

Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung

Von Wilhelm Batel, Michael Graef, Gerd-Jürgen Mejer,
Rudolf Möller und Frithjof Schoedder,
Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 633.85:620.91

Nachwachsende Rohstoffe sind derzeit als eine Alternative zu den heute meist verwendeten fossilen Energieträgern viel diskutiert. Im Rahmen dieser Diskussion werden mit der folgenden Studie über Pflanzenöle Energie- und Mengenbilanzen für die Produktion von Rapsöl, Produktionsmengen, energetische Eigenschaften und noch zu leistende Entwicklungsschritte für den Einsatz dieses Energieträgers als Dieselmotorkraftstoff zusammengestellt.

Inhalt

1. Einleitung
2. Einige Grundlagen und Bewertungskriterien
3. Produktion von Pflanzenölen
 - 3.1 Herkunft und Eigenschaften von Pflanzenölen
 - 3.2 Die landwirtschaftliche Produktion von Ölpflanzen
 - 3.3 Trennung der Ölsaaten in Futtermittel und Pflanzenöle
 - 3.4 Massen- und Energieströme bei der Gewinnung von Pflanzenölen
4. Die Eignung von Pflanzenölen als Energiequelle, untersucht am Beispiel Kraftstoff für Dieselmotoren
 - 4.1 Eigenschaften von Dieselmotorkraftstoff
 - 4.2 Eigenschaften von Pflanzenölen als Kraftstoff
 - 4.3 Energetische Bewertung von Pflanzenöl als Kraftstoff
 - 4.4 Einsatzprobleme
 - 4.4.1 Auswertung des Schrifttums
 - 4.4.2 Eigene Prüfstandversuche mit Ackerschleppern
5. Bewertung von Pflanzenölen als Energieträger
 - 5.1 Produktionsmengen
 - 5.2 Kosten und Preise
 - 5.3 Entwicklungsaufgaben
 - 5.4 Vergleich von Raps mit anderen Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen
6. Zusammenfassung

1. Einleitung

Durch die Veränderungen in der Energiewirtschaft als Folge der Verknappung und vor allem der Verteuerung fossiler flüssiger Energieträger (Erdöl) gewinnt die Verwendung von Energie aus nachwachsenden Rohstoffen als eine der möglichen Alternativen wieder an Interesse.

*) Prof. Dr.-Ing. W. Batel ist Leiter des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung, Dipl.-Ing. M. Graef, Dipl.-Ing. G.-J. Mejer, Ing. (grad.) R. Möller und Dr. F. Schoedder sind Mitarbeiter in diesem Institut der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.

Bei der Energie aus nachwachsenden Rohstoffen ist zu unterscheiden zwischen Stoffen, die sich für einen direkten Einsatz eignen, wie z.B. Holz als Brennstoff und solchen, die erst nach physikalischer, biologischer oder chemischer Umwandlung geeignete Energieträger liefern. Die wichtigsten bekannten und diskutierten Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen sind Holz, Stroh, Pflanzenöl, Alkohole und Biogas.

Die grundsätzliche Eignung nachwachsender Stoffe als Energiequelle bedarf keiner Überprüfung, da sie vor dem Einsatz der fossilen Energieträger die alleinige Grundlage der Energieversorgung waren. Verändert haben sich seitdem aber die erforderlichen Energiemengen und die Anforderungen an die benötigten Energieträger. Es sind daher, von den zur Zeit vorliegenden Rahmenbedingungen ausgehend, die möglichen Produktionsmengen, die Eignung, die Wirtschaftlichkeit und Entwicklungsmöglichkeiten von Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen von der Herstellung bis zur Anwendung zu prüfen. Aus dem Spektrum der in Frage kommenden Energieträger beschäftigt sich dieser Bericht mit Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren. Im Mittelpunkt stehen die Mengen- und Energiebilanzen bei der Produktion von Raps und der Verarbeitung zu Rapsöl (Stand 1979) sowie die Eignung dieses Öles als Kraftstoff für den Dieselmotor.

Pflanzenöle lassen sich aus landwirtschaftlich erzeugten Rohstoffen durch eine vorwiegend physikalische Behandlung mit vergleichsweise geringem Energieaufwand gewinnen, während Äthanol, Biogas oder Holzgas erst durch biologische oder chemische Umwandlung entstehen und zum Teil einer recht energieaufwendigen Aufbereitung bedürfen.

Die Erzeugung von Ölpflanzen und die Verarbeitung zu Pflanzenöl gründet sich auf eine lange Tradition, so daß für diese Prozesse eine ausgereifte Technologie zur Verfügung steht. Auch über die Eignung von Pflanzenöl als Dieselmotorkraftstoff liegen im Schrifttum Versuchsergebnisse vor. Die aufgrund der aktuellen Energiesituation in den letzten beiden Jahren erschienenen Arbeiten bringen meist keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse.

Die Beantwortung der oben gestellten Frage kann daher im wesentlichen durch Auswerten und Anwenden des vorhandenen Wissens (Schrifttum) erfolgen.

2. Einige Grundlagen und Bewertungskriterien

Energie ist gespeicherte Arbeit oder Arbeitsfähigkeit, d.h. die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Energie wird daher in denselben Maßeinheiten wie die Arbeit gemessen, nach dem verbindlichen internationalen Einheitensystem also in J bzw. dezimalen Teilen oder Vielfachen dieser Einheit.

(Für die unterschiedlichen Formen der Energie gelten daneben als Einheiten der Energie auch alle Produkte aus einer gesetzlichen Krafteinheit und einer gesetzlichen Längeneinheit sowie die Produkte aus einer gesetzlichen Leistungseinheit und einer gesetzlichen Zeiteinheit). Es ist:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm.}$$

Die Relation zur üblichen Einheit elektrischer Energie und der früher gebräuchlichen Energieeinheit ergibt sich aus:

$$1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh} = 239 \text{ kcal.}$$

Grundsätzlich kann man Energie nicht herstellen, sie läßt sich nur umwandeln (einschließlich der Umwandlung von Masse in Energie). Hierbei lassen sich mehrere Bereiche unterscheiden, nämlich:

- die Umwandlung von einem Energieträger in einen anderen, um einen höheren Nutzwert zu erhalten,
- die Freisetzung von Energie aus Energieträgern und
- die Umwandlung der verfügbaren Energieform in die benötigte Energieform.

Bei jeder Umwandlung kann Energie weder entstehen noch verschwinden. Der so begründete Satz von der Erhaltung der Energie bildet die Grundlage von Energiebilanzen, aus denen sich wichtige Bewertungskriterien für Energieprozesse ableiten lassen.

Raum- oder zeitbezogene Energiebilanzen führen zu Energieflußbildern für jeweils betrachtete Systeme. Diese Bilder geben eine sehr anschauliche Übersicht.

Bei den Energieströmen kommt es oft zu Energieumwandlungen und -verzweigungen. Als Maßstab für die Beurteilung derartiger Prozesse (Energieumwandlung und -verzweigung z.B. in Kraftmaschinen) dient allgemein der Wirkungsgrad η . Dieser beschreibt den Nutzeffekt eines Prozesses (z.B. einer Kraftmaschine) und errechnet sich aus der erhaltenen Nutzarbeit oder -energie E_n und der eingesetzten Energie E_1 :

$$\eta = E_n/E_1 \quad (1).$$

Ein so definierter Wirkungsgrad ist nur dann eindeutig, wenn die gewählten Systemgrenzen und die Kriterien für den als Nutzenergie angesehenen Anteil angegeben oder bekannt sind.

Bei der Verknüpfung der Wirkungsgrade von Teilprozessen oder Prozeßstufen zum Gesamtwirkungsgrad eines umfassenderen Prozesses ist in gleicher Weise zu beachten, daß für die verschiedenen Teilprozesse einander entsprechende Systeme verwendet werden und daß die Teilprozesse unmittelbar (d.h. unter Erfassung aller Energieströme) aneinander anschließen.

Für den Wirkungsgrad von Prozessen zur Herstellung von Energieträgern ist neben den Massen m der eingesetzten Stoffe (T_1 Eingangsprodukt; T_2 Ausgangsprodukt) noch der meist unterschiedliche Energieinhalt H (z.B. Heizwert) zu berücksichtigen:

$$\eta = (m_{T_2} H_{T_2}) / (m_{T_1} H_{T_1}) = (m_{T_2} / m_{T_1}) \cdot (H_{T_2} / H_{T_1}) \quad (2),$$

dabei beschreibt

$$A = m_{T_2} / m_{T_1} \quad (3)$$

die Ausbeute.

Der Wirkungsgrad ist immer < 1 und bezieht sich stets auf den gesamten, dem betrachteten System oder Teilsystem zugeführten Energiestrom. Die nicht genutzte Energie, oft als Verlustenergie bezeichnet, wird direkt nicht angegeben. Sie ergibt sich aus dem Differenzbetrag zwischen dem Wert η und dem Wert 1.

In manchen Fällen ist die Größe aller beteiligten Energiemengen weniger wichtig als die Menge der in den Prozeß einzubringenden technischen Energie. Dann ist eine Beschränkung auf diese Energiemengen sinnvoll, und es wird nur eine Teilbilanz aufgestellt.

Eine solche Teilbilanz umfaßt z.B. den relevanten Aufwand (Input) an technischer Energie und den Ertrag (Output) an Energie in nutzbarer Form. Ein guter Maßstab für die Bewertung gleichartiger Prozesse ist das Output/Input-Verhältnis, das bei den hier betrachteten Energieprozessen angibt, wieviel Einheiten nutzbarer Energie mit Hilfe einer Einheit aufgewendeter Energie verfügbar werden. Als Verhältniszahl gibt diese Kenngröße nur in Verbindung mit einer Mengenangabe eine ausreichende Information über einen Prozeß.

Eine weitere Kenngröße ist die Differenz Output minus Input, die hier als Netto-Energieertrag bezeichnet wird. Sie gibt an, welche Energie aus dem Prozeß verfügbar bleibt, wenn der relevante energetische Aufwand vom Energieertrag abgezogen wird. Ist der Output größer als der Input, so erhält man einen positiven Netto-Energieertrag, im umgekehrten Fall einen negativen. Auch bei negativem Netto-Energieertrag kann ein Prozeß sinnvoll sein, wenn dabei ein Energieträger mit höherem Nutzwert entsteht.

Zur Bewertung von Energie sind weiter die Energieform und die Energiedichte von Bedeutung. Die Energieform läßt sich nur verbal beschreiben. Eine Bewertung ist letztlich nur in Verbindung mit der Nutzenanwendung möglich. In gewisser Beziehung zur Energieform steht die Energiedichte oder der Energieinhalt.

Im allgemeinen wird Energie aus Energieträgern durch Verbrennung freigesetzt. Dann fällt sie als thermische Energie an. Man charakterisiert daher diese Energieträger durch den spezifischen Brennwert H_o . Er ist die Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung eines Energieträgers (Brennstoff) je Masseneinheit verfügbar wird. Die Temperatur der Stoffe vor und nach der Verbrennung wird mit 25 °C angesetzt. Von einem spezifischen Heizwert H_u spricht man dann, wenn das im Brennstoff vorhandene und das bei der Verbrennung entstehende Wasser nach der Verbrennung im dampfförmigen Zustand bei 25 °C vorliegen [1]. Der spez. Heizwert H_u ist also um die Verdampfungswärme der entsprechenden Wassermenge kleiner als der spez. Brennwert H_o .

Fazit:

Energie läßt sich nicht durch eine oder einige Maßzahlen bewerten, ohne gleichzeitig den jeweiligen Verwendungszweck zu berücksichtigen.

Zur Bewertung von Energieprozessen ist ein Spektrum von Kriterien heranzuziehen wie die Massen- und Energiebilanzen, die Energieflußbilder, die Energieformen, die Energiedichten, die Ausbeuten, Wirkungsgrade, Output/Input-Verhältnisse und der Verwendungszweck. Hierauf aufbauend lassen sich ökonomische Überlegungen anstellen, wobei die Kosten und Preise bestimmende Kriterien sind.

3. Produktion von Pflanzenölen

3.1 Herkunft und Eigenschaften von Pflanzenölen

Pflanzliche Öle sind Mischungen aus Glyceriden und Lipoiden. Die überwiegenden Glyceride (ca. 97 %) sind die Glycerinester meist gradzahliger unverzweigter Fettsäuren. Sie sind für den menschlichen Körper verdaulich und werden daher vorwiegend in der menschlichen Ernährung als Speiseöl oder nach Verarbeitung auch als Speisefette verwendet. Als industrielle Rohstoffe werden sie u.a. zur Herstellung von Lacken, Farben und Seifen verarbeitet.

Je nachdem, ob sie bei der Temperatur von 20 °C fest oder flüssig sind, spricht man von einem "Fett" oder einem "Öl". Die Temperatur des Erstarrungspunktes und die Viskosität nehmen mit der Kettenlänge der Fettsäuren zu und mit der Zahl der Doppelbindungen (ungesättigte Fettsäuren) ab. Diese Einflüsse überlagern sich häufig innerhalb eines Fettmoleküls. Naturbelassene Pflanzenöle enthalten stets eine Reihe von Begleitstoffen (Lipoide) z.B. freie Fettsäuren, Phosphatide, Sterine, Kohlenwasser-, Farb-, Geruchs- und Geschmacksstoffe, Wachse und Vitamine. Pflanzliche Öle besitzen einen spez. Brennwert von etwa $H_o = 40000 \text{ kJ/kg}$ und physikalische Stoffeigenschaften, die denen von Heizöl und Dieselmotortreibstoff ähnlich sind. Sie sind daher für einen entsprechenden Einsatz im Grundsatz geeignet, wie später noch eingehend zu zeigen ist.

Pflanzen, die in wirtschaftlich nutzbarem Umfang Öl bilden, werden als Ölpflanzen bezeichnet. Im gemäßigten Klima sind dies vor allem die Kreuzblütler, wie Raps, Rübsen, Senf und Ölrettich. Daneben sind zu nennen Flachs, Hanf, Mohn und Sonnenblumen. Ölpflanzen der tropischen und subtropischen Gebiete sind Ölbaum, Ölpalme, Kokospalme, Erdnuß, Baumwolle, Soja, Rizinus,

Ölsaart	Trockensubstanz	Öl einschließlich Fettbegleitstoffe	Eiweiß	Kohlehydrate	Rohfaser
Rapssaart	92	42	21	19	6
Sonnenblumenkerne	92	26	15	19	27
Leinsamen	88	31	23	21	7
Sojabohnen	88	17	33	26	7
Erdnußkerne	95	47	26	16	3
Baumwollsaat	89	14	19	29	23

Tafel 1. Wichtige Bestandteile von Ölsaaten, Mittelwerte der Massenanteile in % [2].

Kakaobaum u.a. Über den Gehalt einiger Ölf Früchte an Trockensubstanz, Öl, Eiweiß, Kohlenhydrate und Rohfaser gibt die **Tafel 1** Auskunft.

Bei der Produktion von pflanzlichen Ölen sind drei Stufen zu unterscheiden:

1. die Produktion der Ölf Früchte, vorwiegend im landwirtschaftlichen Anbau,
2. die Gewinnung des Öles in den Ölmühlen, wo eine Auftrennung der Ölf Früchte in die Komponenten Öl und Ölkuchen erfolgt,
3. die Raffination, bei der aus dem Öl unerwünschte Begleitstoffe entfernt werden.

3.2 Die landwirtschaftliche Produktion von Ölpflanzen

Die Erzeugung von Pflanzenölen [3, 4] für den Verzehr ist schon für die Steinzeit belegt. Des weiteren bildete Pflanzenöl vor der Verwendung der Erdölprodukte für viele technische Zwecke (Schmiermittel, Farben, Beleuchtung) eine wichtige Basis. Die ölhaltigen Pflanzensamen werden zum Teil nach der Reinigung ganz verwendet (Mohn, Leinsamen). Meist wird aber Öl durch Pressen und Extraktion gewonnen und in reiner bzw. weiter verarbeiteter Form genutzt. In den Samen der Ölpflanzen sind die Reservestoffe überwiegend in Form hochmolekularer Fette eingelagert. Daneben ist noch ein beträchtlicher Eiweißgehalt gegeben, so daß die Nebenprodukte der Ölgewinnung wichtige Eiweißfuttermittel darstellen.

Die leistungsfähigsten Ölpflanzen im europäischen Anbau sind Raps, Rüben und Sonnenblumen, in der Bundesrepublik Deutschland ist nur der Anbau von Raps von Bedeutung.

Raps wird ganz überwiegend als Winterraps angebaut. Die Saat im August und die Ernte Juni/Juli liegen jeweils vor den Terminen der frühesten Getreidearten. Raps hat ein sehr kleines Korn (Tausendkornmasse 3,5–7 g [4]), er verlangt daher eine gute Saatbettvorbereitung und liefert bei einer Aussaatstärke von etwa 10 kg/ha und einer Durchschnittsernte von 27,3 dt/ha [5] eine sehr hohe Reproduktion von 273, verglichen mit Getreide von etwa 35. Rapskulturen sind durch tierische Schädlinge stark gefährdet, so daß Pflanzenschutzmaßnahmen für die Sicherung der Ernteerträge große Bedeutung haben. Da die Ausreife der Schoten an Haupt- und Nebensprossen unterschiedlich ist, wird im allgemeinen der Raps zunächst zum gleichmäßigen Nachreifen ins Schwad gemäht und später aus dem Schwad gedroschen.

Statistische Werte zum Rapsanbau in der Bundesrepublik für das Jahr 1978 sind in **Tafel 2** zusammengestellt.

Die **Tafel** weist einen wesentlichen Teil der jährlichen Erntemenge als Eigenverbrauch der Landwirtschaft aus. Entsprechend der Anbaufläche und der üblichen Aussaatstärke (10 kg/ha) dürfte der Eigenverbrauch zum kleineren Anteil (≈ 1500 t) als Saatgut für den Körnerapsanbau, zum größeren Teil (≈ 80000 t) als Saatgut für den Zwischenfruchtanbau eingesetzt werden.

Die im Körnerapsanbau einzusetzenden Aufwendungen, gekennzeichnet durch Düngermengen und Energieäquivalente für Düngung, Anbau, Pflege und Ernte sind in **Tafel 3** aufgeführt.

Die Durchschnittsernte an Rapskorn wird für die Ernte 1978 im Statistischen Jahrbuch 1979 mit 27,3 dt/ha angegeben. Dazu fällt eine Rapsstrohernte von etwa 47 dt/ha an [6]. Das Energieäquivalent der Gesamternte ergibt sich aus der stofflichen Zusammensetzung und den zugehörigen Werten der spez. Energie, **Tafel 4**.

1. Landw. genutzte Fläche insgesamt	13 176 000	ha
2. Ackerfläche insgesamt	7 506 000	ha
3. Anbaufläche für Ölf Früchte (Raps und Rüben)	121 000	ha
das ist als Anteil der Ackerfläche	1,6	%
als Anteil der landw. genutzten Fläche	0,9	%
4. Durchschnittsertrag an Ölsaart	27,3	dt/ha
5. Gesamte Erntemenge	330 000	t
6. Verwendbare Erzeugung	249 000	t
7. Eigenverbrauch der Landwirtschaft	81 000	t

Tafel 2. Rapsanbau in der Bundesrepublik Deutschland 1978 [5].

Düngeraufwand	Mengen	Energieäquivalente
N	140 kg/ha	11,20 GJ/ha
K ₂ O	120 kg/ha	1,08 GJ/ha
P ₂ O ₅	60 kg/ha	0,84 GJ/ha
		13,12 GJ/ha
Saatgut	10 kg/ha	0,14 GJ/ha
Pflanzenschutz		
3 Behandlungsgänge jeweils aktive Substanz; einschl. Energieaufwendungen für Schlepper, Spritzaggregat	1 kg/ha	0,79 GJ/ha
Kraftstoffverbrauch		
Bestellung, Ernte, Ernteaufbereitung, Trocknung, Stoppelbearbeitung, Grundbodenbearbeitung		4,00 GJ/ha
Energieäquivalent für Maschinen und Gerätenutzung, auch Gebäude		2,00 GJ/ha
Summe der Aufwendungen entspr. 534 l/ha Dieseldieselkraftstoff		20,05 GJ/ha

Tafel 3. Aufwendungen für den Rapsanbau [6 bis 9].

Rapskorn			
	Massenanteil	spez. Energie	Produkt Massenanteil x spez. Energie
	%	MJ/kg	
Rohfett	40,0	39,06	15,624
Roheiweiß	22,5	19,06	4,289
Rohfaser	5,9	15,96	0,942
N-freie Extraktst.	20,2	17,64	3,653
Spez. Energie des Rapskorns			24,508 MJ/kg
Rapsstroh			
Rohfett	1,2	39,06	0,469
Roheiweiß	2,5	19,06	0,477
Rohfaser	37,8	15,96	6,033
N-freie Extraktst.	38,7	17,64	6,827
Spez. Energie des Rapsstrohs			13,806 MJ/kg
Summe der Energie in der Erntemenge von 1 ha 2,73 t Rapskorn (entspr. 1780 l/ha Dieselkraftstoff)			66,91 GJ/ha
4,7 t Rapsstroh (entspr. 1726 l/ha Dieselkraftstoff)			64,89 GJ/ha
Summe entspr. 3506 l/ha Dieselkraftstoff			131,80 GJ/ha

Tafel 4. Zusammensetzung und spez. Energie von Rapskorn und Rapsstroh.

Die Tafel macht deutlich, daß die spez. Energien von Rapskorn (Rapssaat) und Rapsstroh zwar recht unterschiedlich sind, daß aber wegen der größeren Erntemenge an Rapsstroh die auf die Anbaufläche bezogenen Energien in Stroh und Korn nahezu gleich groß sind. Die Energie im Stroh wird bisher nicht direkt genutzt, da das Stroh für Futterzwecke ungeeignet ist und auch geeignete Verbrennungsanlagen fehlen.

Wird die Energie der gesamten Ernte (Summe in Tafel 4) auf den Energieaufwand (Summe in Tafel 3) bezogen, so ergibt sich ein Output/Input-Verhältnis $131,80/20,05 = 6,57/1$. Für den bisher nur genutzten Anteil der Energie im Rapskorn ergibt sich ein Verhältnis $66,91/20,05 = 3,34/1$.

3.3 Trennung der Ölsaaten in Futtermittel und Pflanzenöle

Ziel der Behandlung der Ölsaaten in der Ölmühle ist die Abtrennung der pflanzlichen Öle. Man erhält dabei als Produkte die festen Anteile mit hohem Eiweißgehalt, diese Schrote sind wertvolle Futtermittel, und das Öl.

Um den Austritt des Öles aus dem Gewebe der Ölsaat zu erleichtern, müssen das Gewebe und möglichst auch die Zellen aufgeschlossen werden. Die Zerkleinerung erfolgt mit Walzenstühlen. Aus den so vorbereiteten Rohstoffen gewinnt man Öl durch Pressen und/oder Extrahieren. Wird nur gepreßt, so verbleibt im Kuchen ein Restölgehalt von 4–10 %. Durch Extrahieren läßt sich das Öl bis auf einen Restölgehalt von etwa 0,5 % gewinnen. Der Extraktionsprozeß besteht aus der eigentlichen Extraktion mittels Benzinfractionen (Hexan), der destillativen Aufbereitung der Fettlösung im Vakuum und der Wiedergewinnung des Lösungsmittels [10].

Rohstoffe mit hohem Ölgehalt wie Rapssaat und Sonnenblumenkerne werden meist vorgepreßt und dann extrahiert. Bei Früchten wie Sojabohnen mit nur etwa 20 % Ölgehalt verzichtet man in der Regel auf das Vorpresse. Der Energieaufwand für das Trennen der Rapssaat in Rapskuchen und rohes Rapsöl beträgt einschließlich des Energieäquivalentes für Investitionen 0,75–1,25 GJ/t Saat.

Rohes, unbehandeltes Pflanzenöl, wie es durch Pressen und Extraktion anfällt, enthält neben dem Neutralfett (Triglyceride) noch eine Reihe von Fettbegleitstoffen (Lipoide). Diejenigen Fettbegleitstoffe, die für die vorgesehene Verwendung des Öles störend sind, werden durch eine Raffination entfernt.

Energetisch von Bedeutung sind bei der Raffination die Ausbeuten, gekennzeichnet durch die Menge der entfernten Begleitstoffe und den Verlust an Neutralfett, sowie der Energiebedarf, vorwiegend in Form von Dampf, aber auch als elektrische Energie im Prozeß selbst und für das Fördern und Reinigen des Kühlwassers. Die Raffination erfolgt stufenweise, **Tafel 5**.

Raffinationsstufe	entf. Fettbegleitst.		Verlust an Neutralfett %	Energiebedarf bez. auf Ölmasse GJ/t
	Art	Menge %		
Entschleimung	Phosphatide (Lecithin) Schleim- und Trübstoffe	1	1	0,4
Entsäuerung	freie Fettsäuren	1	1	
Bleichung	Farbstoffe	0,1	1	
Desodorierung (Dämpfen)	Geruchs- und Geschmacksstoffe	0,1	0,2	1,3

Tafel 5. Richtwerte bei der Vollraffination von Rapsöl für die Verwendung als Nahrungsmittel [11, 12].

Ein großer Teil der Phosphatide, Schleim- und Trübstoffe quillt mit Wasser oder Wasserdampf und wird dabei öln unlöslich. Sie führen zu Trübung und Bodensatz (Gefahr des Verstopfens von Filtern) und fördern als gute Nährböden die mikrobielle Zersetzung des Öles.

Die freien Fettsäuren erniedrigen Flammpunkt und Viskosität des Öles. Sie sind z.B. gegenüber Eisen korrosiv. Die Farb-, Geruchs- und Geschmacksstoffe fallen mengenmäßig nicht ins Gewicht, sind aber für die Verwendung als Speiseöl oder -fett störend und müssen durch die Raffinationsstufen Bleichen (z.B. mit Bleicherde) und Desodorieren (meist durch Vakuum-Schleppdestillation mit Wasserdampf) entfernt werden. Da das Bleichen und Desodorieren energie- und kostenaufwendig ist, bleibt zu prüfen, ob diese Stoffe auch bei der Verwendung der Pflanzenöle als Kraftstoff störend sind. Technisch und organisatorisch ist eine Teilraffination und damit eine Steigerung der Ausbeute und eine Verminderung des Energieeinsatzes ohne Schwierigkeiten möglich.

Die Daten in Tafel 5 sind nur Richtwerte zur Kennzeichnung der Größenordnung, da einerseits der Gehalt an Fettbegleitstoffen im rohen Öl unterschiedlich ist, **Tafel 6**, und andererseits Ausbeute und Energiebedarf vom Verfahren abhängen.

	Phosphatide ¹⁾	Freie Fettsäuren ²⁾
Rüböl	0,8	0,6–0,8
Sonnenblumenöl	bis 1,5	3,0–7,5
Leinöl	0,3	1,0–1,9
Sojaöl	1,1–3,2	0,9–2,8
Erdnußöl	0,3–0,4	2,0–6,0
Baumwollsaatöl	0,7–0,9	bis 8,8

1) nach Thomas [13] 2) nach Lüde [14]

Tafel 6. Gehalt roher Pflanzenöle an Phosphatiden und freien Fettsäuren in %.

3.4 Massen- und Energieströme bei der Gewinnung von Pflanzenölen

Die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 genannten Daten für die landwirtschaftliche Erzeugung von Raps und die Verarbeitung von Rapssaat ergeben das Massendiagramm in Bild 1 und das in Bild 2 dargestellte Energieflußbild, in dem auch die jeweiligen Stoffmengen eingetragen sind.

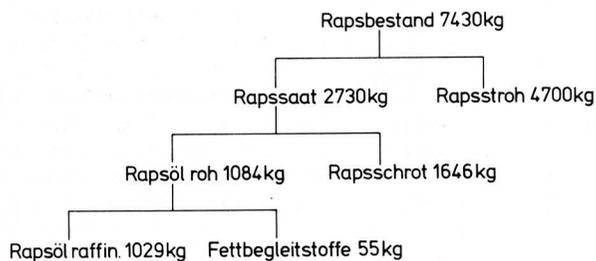


Bild 1. Stammbaum (Massenflußbild für 1 ha) für die Herstellung raffinierten Rapsöls.

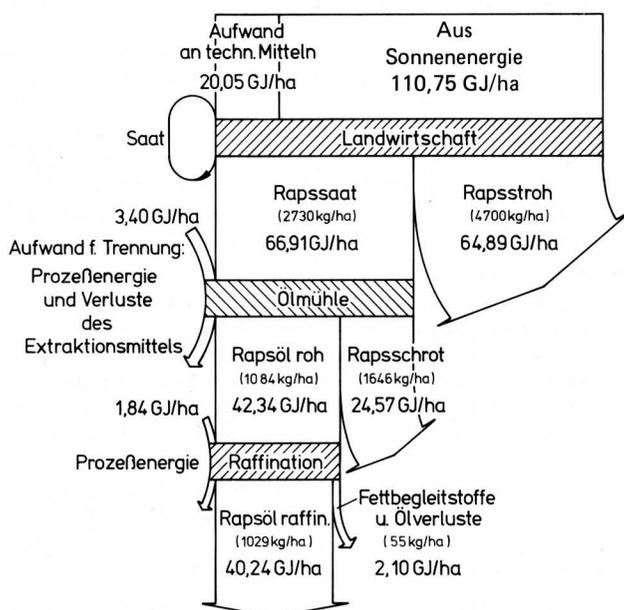


Bild 2. Energieflußbild für die Erzeugung von Rapsöl.

Für 1029 kg/ha raffiniertes Öl ist eine Rapserte von 7430 kg/ha auf dem Felde zu bearbeiten. Während die Hauptmasse mit 4700 kg/ha Rapsstroh zerkleinert auf dem Feld bleibt, gehen 2730 kg/ha in die weitere Verarbeitung, Trocknung und Lagerung. Die von der Flächeneinheit geerntete Menge an Rapssaat ist deutlich kleiner als beispielsweise bei Weizen, doch ist der Energieinhalt der Körnerernte von Weizen und Raps nahezu gleich, die in den Körnern enthaltene Eiweißmenge ist bei Raps größer. Auch bei der Verarbeitung der Rapssaat in der Ölmühle geht der größere Anteil als Eiweißschrot in die landwirtschaftliche Erzeugung zurück, der kleinere Massenanteil, der bezüglich des Energieinhaltes jedoch etwa 2/3 ausmacht, wird in der Raffination weiter aufgearbeitet, wobei noch einmal etwa 5 % der Masse in Form von Fettbegleitstoffen abgeschieden werden.

Betrachtet man die erste Stufe im Energieflußbild, Bild 2, so erscheinen die Energieaufwendungen für die in der landwirtschaftlichen Produktion eingesetzten Betriebsmittel, gemessen an der gesamten Ernte von Rapssaat und Rapsstroh, vergleichsweise klein. In dieser ersten Stufe ist das Verhältnis Energie der Ernte zu technischem Input $131,8/20,05 = 6,57/1$.

Wie im Abschnitt 3.2 dargestellt, wird das Rapsstroh bisher zur Energiegewinnung nicht genutzt. Es ist daher nicht sinnvoll, die Energiemenge der gesamten Ernte mit der hochwertigen zur Produktion eingesetzten Energie in Beziehung zu setzen. Wird die in der Rapssaat vorhandene, nutzbare Energie auf die aufgewendete Energie bezogen, dann ergibt sich ein Verhältnis $66,91/20,05 = 3,34/1$.

Für die Trennung der Rapssaat in Rapsöl und Rapsschrot wird eine Energiemenge von 3,4 GJ/ha aufgewendet, die zum Erwärmen der Rapssaat, zum mechanischen Aufschluß, zum Abpressen und zum Betreiben der Extraktionsanlage nötig ist und das Energieäquivalent für die Investitionen enthält, sich aber im Energieinhalt der Trennungserzeugnisse nicht wiederfindet und daher als Verlust angesehen werden muß. Unter Einbeziehung dieser Energiemenge ergibt sich damit an dieser Stelle ein Input von 23,45 GJ/ha. Wenn diese eingesetzte Energie auf die Produkte rohes Rapsöl und Rapsschrot entsprechend ihrem Energieinhalt aufgeteilt wird, ergibt sich für beide Produkte das gleiche Output/Input-Verhältnis 2,85/1.

Das rohe Rapsöl wird, wie unter 3.3 geschildert, für die vorgesehene Verwendung raffiniert. Während die hierzu notwendige Prozessenergie als Verlust anzusehen ist, können die Fettbegleitstoffe und das mitgehende Neutralfett zum größten Teil technisch weiterverwendet werden, sind also energetisch nicht als Verluste zu betrachten. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich ein Output/Input-Verhältnis 2,54/1.

Bei dem errechneten Output/Input-Verhältnis von 2,54/1 ergibt sich mit dem Output von 40,24 GJ/ha nach Bild 2 ein Netto-Energieertrag von 24,40 GJ/ha ($= 40,24 \text{ GJ/ha} \cdot 1,54/2,54$). Es ist dies die Energiemenge, die verbleibt, wenn die gesamte in der Produktion eingesetzte Energie (einschließlich der Energieäquivalente für Maschinen und Gebäude) durch den erzeugten Energieträger selbst abzudecken ist. Das ist insoweit ein theoretischer Grenzfall, als in der Produktion nicht nur Energie in einer so hochwertigen Form wie Rapsöl eingesetzt werden muß.

Wie sich das energetische Output/Input-Verhältnis verbessern läßt, ist aus einer Analyse der einzelnen Stoff- und Energieströme abzuleiten. Eine entsprechende Aufteilung der in der landwirtschaftlichen Produktion von Raps eingesetzten Energie wurde in Tafel 3 gegeben. Danach stellt das Energieäquivalent für den eingesetzten Minereraldünger den größten Posten unter den Aufwendungen. Betrachtet man die Düngergabe in erster Linie als Ersatz für den Nährstoffzug durch die Erntemasse, dann ist durch eine Steigerung des flächenbezogenen Ertrages kein günstigeres Output/Input-Verhältnis zu erreichen, wenn nicht durch züchterische oder andere Maßnahmen der Bedarf an Nährstoffen für die Produktion der Masseneinheit Rapskorn herabgesetzt wird.

Die weiteren Energieaufwendungen in der Stufe der Landwirtschaft sind (mit Ausnahme des Transports und der Trocknung)

nicht von der Masse abhängig, hier würde ein höherer Flächenertrag zu einem günstigeren Output/Input-Verhältnis führen.

Die in der gewerblichen Stufe anfallenden Energieaufwendungen sind wiederum eindeutig der Masse proportional, eine Erhöhung des flächenbezogenen Ertrages wirkt sich nicht in einem besseren Output/Input-Verhältnis aus. Die hier angegebenen Werte für den Energieaufwand entsprechen aber älteren Anlagen, die nach heutigem Stand eine Verbesserung in energetischer Hinsicht zulassen. Denkt man an den Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff, dann ist auch zu klären, ob die im Energieflußbild wiedergegebene volle Raffination des Rapsöls notwendig ist oder ob in der zweiten Stufe der gewerblichen Bearbeitung ein Verfahren eingesetzt werden kann, das bezüglich der Energie und der Stoffverluste günstiger ist.

Die vorstehende Analyse zeigt, daß eine **grundlegende Verbesserung im Output/Input-Verhältnis der relevanten Energien** nur zu erwarten ist, wenn die Ansprüche der Rapspflanze an die Düngung herabgesetzt werden, wobei darauf zu achten ist, daß sich die Eigenschaften des Rapschrotes nicht nachteilig verändern. **Kleinere Verbesserungen** im Output/Input-Verhältnis lassen sich verhältnismäßig leicht durch Verbesserungen in den einzelnen Produktionsabschnitten Landwirtschaft, Ölmühle, Raffination realisieren.

Aus Bild 2 läßt sich auch ableiten: einem Aufwand an technischer Energie von 25,29 GJ/ha steht in den hochwertigen nutzbaren Produkten Öl und Schrot ein Ertrag von 66,91 GJ/ha gegenüber. Das bedeutet, daß nach Abzug aller Aufwendungen und Verluste (25,29 GJ/ha unter den hier zugrunde gelegten Bedingungen) ein Netto-Energieertrag von 41,62 GJ/ha aus Sonnenenergie, entsprechend einem Brennwert von 1100 l Dieselkraftstoff/ha, in technisch nutzbarer hochwertiger Form gewonnen wird. Höhere Flächenerträge ändern, wie zuvor gezeigt, das Output/Input-Verhältnis kaum. Bei positivem Netto-Energieertrag (Output - Input) und unverändertem Output/Input-Verhältnis wächst aber die von der Flächeneinheit verfügbare Energiemenge (Rapsöl und Schrot) linear mit den Erträgen. Deshalb ist die Steigerung der Erträge und damit die effizientere Nutzung der Sonnenenergie ein zentrales Anliegen.

4. Die Eignung von Pflanzenölen als Energiequelle, untersucht am Beispiel Kraftstoff für Dieselmotoren

4.1 Eigenschaften von Dieselkraftstoff

Um eine gleichbleibende Qualität für den Verbraucher von Dieselkraftstoff und Schmierölen zu gewährleisten, sind diese im Hinblick auf ihren Verwendungszweck standardisiert. Diese Öle müssen ferner bestimmte Eigenschaften aufweisen, die durch entsprechende Kennwerte prüfbar sind.

Wichtig in dieser Hinsicht sind chemische Zusammensetzung (Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Aschegehalt), Siedeverhalten (bzw. Flüchtigkeit), brenntechnische Eigenschaften (Heizwerte, Zündwilligkeit, Rauch-, Flamm- und Brennpunkt), Lagerfähigkeit, Mischbarkeit, Dichte, Viskosität, Schmierverhalten [15, 16, 17].

Die Mindestanforderungen an den Dieselkraftstoff für schnellaufende Motoren, wie sie heute in Ackerschleppern und Landmaschinen verwendet werden, lassen sich aus entsprechenden Richtlinien entnehmen [18], Werte letzte Spalte in Tafel 7. In den Richtlinien sind Kennwerte für die Eigenschaften von Dieselkraftstoff im Hinblick auf Förderung, Dosierung, Erzeugung mechanischer Energie durch Verbrennung, Rückstandsbildung im Motor und Korrosion angegeben.

4.2 Eigenschaften von Pflanzenölen als Kraftstoff

Ein Einsatz von Pflanzenölen an Stelle von Dieselkraftstoff in den heutigen, schnellaufenden Dieselmotoren [20] ohne Beschädigung von Triebwerksteilen auch bei Langzeitverwendung [15] ist dann möglich, wenn die wesentlichen Eigenschaften der Pflanzenöle denen von Dieselkraftstoff, wie in den entsprechenden Richtlinien [18] vorgegeben, entsprechen. Es ist auch möglich, die Eigenschaften der Pflanzenöle für die Verwendung als Kraftstoff in Dieselmotoren beispielsweise durch Mischen mit Dieselkraftstoff, mit Benzin oder mit Alkohol [21, 22], durch Additive [23] oder entsprechende Aufbereitung zu verbessern. Dies sind Maßnahmen zur Anpassung des Kraftstoffes an den Motor [24].

		Rüböl	Sonnenblumenöl	Leinöl	Sojaöl	Olivenöl	Erdnußöl	Baumwollsaatöl	Dieselmotorkraftstoff ⁴⁾
Dichte (15 °C) ¹⁾	g/cm ³	0,910÷0,917	0,920÷0,927	0,930÷0,935	0,922÷0,934	0,914÷0,925	0,911÷0,925	0,917÷0,931	0,815÷0,855
Flammpunkt ¹⁾	°C	317	316	—	330	—	290÷333	318÷322	> 55
Erstarrungspunkt bzw. Trübungspunkt ^{2),3)}	°C	0÷-2	-16÷-18	-18÷-27	-8÷-18	0÷-9	-2÷3	0÷4	0÷-12 ⁵⁾
Kin. Viskosität ¹⁾ (20 °C)	10 ⁻⁶ $\frac{m^2}{s}$	97,7	65,8	51	63,5	83,8	84,3	89,4 ²⁾	2÷8
Jodzahl (JZ) ²⁾		100 (94÷106)	132 (113÷143)	186 (169÷196)	134 (117÷141)	84 (79÷90)	89 (84÷95)	108 (100÷120)	—
Verseifungszahl (VZ) ²⁾		174 (168÷180)	190 (186÷194)	192 (188÷196)	192 (189÷195)	190 (185÷196)	190 (184÷195)	195 (191÷199)	—
Brennwert ¹⁾	kJ/kg	40560	39813	39510	39728	40014	39993	39722	45000 ± 600

1) Kennwerte nach Thomas [13]

2) Kennwerte nach Pardun [19]

3) Kennwerte nach Zerbe [17]

4) Kennwerte nach DIN 51601 [18]

5) Grenze der Filtrierbarkeit nach DIN 51601

Tafel 7. Physikalisch-chemische Kennwerte einiger Pflanzenöle, Kennwerte von Dieselkraftstoff zum Vergleich.

Auch eine Anpassung des Motors an den Kraftstoff Pflanzenöl ist denkbar durch Entwicklung von Motoren, die auf die Eigenschaften von Pflanzenölen ausgelegt sind [25], wie dies die Entwicklung von Motoren für Mittel- und Schwerölestillate [26, 27] oder auch von Vielstoffmotoren gezeigt hat [27, 28, 29].

Einige Eigenschaften von Pflanzenölen im Vergleich mit Dieselmotoren zeigt Tafel 7, siehe dazu auch [30], wobei besonders die höhere kinematische Viskosität der Pflanzenöle Fragen hinsichtlich der guten Zerstäubung [31] und Förderung stellt. In der Tafel werden einige Kennwerte von Rüböl (Sammelbezeichnung für Öl aus Raps und Rübsen), Sonnenblumenöl, Leinöl, Sojaöl, Olivenöl, Erdnußöl, Baumwollsaatöl und Dieselmotoren verglichen.

4.3 Energetische Bewertung von Pflanzenöl als Kraftstoff

Für die energetische Bewertung von Pflanzenölen als Kraftstoff ist der Energieinhalt des Kraftstoffes maßgebend. Kennwerte dafür sind der spezifische Brennwert und der spezifische Heizwert. Der spezifische Brennwert von Ölen und Fetten läßt sich nach Thomas [13] annähernd durch folgende Gleichung errechnen:

$$H_o = 47645 - 4,1868 \cdot JZ - 38,31 \cdot VZ \quad \text{kJ/kg} \quad (4).$$

Z.B. ergibt sich für Rüböl mit einer mittleren Jodzahl JZ = 100 und einer mittl. Verseifungszahl VZ = 174 ein spez. Brennwert

$$H_o = 40560 \quad \text{kJ/kg.}$$

Bei Verwendung als Motorkraftstoff ist der spez. Heizwert maßgebend, der bei Pflanzenölen und Dieselmotoren etwa 5 % niedriger als der spez. Brennwert ist.

Der spez. Heizwert H_u für Pflanzenöle liegt etwa bei

$$H_u = 38000 \quad \text{kJ/kg}$$

und damit etwa 10 % unter dem spez. Heizwert von Dieselmotoren.

Für die energetische Bewertung von Pflanzenölen in Dieselmotoren sind neben dem spez. Heizwert auch weitere Eigenschaften wichtig, wie Dichte, Siedeverhalten, Rauch-, Flamm- und Brennpunkt, Viskosität und Selbstzündungseigenschaften (Zündtemperatur, Zündverzögerung).

Die Dichte für Dieselmotoren beträgt bei 15 °C

$$\rho_{DK} = 0,815 - 0,855 \quad \text{kg/l} \quad \text{nach DIN 51757 [32].}$$

Für Pflanzenöle liegt sie entsprechend Tafel 7 merklich höher. Dies ist bei vergleichenden Betrachtungen zu beachten. Der durch die Einspritzpumpe geförderte Strom von Pflanzenöl stellt einen Energiestrom dar, der proportional der Motorleistung ist. Für ihn gilt:

$$P = \dot{m} H_u = \dot{V} \rho H_u \quad (5).$$

Da die Einspritzpumpe volumetrisch dosiert, wäre bei sonst gleichen Bedingungen das Verhältnis der Energieströme bzw. Leistungen bei z.B. Rüböl (PÖ) und Dieselmotoren (DK):

$$\frac{P_{PÖ}}{P_{DK}} = \frac{\dot{V}_{PÖ} \rho_{PÖ} H_{uPÖ}}{\dot{V}_{DK} \rho_{DK} H_{uDK}} = 0,992 \frac{\dot{V}_{PÖ}}{\dot{V}_{DK}} \quad (6).$$

Dies bedeutet einen Unterschied in der Leistung, der kleiner als 1 % ist, gleiche Volumenströme für Pflanzenöl $\dot{V}_{PÖ}$ bzw. Dieselmotoren \dot{V}_{DK} vorausgesetzt. Die aus Messungen bekannten über 1 % liegenden Minderungen in der Motorleistung [33, 34, 35] weisen darauf hin, daß gewisse Unterschiede im Verbrennungsverhalten und dem Dosier- und Einspritzverhalten möglich sind (vgl. dazu eigene Versuche, Abschn. 4.4.2).

4.4 Einsatzprobleme

4.4.1 Auswertung des Schrifttums

Ergebnisse von Versuchen mit Pflanzenölen in Dieselmotoren (Vorkammermotoren und Motoren mit Direkteinspritzung) liegen im Schrifttum recht zahlreich vor. Sowohl über den Einsatz von Sojaöl [20, 33, 34, 36], Baumwollsaatöl [20, 33], Erdnuß- [30, 33, 37], Kokosnuß-, Indischem Sesamöl und Pongamia glabra [30] als auch von Lein-, Sonnenblumen- [34, 36, 38] und Rapsöl [34, 35, 36, 39] wird berichtet.

Die bisher beim Einsatz von Pflanzenölen in Dieselmotoren gewonnenen Erkenntnisse zeigen außer der Minderung der Motorleistung auch Probleme bei der Förderung, Dosierung und Verbrennung auf. Besonders bei trocknenden Ölen wie z.B. Leinöl machen sich Verharzungen und Verlackungen in Kraftstofftank, -leitungen und Einspritzpumpe stark bemerkbar [34]. Verkokung der Einspritzdüsen kann infolge mangelnder thermischer Stabilität des Kraftstoffes, aber auch infolge einer zu hohen Viskosität des Kraftstoffes auftreten [17].

Durch Mischen der Pflanzenöle mit Kraftstoffen geringer Viskosität ist eine Verbesserung möglich [34, 38]. Ebenso ist ein Absenken der Viskosität der Pflanzenöle durch Vorwärmen erreichbar [36, 38]. Auch über Rückstandsbildung und Anlagerungen an Ventilen, Kolbenringen und im Motorbrennraum wird berichtet, jedoch streuen die aus Prüfstand- und Praxisversuchen mit verschiedenen Motoren und Pflanzenölen erhaltenen Aussagen beträchtlich [21, 33, 34 bis 37]. Die Frage, ob Pflanzenöle in den heute vorliegenden Qualitäten auch bei langfristigem Einsatz in Dieselmotoren ohne wesentliche konstruktive Änderungen verwendbar sind oder ob sie noch weiter gezielt aufbereitet werden müssen, sollte daher noch durch entsprechende Langzeiterprobungen im Versuch und in der Praxis geklärt werden. Dabei bedürfen auch Fragen der Abgaszusammensetzung [29, 35] noch der Klärung.

4.4.2 Eigene Prüfstandversuche mit Ackerschleppern

Um einen Teil der anstehenden Fragen zu klären, wurden im Institut Versuche zum Einsatz von reinem Rüböl und von Mischungen aus Rüböl und Dieselmotoren in Schleppermotoren durchgeführt. Diese Versuche mit Schleppern verschiedener Leistung und Motorbauarten dienten dazu:

1. Den auf die Leistung bezogenen Kraftstoffverbrauch bei Betrieb mit reinem Rüböl und mit Dieselmotoren-Rüböl-Mischungen unterschiedlichen Rübölanteils für verschiedene Laststufen festzustellen.
2. Den Abfall in der Maximalleistung zu bestimmen, der bei Betrieb mit reinem Rüböl und mit Dieselmotoren-Rüböl-Mischungen unterschiedlichen Rübölanteils bei Schleppermotoren ohne Verstellung der Einspritzpumpe auftritt.

Brennwerte und Dichte der bei den Versuchen verwendeten Kraftstoffe sind in Tafel 8 dargestellt. Der spezifische (auf die Masse bezogene) Brennwert liegt bei Rüböl etwa 13 % niedriger als bei Dieselmotoren, der auf das Volumen bezogene Brennwert liegt wegen der größeren Dichte von Rüböl nur etwa 2,6 % niedriger.

Bei den an einer Zapfwellenbremse eingesetzten Schleppern mit Dieselmotoren und Direkteinspritzung handelt es sich bei der Bauart A um eine 44 kW-Maschine mit Saugmotor und beim Typ B um

		Dieselmotoren	Rüböl
Brennwert nach DIN 51900	kJ/kg	45320	39350
	kJ/l	37163	36202
Dichte	kg/l	0,82	0,92

Tafel 8. Brennwerte und Dichte der im Versuch eingesetzten Kraftstoffe.

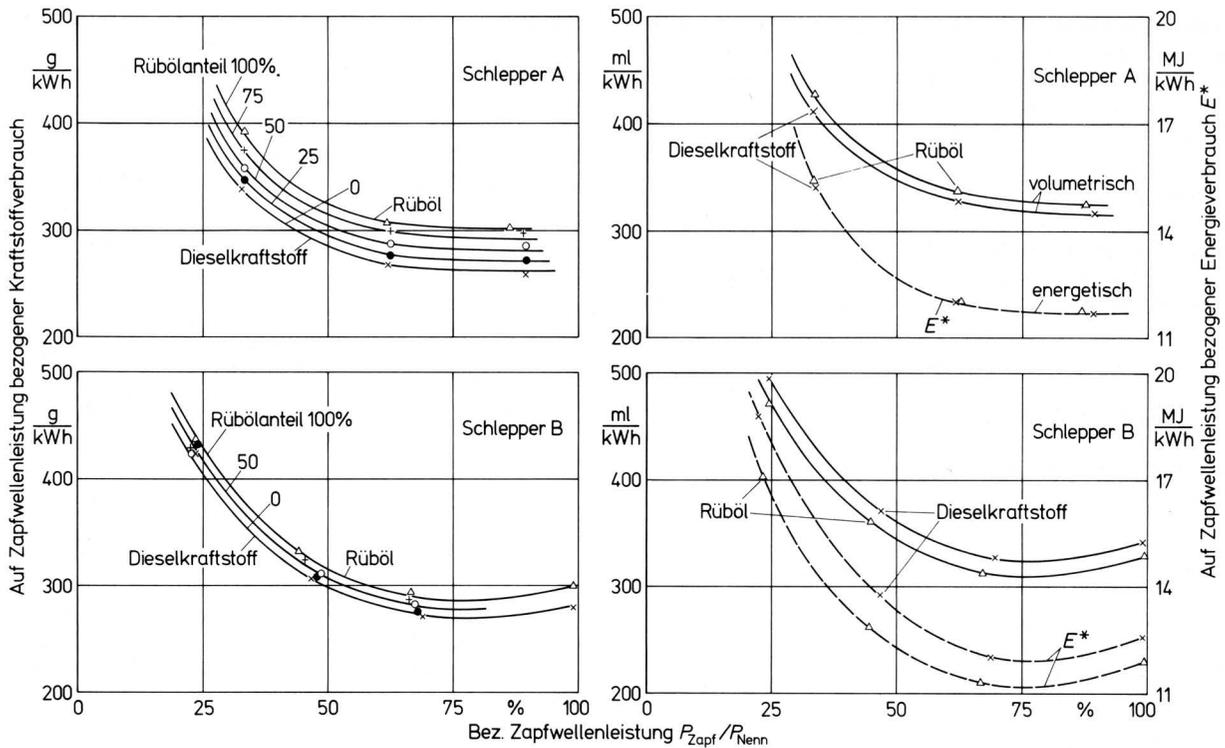


Bild 3. Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der bezogenen Zapfwellenleistung P_{Zapf}/P_{Nenn} für verschiedene Kraftstoffe. Luft- und Kraftstofftemperatur 20 °C. Die Meßwerte für Schlepper B bei $P_{Zapf}/P_{Nenn} = 98\%$ wurden mit einer veränderten Einspritzpumpeneinstellung ermittelt.

links: gravimetrischer Kraftstoffverbrauch rechts: — volumetrischer Kraftstoffverbrauch ---- energetischer Kraftstoffverbrauch

eine 110 kW-Maschine mit Abgasturbolader (Lademotor). Bei Versuchen mit weiteren Schleppern der Leistungsklasse um 45 kW ergaben sich ähnliche Werte wie beim Schlepper A.

Für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs wurden für jeden Schlepper drei verschiedene Leistungen vorgegeben und die Verbrauchswerte bei unterschiedlichem Rübölanteil – von 0 % (reiner Dieselkraftstoff) in Stufen von 25 % ansteigend bis 100 % Rübölanteil – gemessen. Die Ergebnisse sind in **Bild 3** dargestellt. Wegen der unterschiedlichen Leistung der Schlepper sind die Werte aufgetragen über der auf die Schleppernennleistung bezogenen Zapfwellenleistung.

Der gravimetrisch angegebene Kraftstoffverbrauch (g/kWh), links im Bild, ist nicht direkt mit dem spez. Kraftstoffverbrauch zu vergleichen, der auf einem Motorprüfstand ermittelt und beispielsweise im OECD-Test angegeben wird, da hier auf die Zapfwellen-

leistung bezogen ist. Das Diagramm zeigt, daß der Kraftstoffverbrauch mit zunehmendem Rübölanteil im Kraftstoff ziemlich gleichmäßig im ganzen Lastbereich ansteigt. Der Anstieg ist für den Schlepper A stärker ausgeprägt als für den Schlepper B mit Lademotor.

Wird der Kraftstoffverbrauch volumetrisch angegeben, ausgezogene Kurven der rechten Diagramme, dann sind die Unterschiede (Schlepper A) zwischen den verschiedenen Kraftstoffen nur gering, was dem geringen Unterschied im volumenbezogenen Brennwert nach Tafel 8 entspricht. Bei Schlepper B ergeben sich für den Betrieb mit Rüböl sogar niedrigere Werte.

Das gilt für Schlepper B auch, wenn der Kraftstoffverbrauch im Energiemaß aufgetragen wird, unterbrochene Kurven der Diagramme rechts. Für den Schlepper A sind hier zwischen den einzelnen Kraftstoffen keine Unterschiede festzustellen.

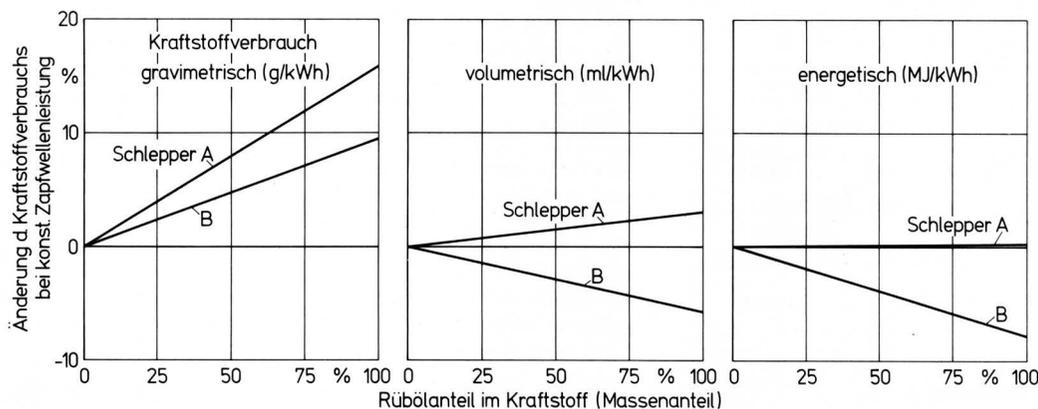


Bild 4. Änderung des auf die Zapfwellenleistung bezogenen Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit vom Rübölanteil im Kraftstoff bei konstanter Leistung ($P_{Zapf} = 0,75 P_{Nenn}$); Lufttemperatur ≈ 20 °C.

links: gravimetrisch (entsprechend g/kWh) mitte: volumetrisch (entsprechend ml/kWh) rechts: energetisch (entsprechend MJ/kWh)

Damit der quantitative Unterschied im Verbrauch sich hinreichend abbildet, ist in **Bild 4** die Änderung des Kraftstoffverbrauchs gegenüber dem Betrieb mit reinem Dieselkraftstoff für eine konstante Leistung ($P_{Zapf} = 0,75 P_{Nenn}$) in Abhängigkeit vom Rübölanteil

im Kraftstoff aufgetragen. Diese Darstellung, die Bild 3 entsprechend die Änderung sowohl gravimetrisch wie volumetrisch und energetisch wiedergibt, läßt die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kennwerten sehr deutlich werden und bestätigt, daß die Energie des Rüböls im Dieselmotor gleich gut oder besser umgesetzt wird als die Energie des Dieselmotorkraftstoffs.

Über die Frage nach der maximalen Leistung gibt Bild 5 Auskunft. Danach liegt die maximale Leistung bei Vollast und unveränderter Einstellung der Einspritzpumpe für Betrieb mit reinem Rüböl abhängig von der Motorbauart um 8–12 % niedriger. Dieser Abfall wird vorwiegend auf die größere Zähigkeit des Pflanzenöls zurückgeführt, Bild 6.

Der Abfall der Vollastleistung bei Übergang zum Betrieb mit Rüböl liegt nicht im energetischen Wirkungsgrad, sondern in der verminderten Einspritzmenge begründet. Wie Versuche ergaben, läßt sich durch Verstellen der Einspritzpumpe auf einfache Weise der Leistungsabfall beseitigen. Es gelten dann die mit Bild 4 gemachten Aussagen auch für Vollast.

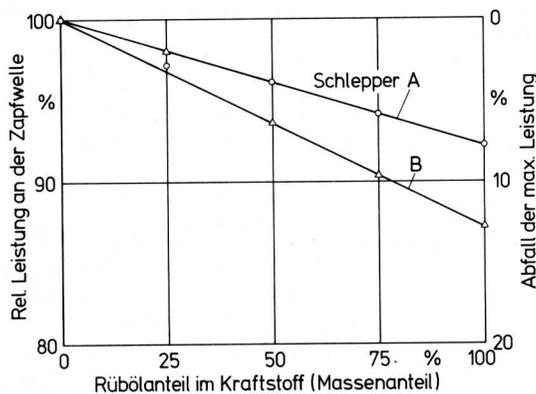


Bild 5. Relative Leistung an der Zapfwelle in Abhängigkeit vom Rübölanteil im Kraftstoff bei Vollaststellung der Regelstange, Lufttemperatur $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; Einspritzpumpe eingestellt für Dieselmotorkraftstoff.

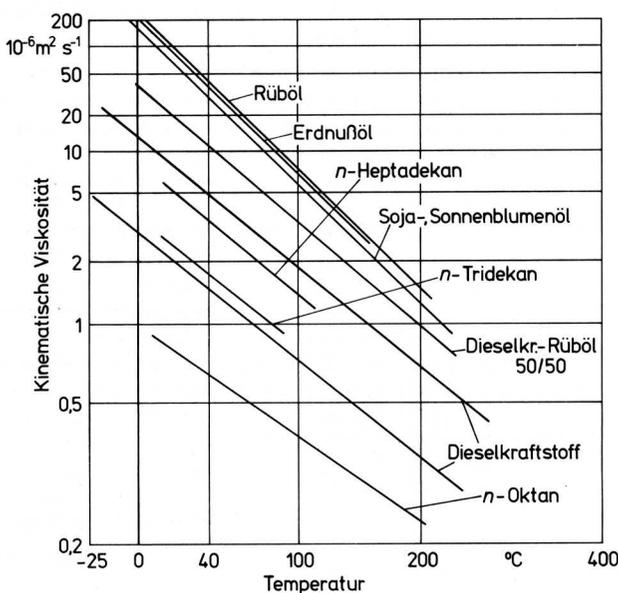


Bild 6. Kinematische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur für einige Pflanzen- und Mineralöle, nach Orlicek u. Pöll [41] ergänzt.

Durch Aufheizen des Rüböls auf $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird etwa die gleiche kinematische Viskosität wie bei Dieselmotorkraftstoff von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Hierdurch läßt sich aber der Abfall der Vollastleistung bei unveränderter Pumpeneinstellung nicht beseitigen. Es überlagern sich bei dieser Maßnahme verschiedene auch von der Motorbauart abhängige Einflüsse mit teilweise entgegengerichteter Wirkung. Beispielsweise sinkt mit steigender Temperatur die Dichte des Öles und damit auch der volumenbezogene Heizwert.

Die Versuche zeigen insgesamt, daß Pflanzenöle als Kraftstoff in Dieselmotoren energetisch voll befriedigen. Es bleiben aber noch wichtige Fragen zu klären. Aufgrund der Schrifttumhinweise und eigener Versuche ist abhängig von der Zusammensetzung der Pflanzenöle mit Schwierigkeiten im Betrieb bei niedrigen Temperaturen zu rechnen. Insbesondere treten im Motor im Bereich der Kolbenringe, der Ventile und der Einspritzdüsen Ablagerungen auf, die nach einigen hundert Betriebsstunden zu Störungen führen. Die im Institut angelaufenen Versuche sollen einen Beitrag zur Lösung dieser Probleme liefern.

5. Bewertung von Pflanzenölen als Energieträger

Die vorstehenden Untersuchungen weisen aus, daß die Herstellung von Pflanzenölen als Energieträger energetisch positiv ist und die Öle sich als Kraftstoffe für Dieselmotoren eignen. Es sind nun noch Kosten- und Mengenprobleme zu diskutieren. Ferner interessieren die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten für die Herstellung und Anwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff.

5.1 Produktionsmengen

5.1.1 Kraftstoffverbrauch der Landwirtschaft in der Bundesrepublik

Nach dem Stat. Jahrbuch 1979 betrug die in der Landwirtschaft im Wirtschaftsjahr 1977/78 verbrauchte Kraftstoffmenge 1 558 Mill. l, für Dieselmotorkraftstoff mit einer Dichte $\rho = 0,83\text{ kg/l}$ entspricht das einer Masse von 1.293.000 t.

5.1.2 Ölfruchtanbau in der Bundesrepublik

Nach den Angaben im Statistischen Jahrbuch (Tafel 2, Abschn. 3.2) wurden 1977/78 Ölfrüchte auf einer Fläche von 121.000 ha, d. i. 1,6 % der Ackerfläche, angebaut. Der Durchschnittsertrag auf dieser Fläche war 27,3 dt/ha. Bei einer Extrapolation von diesen Werten ausgehend, lassen sich die zu gewinnenden Ölmengen abschätzen.

Setzt man 10 % der Ackerfläche für Ölfruchtanbau an, ein vermutlich schon recht hoher Wert, dann ergeben sich die folgenden Werte:

10 % der Ackerfläche	750.000 ha
Durchschnittsertrag	27,3 dt/ha
Gesamternte	2.050.000 t
landw. Eigenverbrauch (s.a. Abschn. 3.2)	90.000 t
verwendbare Erzeugung	1.960.000 t
Rapsölmenge bei Ölausbeute von 40 %	784.000 t

Nach den Versuchsergebnissen (Abschn. 4.4.2) wird die Energie im Rüböl, verglichen mit Dieselmotorkraftstoff, bei gleichem oder besserem Wirkungsgrad im Dieselmotor umgesetzt. Aus den Massen und dem massenbezogenen Energieinhalt (spez. Brennwert) errechnet sich das Verhältnis $(784 \cdot 10^6 \cdot 39350) / (1293 \cdot 10^6 \cdot 45320) = 0,526$. Das heißt, die verfügbare Rapsölmenge entspricht energetisch einem Wert von 52,6 % des in der Landwirtschaft verbrauchten Kraftstoffs. Von diesem Wert ausgehend, könnte die Landwirtschaft in der Bundesrepublik ihren Kraftstoffbedarf decken, wenn 19 % der Ackerfläche mit Raps bestellt würden.

Wenn nur der Netto-Energieertrag eingesetzt wird, das heißt, daß die energetischen Aufwendungen für die Produktion mit einem Teil des erzeugten Rapsöles bestritten werden, wären bei Rapsanbau auf 10 % der Ackerfläche 475.000 t Rapsöl im Jahr verfügbar, eine Menge, die energetisch 31,9 % des Kraftstoffverbrauchs in der Landwirtschaft entspricht.

5.2 Kosten und Preise

Unterlagen zur Kostenbilanz sind nur schwer vollständig zu gewinnen. Aber ein minimaler Preis für Rapsöl aus deutscher Erzeugung läßt sich verhältnismäßig sicher abschätzen.

Das Stat. Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten weist einen Verkaufspreis (einschl. MwSt) für die Landwirtschaft aus von 961 DM/t. Daß dieser Preis der Marktsituation, d.h. dem Verhältnis von Aufwand und Ertrag in der deutschen Landwirtschaft gerecht wird, zeigt sich in dem über die Jahre nahezu konstanten Umfang von 1,6 % der Ackerfläche für den Ölfruchtanbau.

Die Aufwendungen in Ölmühlen für das Auftrennen in Rapsschrot und Rapsöl (roh) werden angegeben mit 45 DM/t Saat. Die Erlöse für Rapsschrot sind mit etwa 440 DM/t anzusetzen (ohne MwSt). Aus diesen Zahlen (die Transporte Landwirtschaft → Handel → Ölmühlen → Handel → Landwirtschaft und damit verbundene Preisaufschläge sind nur zum Teil berücksichtigt) läßt sich ableiten:

Rapspreis	961 DM/t
Verarbeitungspreis	45 DM/t
	<hr/>
	1.006 DM/t

1 t Raps wird aufgeteilt in 0,4 t Öl (roh) und 0,6 t Schrot. Der Erlös aus Rapsschrotverkauf beträgt $0,6 \text{ t} \times 440 \text{ DM/t} = 264 \text{ DM}$. Danach ist der Wert von 400 kg Rapsöl etwa gleichzusetzen mit der Differenz $1006 \text{ DM} - 264 \text{ DM} = 742 \text{ DM}$. Das führt auf einen Preis von 1,855 DM/kg oder bei $\rho = 0,92 \text{ kg/l}$ auf 1,71 DM/l. Der Weltmarktpreis für nicht raffiniertes (rohes) Rapsöl liegt derzeit bei etwa 1,20 DM/kg [42].

Für den Einsatz von Pflanzenöl in Verbrennungsmotoren ist zum mindesten eine teilweise Raffination erforderlich. Eine vollständige Raffination ist mit Kosten von 0,30 DM/kg zu veranschlagen, womit der Preis für raffiniertes Öl aus eigener Erzeugung etwa 2,15 DM/kg (1,98 DM/l) und für Öl vom Weltmarkt etwa 1,50 DM/kg (1,38 DM/l) beträgt.

Vergleicht man diese Werte mit dem Preis von Dieseldieselkraftstoff einschließlich Mineralölsteuer von 1,03 DM/l (1,24 DM/kg) oder von ca. 0,61 DM/l (0,73 DM/kg) ohne Mineralölsteuer – jeweils wie zuvor ohne Berücksichtigung der Mehrwertsteuer – so ist derzeit der Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff nicht wirtschaftlich. An eine Verwendung ist daher nur zu denken, wenn ein akuter Mangel an Dieseldieselkraftstoff auftreten würde und wenn sich in der Zukunft die Preise verschieben.

Damit ist auch die Frage gestellt, ob sich die Herstellung von Ölfrüchten verbilligen läßt.

5.3 Entwicklungsaufgaben

Die Hauptkosten für Rapsöl fallen, wie schon dargestellt, bei der Landwirtschaft an. Eine Kostensenkung in diesem Bereich wird in erster Linie über eine Steigerung des Flächenertrages möglich. Dieser Entwicklungsschritt ist auch wegen der grundsätzlich anzustrebenden Steigerung der Energieausbeute eine vorrangige Aufgabe. Mit höherem Flächenertrag steigt bei positivem Netto-Energieertrag und bei sonst konstanten Bedingungen die auf der Anbaufläche in nutzbare Energie umgewandelte Sonnenenergie. Einen wichtigen Beitrag hierzu könnte die Züchtung liefern.

Die Raffination und Verarbeitung von Rapsöl erfolgt bisher unter dem Gesichtspunkt einer industriellen Verwendung oder der Verwendung zur menschlichen Ernährung. Nach Auskunft eines großen Pflanzenölwerkes können durch Teilraffination (s. Abschn. 3.3) die Kosten der Vollraffination, zur Zeit etwa 300 DM/t Öl, auf weniger als die Hälfte reduziert werden.

Der Hauptschwerpunkt einer solchen Entwicklung bei der Ölverarbeitung müßte darin liegen, die Stoffe aus dem Rapsöl zu beseitigen, die bei Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff für Dieselmotoren im Langzeitbetrieb zu Schwierigkeiten führen können, z.B. Entfernen der Stoffe, die Ursache von Verkrustungen (Verlackungen) sind.

5.4 Vergleich von Raps mit anderen Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen

Der in der Überschrift genannte Vergleich ist im Rahmen dieses Aufsatzes nur in Form allgemeiner Aussagen möglich.*)

Bei der Herstellung von Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen erscheinen für die Bundesrepublik interessant: Äthanol über biologische Umwandlung, Gase über biologische (Biogas) und/oder chemische (Holzgas) Umwandlung und pflanzliche Öle aus Ölfrüchten. Eine vergleichende Abschätzung unter bestimmten Annahmen haben *Kohlmeier* [7], *Bernhardt* [43] u.a. durchgeführt. Aufgrund der Unterlagen aus dem Schrifttum läßt sich aussagen:

1. Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen können nur einen Teilbeitrag zur Energieversorgung liefern, weil
 - 1.1 die möglichen Produktionsflächen begrenzt sind,
 - 1.2 für die biologische Umwandlung nachwachsender Rohstoffe in Energieträger ausreichender Energiedichte ein vergleichsweise hoher Energieanteil erforderlich ist.
 2. Im Rahmen der oben genannten Verfahren ist Rapsöl insofern sehr konkurrenzfähig, als
 - 2.1 ein Energieträger mit hoher Energiedichte (Rapsöl ca. 36 200 kJ/l, Äthanol ca. 23 700 kJ/l) und höchstem Nutzwert (Kraftstoff für Dieselmotoren) entsteht;
 - 2.2 der Aufwand für die Verarbeitung durch geringen Energie- und Investitionsbedarf gekennzeichnet ist;
 - 2.3 der Preis für Rapsöl im Vergleich niedrig liegt; z.B. sind für das Energieäquivalent von 1 l Dieseldieselkraftstoff (37 500 kJ) anzusetzen: in Form von Rapsöl $1,03 \text{ l} \cdot 1,98 \text{ DM/l} = 2,04 \text{ DM}$, in Form von Äthanol $1,58 \text{ l} \cdot 2,21 \text{ DM/l} = 3,49 \text{ DM}$. Dabei ist nach [7] der Preis für Äthanol aus Kartoffeln eingesetzt;
 - 2.4 als Nebenprodukt ein Futtermittel mit hohem Eiweißgehalt anfällt und keine Entsorgungsprobleme auftreten;
 - 2.5 die Rohstoffe "Ölfrüchte" lagerfähig sind, so daß die Verarbeitung ganzjährig erfolgen kann;
 - 2.6 der Netto-Energieertrag (Output minus Input) stets positiv ist.Bei der Herstellung von Alkohol aus Agrarrohstoffen ist der Netto-Energieertrag meist negativ, d.h. es wird mehr technische Energie für landwirtschaftliche Erzeugung und Verarbeitung benötigt, als mit dem hergestellten Alkohol anfällt, wenn nicht Nebenprodukte (Bagasse, Stroh) als Heizmaterial im Prozeß eingesetzt werden können bzw. andere Nebenprodukte (Zuckerrübenblatt) in die Bilanz einbezogen werden [7, 43 bis 47].
- Allerdings ist auch zu beachten:
- 2.7 die je ha produzierte Menge von ca. 1 025 kg Öl liegt verhältnismäßig niedrig. (Gemeinsam mit dem Rapsschrot ist aber ein Energieertrag nutzbar, der einer mittleren Getreideernte entspricht);
 - 2.8 das für die Ernährung aufbereitete Rapsöl enthält Stoffe, die bei Verwendung als Kraftstoff zu Ablagerungen (Verkrustungen, Verlackungen) im Motor führen können. Ein störungsfreier Langzeitbetrieb ist daher noch nicht gesichert. Abhilfe ist über entsprechende Raffination, Kraftstoffmischungen, Zusätze (Additive) und Konstruktionsmaßnahmen möglich. Geeignete Lösungen sind noch zu erarbeiten. Eigene Versuche dazu sind angelaufen.

*) Ein ausführlicher Vergleich ist einem späteren Bericht vorbehalten.

6. Zusammenfassung

1. Rapsöl ist grundsätzlich als Kraftstoff für Dieselmotoren geeignet und erreicht im Schleppermotor etwa den gleichen energetischen Wirkungsgrad wie Dieseldieselkraftstoff. Rapsöl gehört damit zu den hochwertigsten Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen.
Für eine Verwendung als Kraftstoff ist noch nicht hinreichend geklärt oder gesichert abschätzbar die Gefahr von Ablagerungen und von Störungen im Langzeitbetrieb der Motoren. Als Abhilfe ist an eine Beseitigung der für den Motorbetrieb schädlichen Stoffe des Rapsöls oder eine Ausschaltung der Wirkungen durch Zugabe von Additiven oder durch Kraftstoffmischungen zu denken.
2. Die Herstellung von Rapsöl als Energieträger ist bezogen auf die gesamte eingesetzte technische Energie mit einem Output/Input-Verhältnis von 2,54/1 durchführbar. Mit einem Aufwand von 25,29 GJ/ha lassen sich erzeugen (Stand 1979):
1 029 kg raff. Rapsöl mit 40,24 GJ
1 646 kg Rapsschrot mit 24,57 GJ
4 700 kg Rapsstroh mit 64,81 GJ.
3. Von der Kostenseite her gesehen, ist eine Verwendung von Rapsöl als Dieseldieselkraftstoff derzeit nicht zu vertreten. Eine Verbesserung ist im wesentlichen nur über den Flächenenertrag zu erreichen, wobei den Möglichkeiten der Züchtung eine besondere Bedeutung zukommt.

Mit den Flächenenerträgen wächst, solange das energetische Output/Input-Verhältnis für die letzte erzeugte Ertragseinheit größer als eins ist, die auf der Flächeneinheit in die Form von Energieträgern umgewandelte Sonnenenergie. Ein weiterer Grund, die Steigerung der Flächenenerträge als zentrales Anliegen zu sehen.

4. Die deutsche Landwirtschaft könnte, bezogen auf den Entwicklungsstand 1979, über Rapsöl ihren Bedarf an Dieseldieselkraftstoff mit etwa 19 % der Ackerfläche decken*).

Im energiewirtschaftlich ungünstigsten Fall (ein theoretischer Grenzfall), wenn die gesamte Energie für die Rapsölproduktion (Landwirtschaft und Gewerbe) einschließlich der Energieäquivalente für die Investitionen mit dem erzeugten Energieträger selbst gedeckt wird, also nur der Netto-Energieertrag zur Verfügung steht, wäre eine Versorgung der Landwirtschaft mit Kraftstoff aus Raps mit etwa 30 % der Ackerfläche möglich. Die Nebenprodukte (Rapsschrot und -stroh) werden dabei zur Energiegewinnung nicht herangezogen, sie sind zusätzlich nutzbar.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] DIN 5499 (Januar 1972): Brennwert und Heizwert, Begriffe. Berlin u. Köln, Beuth 1972.
- [2] ● *Richter, K.*: Futterwerttabelle der DLG – Schweine. 2. Aufl., Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1961.
- [3] ● *Hackbarth, J.*: Die Ölpflanzen Mitteleuropas. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsges. 1944.
- [4] *Boguslawski, E. von*: Ölfruchtbau. In: *Roemer, Scheibe, Schmidt, Woermann*: Handbuch der Landwirtschaft. 2. Aufl. Bd. 2, S. 318/87, Berlin und Hamburg: Paul Parey 1953.
- [5] ● Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1979. Hrsg.: Bundesmin. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. 23. Jg. (1979) Münster-Hiltrup: Landwirtschafts-Verlag 1979.
- [6] *Heyland, K.-U. u. S. Solansky*: Energieeinsatz und Energieumsetzung im Bereich der Pflanzenproduktion. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft S. 15/30. Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [7] *Kohlmeyer, M.*: Ist die Landwirtschaft ein Energieverschwender? Hannov. Land- und Forstw. Zeitung Jg. 132 (1979) Nr. 51/52, S. 24/27.
- [8] *Diercks, R.*: Energieeinsparung in der Pflanzenproduktion im Bereich Pflanzenschutz. Berichte über Landwirtschaft 195. Sonderheft S. 142/56. Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [9] *Steinkampf, H.*: Energieeinsparung in der Pflanzenproduktion – Bereich Agrartechnik. Ber. über Landwirtschaft 195. Sonderheft S. 157/67. Hamburg u. Berlin: Paul Parey 1979.
- [10] ● *Baltes, J.*: Gewinnung und Verarbeitung von Nahrungsfetten. Berlin u. Hamburg: Paul Parey 1975.
- [11] *Möller, O.*: Fragen der Wirtschaftlichkeit beim Desodorieren von Ölen und Fetten. Fette, Seifen, Anstrichmittel Jg. 66 (1964) Nr. 6, S. 446/55 u. Nr. 7, S. 517/23.
- [12] *Thomas, A.*: Mündliche Mitteilung.
- [13] *Thomas, A.*: Fette und Öle. Aus: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Bd. 11, S. 455/524. Weinheim: Verlag Chemie 1976.
- [14] ● *Lüde, R.*: Die Gewinnung von Fetten und fetten Ölen. Dresden u. Leipzig: Theodor Steinkopff 1948.
- [15] *Scott, W.M.*: Alternative fuels for automotive Diesel engines. Aus: *Colucci, J.M. u. N.E. Gallopoulos*: Future automotive fuels, S. 263/92. New York: Plenum Press 1977.
- [16] ● *Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch* Bd. 1: Theoretische Grundlagen. 28. Aufl., S. 1249/60. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1955.
- [17] ● *Zerbe, C.*: Mineralöle und verwandte Produkte. Berlin/Heidelberg/ New York: Springer 1969.
- [18] DIN 51601 (April 1978): Flüssige Kraftstoffe; Dieseldieselkraftstoff, Mindestanforderungen. Berlin u. Köln: Beuth 1978.
- [19] ● *Pardun, H.*: Analyse der Nahrungsfette. Berlin u. Hamburg: Paul Parey 1976.
- [20] Anonym: Alkohol und Pflanzenöle als Ersatzkraftstoff für Mercedes-Benz-Nutzfahrzeuge in Brasilien. Automobiltechn. Zeitschr. ATZ Bd. 80 (1978) Nr. 2, S. 66.
- [21] Anonym: Das große Sparen. Der Diesel ist der beste Energieverwerter. Nutzfahrzeug (1978) Nr. 6, S. 21/22.
- [22] *Havemann, H.A., M.R.K. Rao, A. Natarajan u. T.L. Narasimhan*: Der Betrieb von schnellaufenden Dieselmotoren mit normalen und schweren Kraftstoffen in Verbindung mit Alkohol. Motortechn. Zeitschr. MTZ Bd. 15 (1954) Nr. 6, S. 177/85.
- [23] *Meurer, J.S.*: Beitrag zur Frage der Wirksamkeit von Dieseldieselkraftstoff-Zusätzen. Motortechn. Zeitschr. MTZ Bd. 18 (1957) Nr. 12, S. 384/87.
- [24] *Hardenberg, H.*: Untersuchungen über das Selbstzündungs-, Klopf- und Rauchverhalten von Kraftstoffen. Motortechn. Zeitschr. MTZ Bd. 36 (1975) Nr. 1, S. 10/16.
- [25] *Becker, K.*: Zündwilligkeit und Klopfestigkeit von leichten Kohlenwasserstoffen. Erdöl und Kohle – Erdgas Bd. 27 (1974) Nr. 9, S. 525.
- [26] *Gallois, J.*: Schnellaufende Viertakt-Dieselmotoren – Brennräume und Betrieb mit Schweröl. Motortechn. Zeitschr. MTZ Bd. 34 (1973) Nr. 7, S. 225/32.
- [27] *Becker, K.*: Vielstoffmotoren (Stand der Entwicklung). Automobil Industrie Bd. 19 (1974) Nr. 2, S. 61/73.
- [28] *Reuß, H.-J.*: Motor läuft mit beliebigem Kraftstoff. VDI-Nachrichten (1978) Nr. 9, S. 15.

*) Zum Vergleich: Es wird vielfach ein Anteil von 30 % der Ackerfläche als Futterfläche für Zugtiere genannt, wenn die Bewirtschaftung ausschließlich mit Zugtieren (geringere Arbeitsproduktivität, geringere Schlagkraft) durchgeführt werden sollte.

- [29] *Urlaub, A.*: Fortschritte auf dem Gebiet der Gemischbildung und Verbrennung im Motor. Automobiltechn. Zeitschr. ATZ Bd. 70 (1968) Nr. 8, S. 265/73.
- [30] *Havemann, H.A., M.R.K. Rao u. T.L. Narasimhan*: Leistungssteigerung durch das "Vergaser-Diesel-Verfahren" mit Alkohol. Motortechn. Zeitschr. MTZ Bd. 19 (1958) Nr. 2, S. 50/55.
- [31] *Binark, H.*: Die Bestimmung der Tropfengröße an einer Hohlkegeldüse. Automobiltechn. Zeitschr. ATZ Bd. 79 (1977) Nr. 5, S. 165.
- [32] DIN 51757 (Juni 1971): Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen; Bestimmung der Dichte. Berlin u. Köln: Beuth 1971.
- [33] *Ramachandran, A.*: Utilization of vegetable oils as fuels for compression-ignition engines. Proc. Symposium on problems relating to the development of internal combustion engine. Industry in India, C.S.I.R., New Delhi (1954) S. 133/35.
- [34] *Wörgetter, M.*: Pflanzenöl als Traktortreibstoff? Die landt. Zeitschrift DLZ Bd. 30 (1979) Nr. 9, S. 1252/54.
- [35] *Iimoto, M.*: On the operation of small Diesel engine for farm use using rape-seed as fuel. Journ. of the Soc. of Agric. Machinery, Japan, Teil I: Vol. 38 (1977) No. 4, S. 483/87; Teil II: Vol. 40 (1978) No. 1, S. 5/9; Teil III: Vol. 41 (1979) No. 2, S. 201/206.
- [36] *Pernkopf, J.*: Pflanzenöl im Dieselmotor. Intern. Symposium der Österr. Gesellschaft für Land- und Forstwirtschaftspolitik, Reichenau a.d. Rax 1979.
- [37] *Bharave, R.V. u. P.V. Amrute*: Groundnut oil for Diesel engines. Current Science Bd. 11 (1942) Nr. 10, S. 403/404.
- [38] *Laporte, J.*: Crude linseed and sunflower oils as Diesel fuels. Chem. Abstr. Bd. 38 (1944) S. 467.
- [39] *Traulsen, H.*: Rapsöl Alternative zum Dieselöl? Bauernblatt für Schleswig-Holstein 33./129. Jg. (1979) S. 5315.
- [40] DIN 51 900 (Ausgabe 1977): Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe; Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Berlin u. Köln: Beuth 1977.
- [41] *Orlicek, A.F. u. H. Pöll*: Hilfsbuch für Mineralöltechniker. 1. Bd. Wien: Springer 1951.
- [42] *Kersten, L.*: Die Märkte für Milch und Fette. Agrarwirtschaft Bd. 28 (1979) Nr. 12, S. 376/90.
- [43] *Bernhardt, W.*: Äthanol aus Biomasse als Kraftstoff für Automobile. Automobiltechn. Zeitschr. ATZ Bd. 81 (1979) Nr. 4, S. 151/57.
- [44] *Klostermann, H.-J., O.J. Banasik, M.L. Buchanan, F.R. Taylor u. R.L. Harrold*: Production and use of grain alcohol as a motorfuel — an evaluation. North Dakota Farm Res. Bull., Fargo, N. Dak. Bd. 35 (1977) Nr. 2, S. 3/9.
- [45] *Reinefeld, E., F. Wagner u. C. Winner*: Die Zuckerrübe als Energiepflanze? Zuckerindustrie Bd. 105 (1980) Nr. 1, S. 25/36.
- [46] *Gomes da Silva, J., G.E. Serra, J.R. Moreira, J.C. Concalves u. J. Goldemberg*: Energy balance for ethyl alcohol production from crops. Science Bd. 201 (1978) 8. Sept., S. 903/906.
- [47] *Houben, H.*: Motortreibstoff (Ethanol) aus Ein- und Zweijahrespflanzen wie Zuckerrüben, Manioka, Zuckerrohr. Zuckerindustrie Bd. 105 (1980) Nr. 1, S. 37/44.

Möglichkeiten zur Minderung des Schlepperlärms durch Anwendung von Schallschutzkapseln

Von Rolf Bacher, München*)

DK 631.372:331.827:534.83

Maßnahmen zur Minderung des Lärms an Ackerschleppern haben, insbesondere durch die berufsgenossenschaftlichen Vorschriften, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Als Alternative zu den schallisolierten Schlepperkabinen werden die Möglichkeiten zur Anwendung von Motorkapseln untersucht. Sofern der Schleppermotor in einem Halbrahmen elastisch gelagert wird, lassen sich sowohl mit motor-nahen als auch mit motorfernen Kapselungen auch ohne Kabine oder mit Wetterschutzverdeck Pegelwerte am Fahrerohr erreichen, die denen von schallisolierten Plattformkabinen vergleichbar sind.

1. Einleitung — Stand der Technik

Nach den "Besonderen Grundsätzen für die Beurteilung des Lärms am Ohr des Führers von Ackerschleppern und selbstfahrenden Mäh-dreschern" des Bundesverbandes der landwirtschaftlichen Berufsge-

nossenschaften (BLB) vom 20.06.1974 sind die betreffenden Fahrzeuge darauf zu überprüfen, daß deren Fahrer einem Lärmpegel von höchstens 90 dB(A) ausgesetzt werden [1].

Über eine stufenweise Verschärfung der Meßvorschriften wurde ein Entwicklungszeitraum von 7 Jahren zur Anpassung an diese Richtlinie zugestanden. Daß die Schlepperindustrie diese Zeitspanne zu nutzen wußte, zeigt die Tatsache, daß von 388 im April 1978 beim BLB registrierten Schleppertypen und -ausführungen bereits 40 % die Forderungen von 1981, d.h. nach einem Schalldruckpegel von höchstens 90 dB(A), entsprechend der Meßvorschrift des BLB [1], bei Nenndrehzahl, erfüllen. Allerdings sind in diesen 40 % aller Schlepper 90 % der Kabinenschlepper, 30 % der Schlepper mit Umsturzsicherungs- und nur 20 % der Schlepper mit serienmäßig geschlossenem Aufbau sowie 11,4 % der Schlepper mit serienmäßig nicht geschlossenem Aufbau enthalten [2].

Vergleicht man die nach OECD-Bedingungen (d.h. unter Last) ermittelten Schalldruckpegel von Schleppern der Prüffahre 1973/74, 75/76 und 77/78, so zeigt sich, daß durch die Einführung von schallisolierten Plattformkabinen die Lärmbelastung des Schlepperfahrers stark gemindert werden konnte, Bild 1.

Die schalltechnisch sehr ungünstig konstruierten Kabinen sind 1977/78 bis auf eine einzige Ausnahme völlig verschwunden. Bei den ohne Kabine geprüften Schleppern jedoch ist keine deutliche Reduzierung des Lärmpegels zu beobachten [3, 4, 5].

*) Dipl.-Ing. R. Bacher ist Assistent am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der Technischen Universität München.