe gezeigt hatten, wurde folgende einfache Überlegung angestellt: Wenn ein an sich gut brennbarer Stoff nicht vollständig verbrennt, fehlt entweder der nötige Sauerstoff oder es fehlt die Zeit, um sich mit dem Sauerstoff genügend zu mischen. Da ausreichend Luft zur Verfügung steht, wurde die verfügbare Zeit verlängert, indem die Einspritzzeit um 40° Kurbelwinkel gegenüber der vom Werk gegebenen Standardeinstellung für Dieselkraftstoff vorverlegt wurde.

Als Folge dieser Maßnahme verbesserten sich die Verbrauchswerte und verringerten sich die Rußzahlen, die Kolbensauberkeit war besser als bei Dieselkraftstoff, der Kolbenring lose und sehr sauber, die Verkrustungen an der Düse waren so gering wie bei Dieselkraftstoff und die Düsenbohrungen frei. Im übrigen Brennraum fanden sich dünne, lockere Krusten, die zum Teil als staubiger Belag zu bezeichnen waren.

Das Hauptproblem – die Krustenbildung bei der Verbrennung – scheint mit diesen Maßnahmen gelöst zu sein, und es war nun das Problem der Schmieröl-Beeinflussung durch Vermischung mit dem Kraftstoff zu prüfen. Die im Vergleich zum Schmieröl geringere Viskosität des Esters führt zur Verdünnung und kann deshalb mangelhafte Schmierfilmbildung und erhöhten Verschleiß nach sich ziehen. Das ist bei den ersten Esterversuchen der Fall gewesen,

wie die Ölanalysendaten zeigen, Tafel 4. Mit der Vorverlegung des Einspritzzeitpunktes und den damit verbundenen Verbesserungen der Verbrennung werden auch die Schmieröl-daten verbessert. Der Viskositätswert bleibt erhalten, der Abbau der Verschleißschutzadditive geht auf null zurück, und der im Schmieröl feststellbare Estergehalt beträgt weniger als 1/5 des vorhergehenden Wertes. Alle Werte sind verglichen mit den bei Dieselkraftstoff üblichen Werten völlig normal und weit von den zulässigen Grenzwerten entfernt.

Ein Langzeit-Versuch mit Methylester von Rapsöl lief in Intervallen bis zum Ölwechsel nach 150 Stunden und dann mit frischem Öl weitere 150 Stunden. Weder die Zwischenuntersuchungen des Öls noch die Analysen der beiden Ablaßöle zeigten irgendwelche Probleme auf. Entsprechend war auch das Steuergehäuse nach dem Abtropfen des Öles sauber und frei von Belägen, Bild 10.

Der Kraftstoffverbrauch war mit dem Methylester etwas höher als mit dem Ethylester, die Rußzahlen schwankten zwischen 0,4 und 1,2 mit einem Mittelwert unter 0,7, und die Sauberkeit des Kolbens, Bild 11, war besser als bei Dieselkraftstoff nach 50 Stunden. Der Kolbenring war lose und sauber, behindernde Krusten an der Düse waren nicht vorhanden, und die übrigen Beläge entsprachen nach 300 Stunden etwa denen von Dieselkraftstoff nach 50 Stunden.

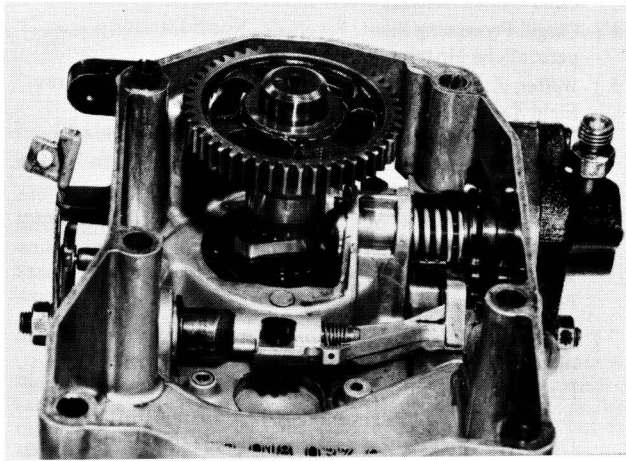
### 3.4 Folgerungen

Aus den Ergebnissen der 3 Versuchsreihen ist zu schließen:

- Rohe Pflanzenöle sind nicht als Kraftstoff für Dieselmotoren geeignet.
- Raffinierte Pflanzenöle sind im Dauerbetrieb für Vorkammermotoren bedingt, für direkteinspritzende Motoren nicht geeignet.
- Die mit Pflanzenölen in direkteinspritzenden Motoren auftretenden Probleme können durch Umestern zu Methyl- oder Ethylester und gleichzeitiges Anpassen der Einspritzzeit gelöst werden, wenn hohe Anforderungen an die Reinheit der Ester erfüllt werden.

Kraftstoff	Ölverweilzeit [h]	Viskosität bei 100 °C [m <sup>2</sup> /s]	Feste Fremdstoffe [Gew. %]	Abbau der Verschleißschutzadditive [%]	Estergehalt [%]
Ethylester (EE)	50	11,4	0,4	- 18	2,5
EE/Ethanol 90 : 10	50	8,54	0,7	- 54	9,8
EE/Rapsöl 50 : 50	50	11,7	0,6	- 15	2,2
DK/EE 50 : 50	50	10,8	1,4	- 18	2,2
DK/EE 50 : 50 (4° früher)	50	11,9	0,2	± 0	0,4
Methylester (ME) (4° früher)	50	–	0,9	- 4	0,8
ME (4° früher)	100	11,6	0,2	- 17	0,9
"	150	11,6	0,6	- 19	1,0
" (nach 300 h)	150	11,8	0,3	- 19	1,3

Tafel 4. Ergebnis von Schmierölanalysen für Prüfstandversuche mit Estern von Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.



**Bild 10.** Steuergehäuse nach 300stündigem Betrieb mit Methyl-ester von Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.



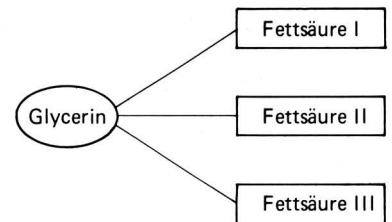
**Bild 11.** Kolben nach 300stündigem Betrieb mit Methyl-ester von Rapsöl; Einzylindermotor mit direkter Einspritzung.

#### 4. Umesterung von Pflanzenölen

Pflanzenöle bestehen zu etwa 97 % aus Triglyceriden, der Rest von 3 % verteilt sich auf Di- und Monoglyceride sowie freie Fettsäuren und Fettbegleitstoffe, die bei der Raffination größtenteils entfernt werden.

Ein Triglycerid, **Bild 12**, ist eine Verbindung, bei der 1 Molekül Glycerin – ein 3wertiger Alkohol – mit 3 Fettsäure-Molekülen verestert ist. Diese sind in den meisten Fällen verschieden. Die Umesterung besteht darin, das 3wertige Glycerin-Molekül durch 3 Moleküle einwertigen Alkohols – Methanol oder Ethanol – zu ersetzen. Jedes Alkohol-Molekül bildet dann mit einem Fettsäurerest ein Molekül Ester. Bei den meisten Pflanzenölen überwiegen die Fettsäuren mit 16 und 18 C-Atomen. Ihre Triglyceride haben Molekulargewichte von 850 bis 900. Bei den Methyl- oder Ethylestern liegen sie bei weniger als 300 und damit dem des Dieselkraftstoffes, dessen Molekulargewicht um 200 beträgt, wesentlich näher. Mit der Umesterung ändert sich die kinematische Viskosität auf etwa 1/10, so daß sie mit Werten von 6–8 m<sup>2</sup>/s bei 20 °C in den Grenzen von Sommer- und Winter-Dieselmotor liegt.

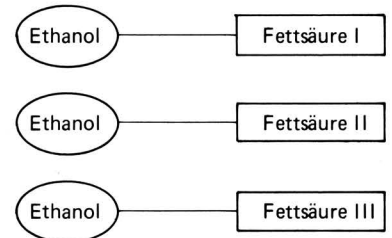
„Triglycerid“



Umesterung: 1 Mol Triglycerid + 3 Mol Ethanol + Katalysator

→ 3 Mol Ethylester + 1 Mol Glycerin + Katalysator

„Ethylester“



**Bild 12.** Schema der Umesterung von Pflanzenöl.

Die Umesterung nach der in **Bild 12** angegebenen Gleichung kann mit Methanol oder Ethanol durchgeführt werden. Als Katalysator eignen sich Alkalimetalle, z.B. Natrium. Die Durchführung ist im Prinzip einfach: für die Herstellung von 100 kg Ester werden 0,13 kg Natrium in 26,3 kg Ethanol gelöst und mit 105 kg raffiniertem Rapsöl in einem Reaktionsgefäß intensiv gemischt, zur Beschleunigung der Reaktion auf 60–80 °C erwärmt und nach mehreren Stunden abgekühlt. Während einer Abstezeit von etwa einem Tag erfolgt eine Separation, so daß danach ein Glycerin-Wasser-Gemisch und ein Ester-Alkohol-Gemisch getrennt abgezogen werden können. Da reines Glycerin Rohstoff für viele Produkte ist, muß es vom Wasser getrennt werden. Diese Trennung ist aufwendig und lohnt sich nur industriell, d.h. bei größeren anfallenden Mengen. Auch das Ester-Alkohol-Gemisch muß getrennt und der Ester getrocknet und gefiltert werden, um Ester ausreichender Reinheit zu erhalten. Als gesamter Zeitaufwand für eine Charge sind 2 bis 3 Tage zu rechnen.

Großtechnisch kann die Umesterung auch kontinuierlich durchgeführt werden; dann wird erst das Glycerin unter Einsatz von Dampf bei einer Temperatur von 250 °C und einem Druck von 250 bar abgespalten und danach die Anlagerung des einwertigen Alkohols vorgenommen.

Wegen des prinzipiell einfachen Verfahrens werden in verschiedenen Ländern Versuche unternommen, die Ölgewinnung und die Umesterung „on farm“ durchzuführen, z.B. in Neuseeland und Südafrika. Dabei ist vorgesehen, das Öl in schlepperbetriebenen Schneckenpressen abzuschneiden. Dadurch ist die Ölausbeute wesentlich niedriger, denn beim Auspressen bleibt ein Restölgehalt von 4 bis 10 % zurück, wogegen in den Ölmühlen beim Pressen und Extrahieren nur Reste von 0,5 % zurückbleiben. Als Reaktionsgefäß für die Umesterung sollen die Behälter von Pflanzenschutzspritzen geeignet sein. Wird jedoch das rohe Pflanzenöl ohne anschließende Raffination verwendet, so wird die Wirksamkeit des Katalysators beeinträchtigt. Die Umesterung verläuft langsamer, unvollständig und mit geringerer Ausbeute; die Verunreinigungen bzw. Fettbegleitstoffe befinden sich im Ester. Unreine Ester aber verursachen Motorprobleme: Kraftstofffilter verstopfen, Düsenadeln klemmen, Funktionsstörungen als Folge von Ablagerungen an Kolbenringen und Ventilen treten auf. Es bleibt abzuwarten, ob „on farm“ die für eine ausreichende Reinheit des Esters erforderlichen Bedingungen geschaffen werden können.

## 5. Zusammenfassung

Pflanzenöle können aufgrund mehrerer Eigenschaften ein Ersatz für Dieselkraftstoff sein, wie einige wichtige Kennwerte aufzeigen und sich bei Kurzzeitmessungen von Verbrauch und Leistung ergab.

Im Dauerbetrieb entstehen in Motoren mit direkter Einspritzung Probleme durch Rückstände, Kolbenringstecken und Schmierölveränderungen, die nach kurzer Zeit zu Störungen oder zum Motorausfall führen. In Vorkammermotoren ist das Verhalten der Pflanzenöle besser, jedoch ist auch hier zu erwarten, daß ein Betrieb auf Dauer nicht ohne Schwierigkeiten möglich ist. Von den ausgewählten Maßnahmen zur Verbesserung der Kraftstoffeigenschaften brachte nur die Umesterung von Pflanzenöl zu Methyl- oder Ethylester eine Lösung dieser Probleme, wenn gleichzeitig die Einspritzzeit gegenüber der vom Motorhersteller angegebenen Einstellung für Dieselkraftstoff vorverlegt wurde.

Der Umesterungsprozeß ist verhältnismäßig einfach durchzuführen, jedoch ist wegen der erforderlichen Reinheit des Esters und der Nutzung des anfallenden Glycerins nur die industrielle Umesterung anzustreben.

Die Erprobung von Methylester von Rapsöl in einem Schlepper im praktischen Einsatz über einen Zeitraum von zunächst einem Jahr ist angelaufen. Weitere Untersuchungen z.B. zur Verträglichkeit mit Motorwerkstoffen, zur Abgaszusammensetzung und zum Abgasgeruch stehen noch aus.

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, R. Möller u. F. Schoedder:* Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 2, S. 40/51.
- [ 2 ] • *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1981.* Hrsg.: Bundesmin. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 25. Jg. (1981), Münster-Hiltrup: Landwirtschafts-Verlag 1981.
- [ 3 ] *Anon.:* Große Ölfruchternte 1982. Landwirtschaftsblatt Weser-Ems Bd. 129 (1982) Nr. 39, S. 4.
- [ 4 ] *Cargill Processing Plant, Riverside, North Dakota;* persönliche Mitteilung, August 1982.
- [ 5 ] *Walter, J., P. Aakre u. J. Derry:* The 1981 "Flower Power" Field Testing Program. Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, August 1982, Fargo, North Dakota, S. 384/93.
- [ 6 ] *Goering, C.E., A.W. Schwab, R.M. Campion u. E.H. Pryde:* Evaluation of soybean oil-aqueous ethanol microemulsions for Diesel engines. Proceedings s. [5], S. 279/86.
- [ 7 ] *Johansson, E. u. O. Nordström:* Swedish tests on rape-seed oil as an alternative to Diesel fuel. Proceedings s. [5], S. 337/46.
- [ 8 ] *Wörgetter, M.:* Pflanzenöl als Traktortreibstoff? Die landtechnische Zeitschrift – dlz Bd. 30 (1979) Nr. 9, S. 1252 u. 1254.
- [ 9 ] *Pischinger, G., F. Clymans u. R. Siekmann:* Diesel-oil substitution by vegetable oils. Abstracts Conference on New Energy Conservation Technologies, Berlin, 6.–10. April 1981, S. 150.
- [ 10 ] *Stutzer, D.:* Traktorenkraftstoff bleibt noch ölabhängig. VDI nachrichten Jg. 35 (1981) Nr. 36, S. 15.
- [ 11 ] DIN 51 361, Teil 2: Prüfung von Schmierstoffen; Prüfung von Motorenschmierölen im MWM-Prüfdieselmotor, Verfahren zur visuellen Beurteilung der Kolbensauberkeit. Berlin/Köln: Beuth-Verlag Juni 1977.
- [ 12 ] *Van der Walt, A.N. u. F.J.C. Hugo:* Attempts to prevent injector coking with sunflower oil by engine modifications and fuel additives. Proceedings s. [5], S. 230/38.

---

## Notizen aus Forschung, Lehre, Industrie und Wirtschaft

---

### Karl Theodor Renius Professor in München

Zum 1. Okt. 1982 wurde Dr.-Ing. *Karl Theodor Renius* als Professor an das Landmaschinen-Institut der Techn. Universität München berufen und tritt damit die Nachfolge von Prof. Dr.-Ing. *Walter Söhne* an, der diesem Institut mehr als 17 Jahre vorgestanden hat.

*K.Th. Renius* wurde am 19.6.1938 bei Berlin geboren, wurde auf einem Bauernhof im Weserbergland groß und studierte nach dem Abitur Maschinenbau an der Techn. Hochschule Braunschweig. Nach dem Vorexamen wählte er die Fachrichtung Landtechnik und nahm später von Prof. Dr.-Ing. *H.J. Matthies* das Angebot einer Assistentenstelle an. Zuvor jedoch arbeitete er, um etwas Industrieerfahrung zu bekommen, 1965/66 als Konstrukteur in der Schleppervorentwicklung von KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG in Köln-Kalk. Hier erhielt er besondere Anregungen auf dem Gebiet der Schleppergetriebe durch seine damaligen Chefs *H. Keienburg* und *M. Hoyer*, woraus sich später die ersten Veröffentlichungen über Schleppergetriebe entwickelten.

*K.Th. Renius* promovierte 1973 mit der Bearbeitung eines Grundsatzaus der Hydraulik: "Untersuchungen zur Reibung zwischen Kolben und Zylinder bei Schrägscheiben-Axialkolbenmaschinen" (VDI-Forschungsheft 561). Auch hierzu war die Anregung aus der Industrie gekommen.

1973 ging er, einem Angebot des damaligen Vorstandes *O. May* folgend, zur KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG zurück und begann im Entwicklungswerk Porz als Leiter der Vorentwicklung Traktoren. In dieser Zeit begann unter Herrn Dr.-Ing. *B. Breuer* die Entwicklung der 1978 eingeführten DX-Traktoren.

1976 nahm *Renius* an der RWTH Aachen bei Herrn Prof. Dr.-Ing. *J. Helling* einen Lehrauftrag über Grundlagen der Traktorenkonstruktion an und konnte über mehrere Jahre zahlreichen Studenten die Gelegenheit geben, ihre Studien- bzw. Diplomarbeiten unter Industriebedingungen im Entwicklungswerk Porz durchzuführen.

Ein weiterer Abschnitt der Industrietätigkeit begann 1979 unter Herrn Dr.-Ing. *G. Welschhof* mit der Übernahme zusätzlicher Aufgaben im Bereich Produktplanung und Projektleitung; insbesondere oblag Dr.-Ing. *Renius* die Verantwortung für die ab Ende 1979 entwickelten neuen Traktoren DX 80, DX 86 und DX 92.

Im Frühjahr 1981 wurde *Renius* zum Hauptabteilungsleiter "Produktbetreuung" ernannt und wurde damit u.a. für die Planung und Abwicklung aller Projekte verantwortlich.