

Praktische Erfahrungen mit Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren

Von Mjongsu Pak und Arnulf Alexi, Köln*)

DK 631.372:621.436:662.756.3

Zur Prüfung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren wurden Dauerversuche mit raffiniertem Sonnenblumenöl, entschleimtem und entsäuertem sowie roh gepreßtem und gefiltertem Rapsöl und raffiniertem Baumwollsaatöl an mehreren Dieselmotoren mit Wirbelkammer durchgeführt. Die Untersuchungen haben die grundsätzliche Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff bestätigt. Beim Betrieb mit Pflanzenölen minderer Qualität verursacht insbesondere die Krustenbildung an der Einspritzdüse Betriebsstörungen. Durch geringfügige konstruktive Maßnahmen kann die Krustenbildung erheblich gemindert werden.

1. Vorbemerkungen

Die durch die Energiekrise ausgelösten Aktivitäten und viele damit verbundene Arbeiten haben die grundsätzliche Einsatzmöglichkeit von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren nachgewiesen. Jedoch ist zur Zeit noch kein wirtschaftlicher Einsatz von Pflanzenölen als Kraftstoff möglich wegen ihrer hohen Herstellungskosten gegenüber herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff aus Erdöl [1].

Daher ist die Substitution des Dieselmotorkraftstoffes durch Pflanzenöle in den Industrieländern, wenn überhaupt, erst für die ferne Zukunft von Bedeutung. Für viele Länder der dritten Welt, die nicht über Erdölvorkommen verfügen und zudem noch keine nennenswerten Deviseneinnahmen haben, gelten jedoch andere Kriterien bezüglich der Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren.

Unter der Voraussetzung, daß geeignete Ölpflanzen dort in ausreichendem Umfange ökologisch verträglich angebaut werden können, haben dann diese Länder nicht nur die Möglichkeit der Deviseneinsparung, sondern darüber hinaus eine zusätzliche Ressource für die Selbsthilfe und insbesondere für die Mechanisierung der Landwirtschaft. Vor diesem Hintergrund bekommt die Einsatzmöglichkeit von Pflanzenölen als Kraftstoff eine besondere Bedeutung.

Im Fachbereich Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln werden seit 1981 Untersuchungen über die Einsatzmöglichkeit von verschiedenen Pflanzenölen unterschiedlicher Qualität an mehreren Dieselmotoren und an einem Ackerschlepper durchgeführt. Um die Untersuchungsergebnisse für die praktische Anwendung zu verwerten, wurden die Arbeiten mit mehreren Firmen und Institutionen, insbesondere mit der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit in Eschborn, koordiniert. In der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick über die bislang erzielten Ergebnisse und Erfahrungen beim Einsatz von Pflanzenölen als Kraftstoff gegeben.

Ein Teil des Inhaltes wurde bei der Internationalen Tagung Landtechnik, 23./24. Okt. 1986, in Neu-Ulm vorgetragen.

*) Prof. Dr.-Ing. M. Pak und Ing. (grad.) A. Alexi, Fachbereich Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.

2. Erkenntnisstand zur Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Aufgabenstellung

In vielen Arbeiten, z.B. [1, 2], wird über die Eigenschaften und Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren berichtet. Es gibt eine Reihe von Pflanzenölen, die als Kraftstoff für Dieselmotoren in Frage kommen. In einer Studienarbeit [3] hat Schubert die bislang bekanntgewordenen Untersuchungen mit Pflanzenölen als Kraftstoff übersichtlich zusammengestellt. Zu den am meisten untersuchten Pflanzenölen gehören Sonnenblumen-, Soja- und Rüböl.

Die Mindestanforderungen für herkömmliche Dieselmotorkraftstoffe sind in DIN 51 601 [4] vorgegeben. Pflanzenöle entsprechen diesen Anforderungen nur zum Teil. Daher können sie in den heutigen, schnellaufenden Dieselmotoren ohne Beschädigung von Maschinenteilen im Dauerbetrieb nicht uneingeschränkt eingesetzt werden. Zahlreiche Versuche [2, 3] haben gezeigt, daß bei Verwendung von Pflanzenölen in Dieselmotoren mit direkter Einspritzung erhebliche Probleme auftreten. Dagegen liefern Pflanzenöle in Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung gute Ergebnisse. Bekanntlich findet in Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung eine bessere Gemischbildung statt, so daß hier eher ein Einsatz von Kraftstoffen minderer Qualität für den Dauerbetrieb möglich ist. Daher sollte die Verwendungsmöglichkeit von Pflanzenölen minderer Qualität in Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz in den Ländern der dritten Welt, vorrangig geklärt werden.

Die Eigenschaften, die für die Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff von Bedeutung sind, können in folgende drei Gruppen unterteilt werden:

- a) Größen, die für den Energiegehalt von Bedeutung sind
- b) Größen, die für den motorischen Prozeß, insbesondere den Verbrennungsvorgang, maßgebend sind
- c) Größen, die für die Funktionstüchtigkeit von Teilen und die Lebensdauer der Maschine verantwortlich sind.

Zu den Größen der Gruppe a) gehören der spez. Heizwert und die Dichte des Brennstoffs. Der spez. Heizwert der meisten Pflanzenöle ist um etwa 12 % geringer als derjenige des Dieselmotorkraftstoffes, **Tafel 1**. Dagegen ist die Dichte von Pflanzenölen um etwa 10 % größer als die des Dieselmotorkraftstoffes. Da der Kraftstoff volumetrisch dosiert wird, ist der Energieinhalt der dem Motor zugeführten Pflanzenölmenge nur um etwa 1 bis 2 % geringer als derjenige des Dieselmotorkraftstoffes [1, 2]. Damit ist die Voraussetzung gegeben, ohne Änderung der Einstellung der Einspritzanlage etwa gleiche Leistungs- und Momentenwerte wie beim Dieselmotorkraftstoff zu erhalten. Viele Arbeiten bestätigen diesen Sachverhalt [1, 2, 5, 6].

Zu den Größen der Gruppe b) gehören vor allem die Viskosität, das Siedeverhalten, die Cetanzahl und der Flammpunkt. Die Viskosität ist eine entscheidende Größe für die Zerstäubung des Kraftstoffes durch die Einspritzdüse. Da die kinematische Viskosität von Pflanzenölen etwa um den Faktor 10 größer ist als die des Dieselmotorkraftstoffes, ist die Zerstäubung des Pflanzenöls im Brennraum wesentlich schlechter. Dieses hat eine schlechtere Verbrennung zur Folge. Die Cetanzahl der meisten Pflanzenöle liegt etwas unter der des Dieselmotorkraftstoffes. Dies scheint jedoch für die Verbrennung von geringerer Bedeutung zu sein. Der höhere Flammpunkt und der ungünstigere Siedeverlauf von Pflanzenölen haben schlechteres Kaltstartverhalten zur Folge. Obwohl die oben

		Rapsöl (verschied. Qualität) ¹⁾	Sonnen- blumenöl (raffin.)	Baumwoll- saatöl (raffin.)	Diesel- kraftstoff ²⁾
Dichte bei 15 °C	g/cm ³	0,914–0,922	0,921	0,914	0,82–0,86
Volumetr. Heizwert	kJ/l	35 370	34 800	34 740	35 270
Cetanzahl	CZ	37,6	31,7	42	45
Kin. Viskosität bei 20 °C	mm ² /s	65,9–71,7	62,4	84,4	2–8
Flammpunkt	°C	303–318	320	318–322	55
Grenzen der Filterbarkeit	°C	12–18	13	–	0

1) roh, halbraffiniert, raffiniert. 2) nach DIN 51601

Tafel 1. Physikalische Eigenschaften der verwendeten Pflanzenöle.

genannten Größen ungünstiger ausfallen als beim Dieseldieselkraftstoff, scheint zumindest bei Motoren mit indirekter Einspritzung der Verbrennungsvorgang beim Einsatz von Pflanzenölen für den motorischen Prozeß befriedigend abzulaufen.

Zu den Größen der Gruppe c) gehören die Conradsonzahl für den Koksrückstand, der Schleimgehalt, die Jodzahl, die Filterbarkeit, der Erstarrungspunkt aber auch die Viskosität. Die ungünstigen Werte dieser Größen führen zu einer verstärkten Krustenbildung an den Einspritzdüsen und in den Brennräumen sowie unter Umständen zum Verklemmen der Kolbenringe als Folge einer starken Ablagerung. Des weiteren können Verstopfungen des Filters und Transportschwierigkeiten in den Leitungen durch hohe Strömungswiderstände, vor allem bei niedrigen Umgebungstemperaturen wie z.B. im Winter auftreten.

Von den oben genannten Problemen stellt die Krustenbildung an den Einspritzdüsen und Kolbenringen die größte Schwierigkeit beim Einsatz von Pflanzenölen als Kraftstoff dar. In vielen Arbeiten [1, 2, 5] wird berichtet, daß die Leistung und der effektive Gesamtwirkungsgrad beim Betrieb mit Pflanzenölen etwa gleich groß sind wie beim Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff. *Vellguth* [2] stellt fest, daß die Verringerung der Viskosität auf einen dem Dieseldieselkraftstoff vergleichbaren Wert keine Verbesserung des Betriebsverhaltens bringt. In Langzeitversuchen wurde festgestellt, daß die Motorleistung im Laufe der Betriebszeit aufgrund von Ablagerungen an der Einspritzdüse sank, aber dann die Ablagerungen sich flockenartig lösen und zerfallen und schließlich die Leistung wieder etwa auf den Anfangswert anstieg. Diese Ergebnisse zeigen, daß trotz der hohen Viskosität von Pflanzenölen die Verbrennung im Motor etwa gleich gut ablaufen muß wie beim Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff. Eine wesentliche Verbesserung des Verbrennungsvorganges scheint daher nicht möglich zu sein. Die größte Aufmerksamkeit sollte der Rückstands- und Krustenbildung geschenkt werden. Die Forschungsarbeiten in Zukunft sollten genauere Aussagen über die Gründe der Rückstandsbildung machen und mögliche Gegenmaßnahmen aufzeigen. Die Entwicklungsarbeiten sollten dann die Verringerung der Krustenbildung durch geringfügige Änderungen bzw. Eingriffe im Verbrennungsraum zum Ziel haben.

Obwohl die Frage des Einsatzes von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren zur Zeit noch nicht endgültig beantwortet worden ist, kann aufgrund von verschiedenen Langzeituntersuchungen [1, 5, 7 bis 11] den Pflanzenölen eine gute Chance eingeräumt werden.

Aufgrund der oben dargestellten Überlegungen wurden im Fachbereich Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel aufgenommen, verschiedene Pflanzenöle unterschiedlicher Qualität an mehreren Dieselmotoren, wie sie in den Ländern der dritten Welt im Einsatz sind, auf ihre Eignung für den Dauerbetrieb zu testen. In den Untersuchungen sollen die Details der auftretenden Betriebsschwierigkeiten festgestellt und geeignete Maßnahmen dagegen getroffen werden.

3. Versuchsstand

3.1 Versuchsmotoren

Wie in Abschn. 2 bereits erwähnt, sind Vor- und Wirbelkammermotoren zum Einsatz des Pflanzenöles besser geeignet als Motoren mit direkter Einspritzung. Bei der Wahl der Versuchsmotoren wurden Motoren mit niedriger Leistung bevorzugt, die in Ländern der dritten Welt als Antrieb für vielfältige Zwecke große Verbreitung gefunden haben.

Daher wurde die Forschungsarbeit zunächst mit einem Dieselmotor der Firma Hatz begonnen. Später wurden zwei weitere Motoren herangezogen. Die technischen Daten der Versuchsmotoren sind in Tafel 2 aufgeführt. Sowohl der Hatz-Motor E89G, der eine weite Verbreitung vor allem in Afrika und Kleinasien gefunden hat, als auch der Perkins-Motor, der eine chinesische Lizenzfertigung ist und daher einen Preisvorteil hat, sind für Versuchszwecke prädestiniert.

Motor		Hatz E89G	Deutz F1L 511W	Perkins 269 ¹⁾
Nennleistung bei Drehzahl	kW min ⁻¹	9 2500	12 2800	3,7 3000
Hubraum	cm ³	668	825	288
Bohrung	mm	90	100	70
Hub	mm	105	105	75
Zylinder-Zahl	–	1	1	1

¹⁾ Chinesische Lizenzfertigung

Tafel 2. Technische Daten der im Versuch eingesetzten Wirbelkammer-Motoren.

3.2 Meßtechnik

Der Versuchsstand verfügt über Meßeinrichtungen für die Größen, die zur Beurteilung des motorischen Prozesses benötigt werden. Hierzu gehören Drehzahl, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch, Temperatur, Verbrennungsdruck und die Schwärzungszahl des Abgases. Zur Überwachung des störungsfreien Betriebes wurden außerdem die Temperatur und der Druck des Schmieröls gemessen.

Die Drehzahl des Motors wurde fotoelektrisch ermittelt. Durch eine mit 60 Bohrungen auf einem Kreisumfang versehene Kreisscheibe auf der Rotorwelle wird ein Lichtstrahl unterbrochen, wodurch elektrische Impulse in Abhängigkeit von der Drehzahl erzeugt werden. Die Anzahl der Impulse wird in die Drehzahl umgerechnet und diese an einer Digitalanzeige dargestellt.

Das Drehmoment des Motors wurde wahlweise entweder mit einer Wirbelstrombremse oder mit einer hydraulischen Leistungsbremse mit Wasser als Arbeitsmittel bestimmt. Die Wirbelstrombremse besteht aus einem durch den Motor angetriebenen Rotor, in dem ein Wirbelfeld erzeugt wird, und einem pendelnd gelagerten Stator mit Erregerspulen, in denen ein Magnetfeld aufgebaut wird, das dem Wirbelfeld entgegenwirkt. Die Drehmomentenmessung erfolgt über die Messung der Abstützkraft des Stators mit Hilfe einer Kraftmeßdose bei bekannter Hebelarmlänge der Abstützkraft. Die hydraulische Leistungsbremse arbeitet wie eine Strömungskuppelung und besteht aus einem durch den Motor angetriebenen Rotor und einem pendelnd gelagerten Stator. Das vom Rotor mitgenommene Wasser überträgt seinen Drehimpuls auf den Stator. Das Drehmoment wird wiederum durch die Messung der Abstützkraft des Stators mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen und aus der eingestellten Hebelarmlänge für die Abstützkraft ermittelt. Der Kraftstoffverbrauch wird wie üblich aus der Volumenmessung mit einem Stichprober und der Zeit für den Verbrauch des gemessenen Volumens ermittelt.

Die Temperaturmessungen wurden entweder mit Pt-Widerstandsthermofühlern oder NiCr-Ni-Thermoelementen durchgeführt.

Für die Ermittlung des Indikatorgramms wurde der Druckverlauf im Verbrennungsraum gemessen. Zu diesem Zweck wurde ein Quarzkristall-Druckaufnehmer im Zylinderkopf so angeordnet, daß der Fühler durch das Verbrennungsgas direkt beaufschlagt wird. Die für das Indikatorgramm notwendige Kurbelwinkelmarkierung wurde wie bei der Drehzahlmessung fotoelektrisch vorgenommen.

Die Schwärzungszahl des Abgases wurde mit einem Dieselauchtester der Firma Bosch ermittelt. Hierbei wird eine Filterscheibe mit einer Abgasmenge von 330 cm³ durchströmt und danach aus der Intensität der Lichtreflexion bzw. -absorption die Schwärzungszahl — ein Maß für den Rußgehalt im Abgas — ermittelt.

4. Verwendete Pflanzenöle

Für die Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Auf die Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften von Pflanzenölen für die motorische Verwendung wurde in Abschn. 2 bereits eingegangen. Daneben müssen verwendungsfähige Öle in den Einsatzgebieten aber in hinreichenden Mengen verfügbar sein. Des weiteren ist wünschenswert, daß diese Öle nicht als Nahrungsmittel geeignet sind und der Anbau der entsprechenden Ölpflanzen die Lebensmittelproduktion nicht einschränkt, um die ohnehin schwierige Lage der Lebensmittelversorgung in diesen Regionen nicht zu erschweren.

Keines der bisher bekannten Öle erfüllt alle genannten Voraussetzungen. Daher war es notwendig, bei der Auswahl der Pflanzenöle für den Versuchseinsatz einen Kompromiß einzugehen.

Für diese Forschungsarbeit wurden Sonnenblumen- und Rapsöl gewählt, deren Pflanzen in vielen Regionen der Erde angebaut werden. Des weiteren sind diese Öle am ehesten für die motorische Verwendung geeignet. Ferner wurde Baumwollsaatöl zur Untersuchung seiner Eignung als Kraftstoff in einem Kurzzeittest verwendet.

In der vorliegenden Arbeit sollten neben verschiedenen Ölsorten noch unterschiedliche Qualitäten einer Ölsorte untersucht werden. Dadurch sollte festgestellt werden, welche Mindestqualität ein Öl für die motorische Verwendung haben muß. Wünschenswert ist die Verwendung eines "roh gepreßten" Öls, das durch mechanisches Pressen ohne chemisches Nachbehandeln "on farm" auf einfache Weise hergestellt werden kann.

Hier wurde Rapsöl in zwei verschiedenen Qualitäten, nämlich "entschleimt und entsäuert" und "roh gepreßt", verwendet. Die Qualität "entschleimt und entsäuert" ist gegenüber der höheren Qualität "raffiniert" bezüglich Geruchs und Aussehens minderwertig. Die physikalischen und chemischen Daten der hier verwendeten Öle sind in Tafel 1 enthalten.

5. Versuchsdurchführung

Zur Beurteilung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff müssen sowohl die Betriebscharakteristiken der Motoren ermittelt als auch Dauertests der Motoren durchgeführt werden. Die Betriebscharakteristiken (Vollastkennlinie, Teillastkennfeld, Abgastemperatur, Schwärzungszahl, Indikatorgramm) werden aus den in den Versuchen ermittelten Meßdaten nach den allgemein bekannten Auswertungsverfahren ermittelt. Für den Dauertest muß ein Testprogramm festgelegt werden, um die Dauertestergebnisse der Motoren nach einheitlichen Gesichtspunkten bewerten zu können.

5.1 Testprogramme für den Dauerversuch

Ein Testprogramm soll zum einen bestmöglich praxisnahe Betriebsbedingungen enthalten und zum anderen so gestaltet sein, daß die Versuche mit möglichst geringem Zeit- und Arbeitsauf-

wand durchgeführt werden können. Außerdem sollen die Ergebnisse reproduzierbar sein. Im wesentlichen kommt es auf die richtige Wahl der Häufigkeit des Lastwechsels, der Betriebsdauer eines Lastpunkts und der Größe der Belastung an.

In der ersten Phase der Forschungsarbeit, in der der Hatz-Motor mit Sonnenblumenöl betrieben wurde, wurden die Versuche nach einem von der Firma Hatz vorgeschlagenen Testprogramm gefahren. Ein Testzyklus dauerte 5 Betriebsstunden und bestand aus folgenden 7 Betriebspunkten:

1. 0,5 h Nullastbetrieb bei niedriger Leerlaufdrehzahl
2. 1 h Vollastbetrieb bei der Drehzahl des max. Drehmomentes
3. 0,5 h Nullastbetrieb bei der Nenndrehzahl
4. 1 h Teillastbetrieb bei 75 % der Nenndrehzahl mit einem Belastungsfaktor¹⁾ von 0,85
5. 0,5 h Teillastbetrieb bei der Nenndrehzahl mit einem Belastungsfaktor von 0,5
6. 1 h Vollastbetrieb bei der Nenndrehzahl
7. 0,5 h Teillastbetrieb bei 50 % der Nenndrehzahl mit einem Belastungsfaktor von 0,25.

Die späteren Dauerversuche wurden nach einem in den USA mehrfach angewandten Testprogramm gefahren. Ein Zyklus dauert 4 h und enthält folgende 4 Betriebspunkte:

1. 1 h Vollastbetrieb bei der Nenndrehzahl
2. 1 h Vollastbetrieb bei der Drehzahl des max. Drehmomentes
3. 1 h Teillastbetrieb bei 80 % der Nenndrehzahl mit einem Belastungsfaktor von 0,25
4. 1 h Nullastbetrieb bei niedriger Leerlaufdrehzahl.

Der Vergleich der beiden Programme zeigt, daß sie im wesentlichen nur gering voneinander abweichen. Jedoch stellt das zweite, bedingt durch die geringere Anzahl der Betriebspunkte, für die Versuchsdurchführung eine erhebliche Vereinfachung dar, zumal die Versuche auf dem vorhandenen Prüfstand nicht automatisch gesteuert werden können.

5.2 Beurteilung des Dauerversuchs

Für die Beurteilung, ob die verwendeten Pflanzenöle für den Dauerbetrieb geeignet sind oder nicht, gibt es kein genormtes Verfahren. Allerdings gibt es hierfür eine Reihe von Größen, Daten und Merkmalen, die zusammen eine Aussage über die Eignung von Pflanzenölen für den Dauerbetrieb geben können. So wurden die Änderung der Motorkennlinie (Leistung und Verbrauch) über der Betriebsdauer, die Rußzahl, die Abgastemperatur, das Kaltstartverhalten, das Ausmaß von Ablagerungen an der Einspritzdüse, die Änderung des Wirbelkammervolumens durch die Ablagerungen und schließlich die Sauberkeit des Kolbens festgestellt. Für diese Größen gibt es jedoch keine genormten Kennwerte, die eine quantitative Beurteilung für den Dauerbetrieb möglich machen.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Dauerbetrieb ist bekanntlich die Funktionstüchtigkeit, die Beweglichkeit des Kolbens, die von seiner Sauberkeit bzw. vom Ausmaß der Ablagerungen am Kolben abhängt. Um einen quantitativen Maßstab hierfür zu schaffen, hat Vellguth [2] vorgeschlagen, die Beurteilungsmaßstäbe für Schmieröle nach DIN 51361 [12] für die Kolbensauberkeit anzuwenden. Die Kolbensauberkeit wurde hier nach dem Abschluß der Dauerversuche entsprechend dem in dieser Norm vorgeschlagenen Formular ausgewertet.

6. Versuchsergebnisse

Tafel 3 gibt eine Übersicht über die bisher durchgeführten Dauerversuche. Im folgenden werden die Versuchsergebnisse im einzelnen vorgestellt.

¹⁾ Der Belastungsfaktor ist das Verhältnis des eingestellten Drehmomentes zum maximalen, bei der gegebenen Betriebsdrehzahl erreichbaren Drehmoment.

Motor	Rapsöl			Sonnenblumenöl raffin.	Baumwollsaatöl raffin.	Gesamt
	raffin.	entschl. u. ents.	roh			
Hatz E89G	100 h	100 h	350 h	500 h	—	1050 h
Deutz F1L 511W	—	—	—	—	100 h	100 h
Perkins 269	—	100 h	—	—	—	100 h

Tafel 3. Zusammenstellung der durchgeführten Dauerversuche.

6.1 Versuchsergebnisse mit dem Hatz E89G

Mit dem Motor Hatz E89G sind bislang insgesamt mehr als 1000 Betriebsstunden mit verschiedenen Pflanzenölen erreicht worden. Durch die Versuche mit den Motoren KHD F1L 511W und Perkins 269 sollten lediglich Zusatzinformationen erzielt werden, so daß diese Versuche zeitlich begrenzt wurden.

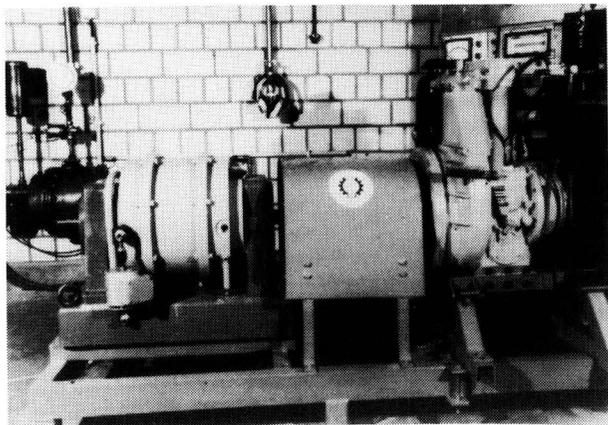


Bild 1. Versuchsstand mit dem Hatz-Motor.

6.1.1 Vollastkennlinien

Den Versuchsstand mit dem Hatz-Motor zeigt Bild 1.

In Bild 2 sind die Vollastkennlinien des Hatz-Motors beim Betrieb mit Dieselkraftstoff dargestellt. Die max. Leistung beträgt ca. 9,5 kW, das max. Drehmoment ca. 40 Nm, der min. spez. Brennstoffverbrauch ca. 250 g/kWh. Dieses entspricht einem max. Wirkungsgrad von etwa 34,5 %. Vor dem Beginn von Dauerversuchen mit Pflanzenölen wurden jeweils auch die Vollastkennlinien für diese Öle aufgenommen. Um einen Vergleich mit den Vollastkennlinien im Dieselbetrieb machen zu können, wurden alle Größen auf die max. Werte des Dieselbetriebs bezogen und in den Diagrammen als Verhältnisgrößen dargestellt.

Bild 3 gibt einen Vergleich der Drehmomentenkurven wieder. Bei Betrieb mit dem raffinierten Sonnenblumenöl wird etwa das gleiche max. Drehmoment erreicht wie bei Betrieb mit Dieselkraftstoff. Bei Verwendung des entschleimten und entsäuerten Rapsöls liegt das max. Drehmoment um etwa 2,5 % niedriger als das max. Drehmoment für Dieselkraftstoff. Bei rohem Rapsöl beträgt die Verminderung des max. Drehmoments etwa 3 %. Diese Ergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen, die aufgrund des etwa gleich großen, volumetrischen Heizwertes gemacht worden sind. Auffällig ist, daß bei niedrigen Drehzahlen mit Sonnenblumenöl sogar höhere Drehmomente erreicht werden.

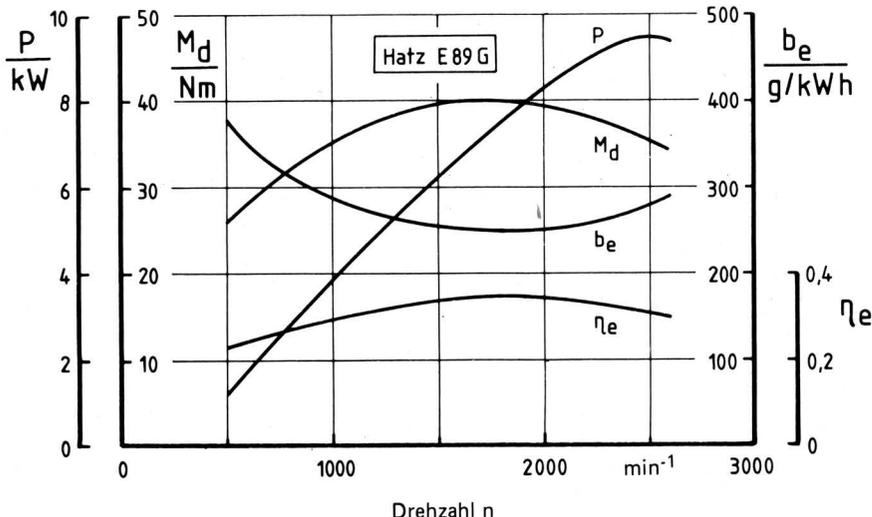


Bild 2. Vollastkennlinien des Hatz-Motors für Betrieb mit Dieselkraftstoff.

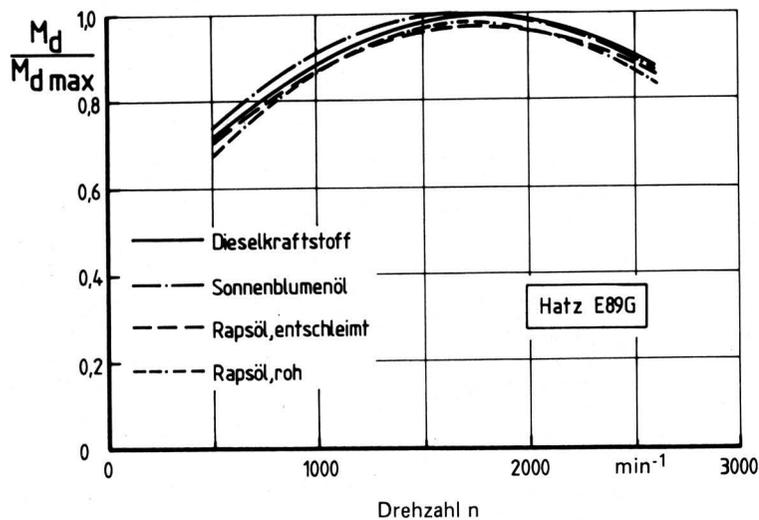


Bild 3. Drehmoment — bezogen auf das max. Drehmoment bei Betrieb mit Dieselkraftstoff ($M_{dmax} = 40 \text{ Nm}$) — in Abhängigkeit von der Drehzahl bei Betrieb mit verschiedenen Arten bzw. Qualitäten von Pflanzenöl.

Bild 4 zeigt den Vergleich der Leistungskurven. Entsprechend den Drehmomentenkurven liegen die Leistungskurven von Rapsölen geringfügig unter der des Dieselkraftstoffs und diejenige des Sonnenblumenöls ein wenig darüber.

Zur thermodynamischen Bewertung des motorischen Betriebs wird häufig der spez. Brennstoffverbrauch herangezogen. Der Vergleich mit Hilfe des spez. Brennstoffverbrauchs ist aber nur bei gleichem Kraftstoff aussagekräftig. Im anderen Fall ist der effektive Wirkungsgrad miteinander zu vergleichen. Daher wurde hier aus der Motorleistung und dem Kraftstoffverbrauch der effektive Motorwirkungsgrad ermittelt und auf den max. Wirkungsgrad mit Dieselkraftstoff (dieser beträgt ca. 34,5 %) bezogen, Bild 5. Der Maximalwert mit Sonnenblumenöl ist um ca. 4 % und die Werte mit Rapsölen sind um etwa 10 % schlechter als derjenige mit Die-

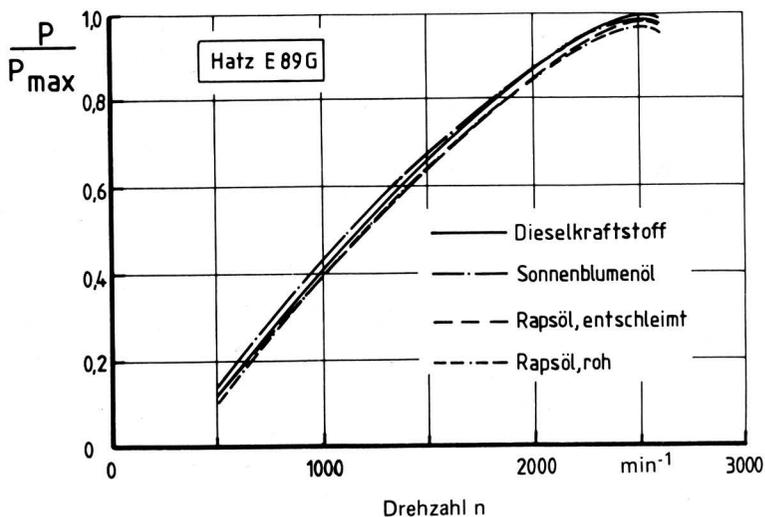


Bild 4. Motorleistung — bezogen auf die max. Leistung bei Betrieb mit Dieselkraftstoff ($P_{\max} = 9,5 \text{ kW}$) — in Abhängigkeit von der Drehzahl bei Betrieb mit verschiedenen Arten bzw. Qualitäten von Pflanzenöl.

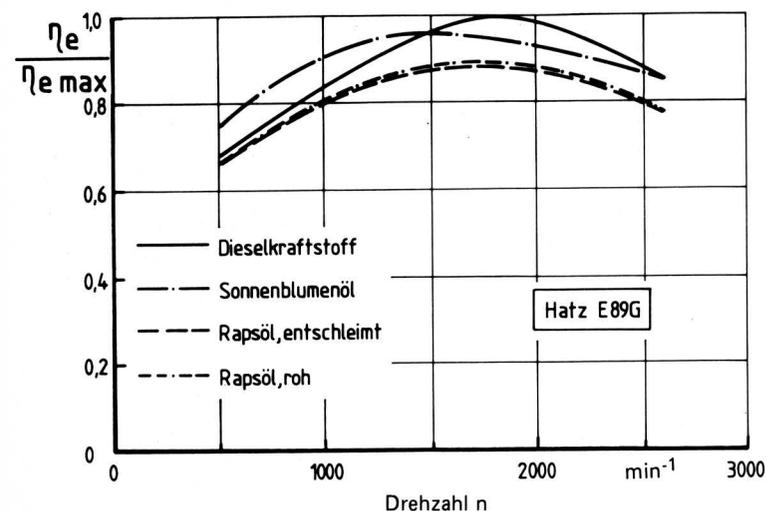


Bild 5. Effektiver Wirkungsgrad — bezogen auf den max. effektiven Wirkungsgrad bei Betrieb mit Dieselkraftstoff ($\eta_{e\max} = 34,5 \%$) — in Abhängigkeit von der Drehzahl bei Betrieb mit verschiedenen Arten bzw. Qualitäten von Pflanzenöl.

selkraftstoff. Auch hier ist bemerkenswert, daß die Wirkungsgrade mit Sonnenblumenöl im niedrigen Drehzahlbereich sogar besser sind als diejenigen mit Dieselkraftstoff. Das deutet darauf hin, daß für Pflanzenöle niedertourige Motoren besser geeignet sind.

Aus diesem Vergleich der Vollastkennlinien kann die grundsätzliche Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren bestätigt werden, obwohl viele physikalische Eigenschaften von Pflanzenölen ungünstig sind.

Die Messung der Schwärzungszahl ergab bei Pflanzenölen ähnliche Ergebnisse wie beim Dieselkraftstoff. Die Schwärzungszahl ist bei niedrigen Drehzahlen am größten (ca. 8) und sinkt mit steigender Drehzahl bis auf etwa 1. Bemerkenswert ist, daß die Schwärzungszahl bei den verwendeten Pflanzenölen im niedrigen Drehzahlbereich sogar ein klein wenig besser ist als bei Dieselkraftstoff.

6.1.2 Dauerversuche

Ob nun Pflanzenöle im Dauerbetrieb sich bewähren, muß durch Dauerversuche festgestellt werden. In dieser Arbeit wurden Dauerversuche für Sonnenblumenöl über 300 h und für Rapsöl verschiedener Qualitäten über je 100 h durchgeführt.

6.1.2.1 Raffiniertes Sonnenblumenöl

Mit Sonnenblumenöl wurde unter anderem ein Dauertest von 300 h ohne eine Zwischenreinigung der Motorteile nach dem ersten Testprogramm in Abschn. 5.1 durchgeführt [8].

Nach 300 h Dauerversuch zeigten die Motorcharakteristiken praktisch keine Änderungen. Die Umgebung der Einspritzdüsenbohrung war mit einem rußähnlichen Belag bedeckt. Am Schaft des Einlaßventils wurden ebenfalls Ablagerungen festgestellt. Die Ventile blieben jedoch innerhalb der Führung leichtgängig. Der Kolben wurde hier noch nicht nach dem in Abschn. 5.2 erwähnten Formular entsprechend DIN 51 361 geprüft. Die Sichtprüfung ergab jedoch, daß die Ringnuten und Stege lediglich die auch bei Dieselbetrieb auftretenden Verunreinigungen zeigen. Die Verdichtungsringe und der Ölabbstreifring ließen sich leicht in den Ringnuten bewegen.

Im gesamten Dauerversuch lief der Motor gleichmäßig; es traten keine Betriebsstörungen auf.

6.1.2.2 Entschleimtes und entsäuertes Rapsöl

Vor dem Beginn der Versuche der vorliegenden Arbeit mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl lagen Betriebserfahrungen mit dem raffinierten sowie dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl bei der Firma KHD in Köln [10] vor. Danach unterscheiden sich die beiden Ölqualitäten bezüglich des motorischen Prozesses kaum voneinander. Daher sollte von der Untersuchung mit dem voll raffinierten Rapsöl abgesehen werden. Mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl wurde ein 100 h-Dauerversuch nach dem zweiten Testprogramm in Abschn. 5.1 durchgeführt.

Im Dauerversuch mit eingefügtem Kaltstarten wurde ein gutes Start- und Laufverhalten festgestellt. Die Motorkennlinien zeigten nach dem Dauerversuch praktisch keine Änderungen. Bezüglich der Ablagerungen wurde ein etwa vergleichbares Ergebnis wie beim Sonnenblumenöl erzielt. Die Bewertung der Kolbensauberkeit, Bild 6, nach dem in Abschn. 5.2 erwähnten Formular ergab ein zufriedenstellendes Ergebnis. Es ergab sich eine Bewertungszahl von ca. 86 der maximal erreichbaren Zahl von 100.

6.1.2.3 Roh gepreßtes und gefiltertes Rapsöl

Das Öl dieser Qualität ist für die praktische Verwendung, insbesondere für die Länder der dritten Welt von besonderer Bedeutung, da es sich ohne hoch entwickelte Technologie herstellen läßt und da-

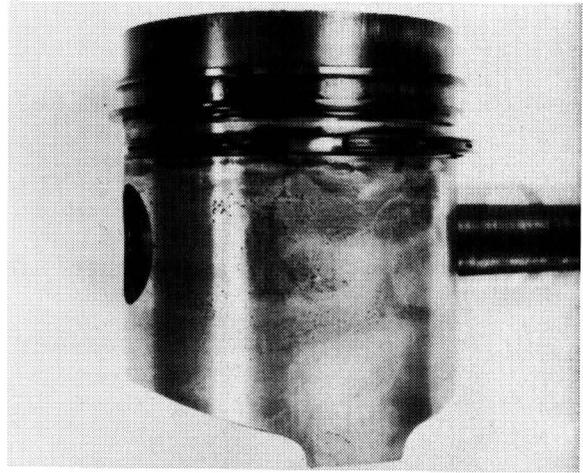


Bild 6. Kolben nach 100 h-Dauerversuch mit Rapsöl; links: Rapsöl, entschleimt und entsäuert, rechts: Rapsöl, roh.

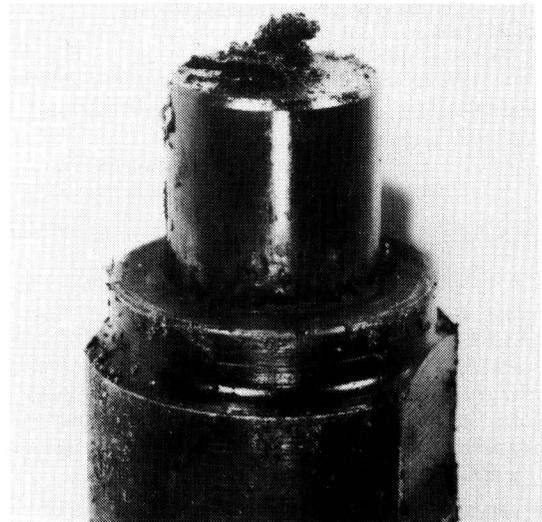


Bild 7. Einspritzdüse mit Ablagerungen nach 100 h-Dauerversuch mit Rapsöl; links: Rapsöl, entschleimt und entsäuert, rechts: Rapsöl, roh.

her auch sicherer verfügbar ist. Der Einsatz von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren könnte daher unter anderem von der Eignung von Ölen minderer Qualität entscheidend beeinflusst werden. Daher wurde dem Dauertest mit dem roh gepressten und gefilterten Rapsöl besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Der 100 h-Dauerversuch wurde nach dem zweiten Testprogramm in Abschn. 5.1 durchgeführt.

Obwohl die Motorkennlinien für Vollastbetrieb keine nennenswerten Unterschiede von denen mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl aufweisen, traten während des Dauerversuchs erhebliche Betriebsschwierigkeiten auf, die in erster Linie auf die Ablagerungen und die Krustenbildung an der Einspritzdüse zurückzuführen sind. So traten bereits nach wenigen Betriebsstunden Kaltstartschwierigkeiten auf, die die Reinigung der Einspritzdüse erforderlich machten. Der Motor lief bei niedrigen Drehzahlen unruhig und wies starke Drehzahlschwankungen auf.

Die Bewertung der Kolbensauberkeit nach dem bereits in Abschn. 5.2 erwähnten Formular ergab hier naturgemäß schlechtere Ergebnisse (Bewertungszahl von ca. 83) als beim Betrieb mit entschleimtem und entsäuertem Rapsöl. Diese Verschlechterung ist allerdings relativ geringfügig, Bild 6. Dagegen waren die Ablagerungen am Schaft des Einlaßventils und vor allem an der Einspritzdüse, Bild 7, beträchtlich. Wie zuvor erwähnt, war die Krustenbildung an der Einspritzdüse die Ursache von verschiedenen Betriebsstörungen.

6.1.3 Versuche mit geänderten Einspritzdüsenzitz

Da die bisherigen Betriebserfahrungen zeigten, daß die meisten Betriebsstörungen durch Ablagerungen an der Einspritzdüse bedingt sind, wurden Überlegungen angestellt, wie die Krustenbildung an der Einspritzdüse vermindert werden kann. In der Serienausführung des Motors ist die Einspritzdüse so angeordnet, daß ihre Spitze gegenüber der Wand der Wirbelkammer um etwa 2 mm zurückgesetzt ist. Nun wurde ihr Sitz so geändert, daß die Spitze der Einspritzdüse mit der Wand der Wirbelkammer fluchtet. Dadurch soll erreicht werden, daß die Ablagerungen an der Einspritzdüse durch das verwirbelnde Gas in der Wirbelkammer abgetragen werden und die Krustenbildung vermindert wird [9]. Die Folgen wären ein besseres Start- und Laufverhalten durch eine günstigere Einspritzung des Kraftstoffs.

Die Versuchsergebnisse entsprachen zum Teil den gestellten Erwartungen. Nach einem 100 h-Dauerversuch mit roh gepresstem und gefiltertem Rapsöl wurden wesentlich geringere Ablagerungen in der Wirbelkammer und ebenso geringere Krustenbildung an der Einspritzdüse, Bild 8, als im Betrieb ohne diese Änderung festgestellt. Es traten keine Kaltstartschwierigkeiten auf, der Motor lief gleichmäßig ohne jegliche Störung.

Die hier erzielten Ergebnisse können als geringfügig schlechter als die Versuchsergebnisse beim Betrieb mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl bewertet werden. Die Bewertung der Kolbensauberkeit nach dem bereits erwähnten Formular ergab einen Wert von ca. 87.

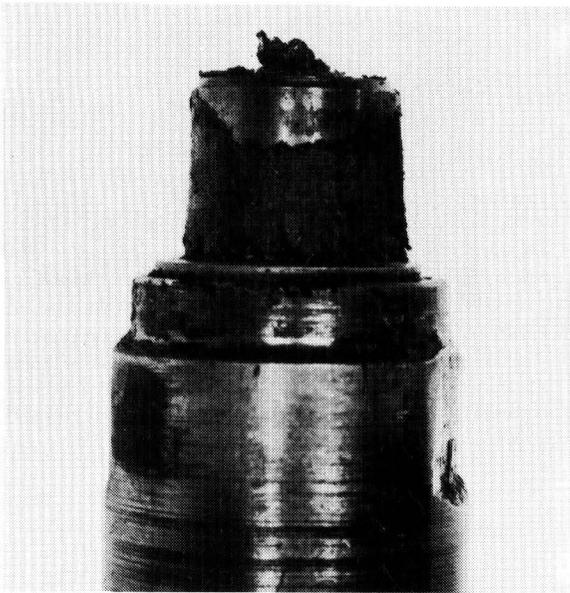


Bild 8. Einspritzdüse mit Ablagerungen nach 100 h-Dauerversuch mit rohem Rapsöl nach Änderung des Einspritzdüsensitzes.



Bild 9. Einspritzdüse mit Ablagerungen nach 100 h-Dauerversuch mit rohem Rapsöl bei teilweisem Unterbinden der Luftkühlung.

6.1.4 Versuche mit einem teilweisen Aussetzen der Luftkühlung

Bei der Suche nach weiteren Maßnahmen gegen die Krustenbildung im Verbrennungsraum wurde von der Überlegung ausgegangen, daß die Krustenbildung besonders im Leerlauf bei niedrigen Drehzahlen verstärkt auftritt und dies auf eine niedrige Temperatur im Verbrennungsraum zurückzuführen ist. Höhere Temperaturen müßten die Verbrennung verbessern und helfen, zumindest einen Teil von schlecht brennbaren Bestandteilen, die die Ablagerungen bilden, zu verbrennen und mit dem Abgas fortzuführen.

Die Temperaturmessung in der Wirbelkammer beim Betrieb mit der Motorkühlung durch Kühlluft ergab, daß die maximale Temperatur bei Vollast etwa 1150 °C beträgt. Im Leerlauf bei niedrigen Drehzahlen wurde jedoch nur eine Temperatur von etwa 650 °C erreicht. Beim Betrieb ohne Luftkühlung stieg die Temperatur in der Wirbelkammer um etwa 70 °C, so wurde im Leerlauf bei niedrigen Drehzahlen eine Wirbelkammertemperatur von ca. 720 °C erreicht.

Nun wurde ein 100 h-Dauerversuch mit dem roh gepreßten und gefilterten Rapsöl derart durchgeführt, daß der Motor unterhalb einer Wirbelkammertemperatur von 1000 °C ohne Luftkühlung betrieben wurde [11]. Dieses wurde durch Schließen der Ansaugöffnung für die Kühlluft erreicht.

Der Betrieb verlief ohne jegliche Störung. Die Motorkennlinien sind vergleichbar mit denen beim Betrieb mit entschleimtem und entsäuertem Rapsöl. Die Ablagerungen in der Wirbelkammer und die Krustenbildung an der Düse, Bild 9, sind geringfügig. Der Kolben ist sauberer als im Betrieb mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl. So können die Ergebnisse insgesamt als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden.

6.2 Versuchsergebnisse mit dem Motor KHD F1L 511 W

Mit diesem Motor wurde ein 100 h-Dauerversuch mit raffiniertem Baumwollsaatöl durchgeführt. Der Zweck des Versuchs war in erster Linie das Testen von Baumwollsaatöl als Kraftstoff. Der Versuch verlief ohne Probleme, Kaltstartschwierigkeiten traten nicht auf. Der Kolben und andere Motorteile sind nicht so sauber wie die eines baugleichen KHD Motors beim Betrieb mit raffiniertem Rapsöl [10]. Die Ablagerungen haften jedoch nicht so fest und sind meistens dünn.

6.3 Versuchsergebnisse mit dem Motor Perkins 269

Dieser Motor ist aus einer chinesischen Lizenzfertigung und bietet den Vorteil eines niedrigen Preises. Daher wäre ein solcher Motor für die Länder der dritten Welt im Zusammenhang mit Pflanzenölen als Kraftstoff von besonderem Interesse.

Mit diesem Motor wurde ein 100 h-Dauerversuch mit dem entschleimten und entsäuerten Rapsöl durchgeführt.

Da dieser Motor nicht mit einer Kaltstarthilfe versehen ist, war ein Kaltstart ohne weiteres nicht möglich, sondern erst nach Vorwärmen des Zylinderkopfes auf ca. 70 °C. Bereits beim Einlaufen wurde ein Fertigungsmangel (Klemmen der Düsenadel) festgestellt. Da sich dieser Fehler nicht vollständig beseitigen ließ und immer wieder Betriebsstörungen auftraten, wurde der komplette Düsenersatz durch einen vergleichbaren Bosch-Typ ersetzt. Danach konnte die Untersuchung zu Ende geführt werden.

Das Laufverhalten des Motors war schlecht; es traten Drehzahlschwankungen und Leistungsminderung auf. Am Ende der Versuche trat eine Leistungsminderung um etwa 25 % gegenüber dem Versuchsbeginn auf. Der Zylinder und der Kolben zeigten starke Verschleißerscheinungen und starke Ablagerungen; die Kolbenringe begannen bereits in den Ringnuten zu klemmen. Es konnte im nachhinein nicht festgestellt werden, welche Anteile dieser negativen Ergebnisse jeweils auf die fehlerhafte Einspritzdüse und auf die fertigungs- und werkstoffbedingten Eigenschaften des Motors zurückzuführen sind.

7. Zusammenfassung

Eine Reihe von Pflanzenölen ist grundsätzlich als Kraftstoff für Dieselmotoren mit Vorkammer geeignet. Die Leistungs- und Drehmomentenkennlinien der Motoren unterscheiden sich beim Betrieb mit Pflanzenölen nur unwesentlich von denjenigen beim Betrieb mit Dieselmotoren. Die maximalen effektiven Motorwirkungsgrade sind beim Betrieb mit Pflanzenölen in der Regel aber um einige Prozentpunkte niedriger. Allerdings wurden bei niedrigen Drehzahlen teilweise sogar höhere Motorwirkungsgrade beim Betrieb mit Pflanzenölen als beim Betrieb mit Dieselmotoren erreicht. Ein Vergleich von Indikatorgrammen für Pflanzenöl und für Dieselmotoren zeigt keinen beachtenswerten Unterschied sowohl bezüglich des Zündverzugs als auch des Druckverlaufs.

Schwierigkeiten im Dauerbetrieb treten durch Ablagerungen und Krustenbildung in der Vorkammer und im Zylinder, vornehmlich an der Einspritzdüse und am Kolben, insbesondere bei Verwendung von nicht raffinierten Pflanzenölen auf.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen aber, daß eine wesentliche Minderung der Ablagerungen durch geringfügige Maßnahmen am Motor (z.B. Änderung der Lage der Einspritzdüse und Änderungen bei der Motorkühlung) möglich ist. Dadurch wird die Chance, roh gepreßte Öle ohne Raffination als Kraftstoff einzusetzen, wesentlich erhöht.

Die Untersuchungen haben ebenfalls ergeben, daß eine allgemeingültige Aussage über die Eignung von Motoren für den Pflanzenölbetrieb nicht gemacht werden kann. Es ist eine Einzelprüfung von Motortypen notwendig.

Bei der Durchführung der Forschungsarbeit hat die Firma Hatz, Ruhstorf, das Vorhaben durch die Bereitstellung des Motors und von Ersatzteilen unterstützt. Die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit in Eschborn hat einen Teil der Forschungsmittel bereitgestellt. Herr Dipl.-Ing. G. Vellguth, Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig, war bei der Auswertung der Kolbensauberkeit behilflich. Allen gilt der Dank der Autoren.

Schrifttum

- [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] Vellguth, G.: Eignung von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten als Kraftstoff für Dieselmotoren. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 5, S. 177/86.
- [3] Schubert, M.: Pflanzenöle für Dieselmotoren. Studienarbeit, TU Berlin, 1982.
- [4] DIN 51 601 (April 1978): Flüssige Kraftstoffe; Dieselkraftstoff, Mindestanforderungen. Berlin und Köln: Beuth 1978.
- [5] Walt, van der, A.N.: Diesel engine test with sunflower oil as an alternative fuel. 3. Int. Conf. on Energy Use Management; Berlin 1981.
- [6] Peterson, C.L., G.L. Wagner u. D.L. Auld: Vegetable oil substitutes for diesel fuel. ASAE Paper 81-3578, St. Paul, USA 1981.
- [7] Dietrich, W.: Einsatzmöglichkeiten vegetativer Öle und Alkohole beim Betrieb von Dieselmotoren. Bericht der MWM-Diesel-Motorenwerke, Mannheim.
- [8] Van Husen, A. u. M. Kowalke: Pflanzenöle, eine Alternative zum Dieselöl? Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1982.
- [9] Bonde, M. u. B. Hamphoff: Untersuchung auf die Eignung des Rapsöls für Dieselmotoren. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1984.
- [10] Mündliche Mitteilung der Firma KHD, Köln: 100 h-Dauertest mit raffiniertem und halbraffiniertem Rapsöl an einem Dreizylinder-Deutz-Dieselmotor.
- [11] Hitzler, G. u. P. Knorsch: Verbesserung der Einsatzmöglichkeit von Pflanzenölen für den Dieselmotor durch konstruktive Maßnahmen am Motor. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1986.
- [12] DIN 51 361, Teil 2 (Juni 1977): Prüfung von Schmierstoffen; Prüfung von Motorschmierölen im MWM-Prüfdieselmotor, Verfahren zur visuellen Beurteilung der Kolbensauberkeit. Berlin/Köln: Beuth 1977.

Bestimmung des Zugkraftbedarfs von Pflügen aus Messungen als Analyse stochastischer Vorgänge

Von Béla Borsa, Gödöllő, Ungarn*)

DK 631.312:531.222:519.216

Viele in der Landtechnik wichtige Größen ergeben sich aus kontinuierlichen stochastischen Vorgängen, bei denen die zeitlich diskretisierten Einzelvorgänge nicht voneinander unabhängig sind. Die stichprobenweise Bestimmung kennzeichnender Größen, beispielsweise des wahren Mittelwertes, muß daher die Beziehungen zwischen den diskretisierten Einzelvorgängen berücksichtigen.

Dieser Beitrag untersucht mit Hilfe der Autokorrelationsfunktionen, welcher Stichprobenabstand beim Pflügen eine zuverlässige Bestimmung des Zugkraftbedarfs ermöglicht. Ausgehend von diesem Stichprobenabstand werden die Werte der Meßdauer ermittelt, die für die Bestimmung des Zugkraftbedarfs mit bestimmtem relativem Fehler und bestimmter Konfidenz notwendig sind.

*) Dipl.-Ing. Dr. B. Borsa ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Meßtechnik des Instituts für Landtechnik (Dir.: Dr. Gyula Bánházi) in Gödöllő, Ungarn.

1. Einführung, Problemerkörterung

Zahlreiche unter Feldbedingungen durchgeführte Messungen in der Landtechnik beruhen auf Signalen, die aus zufälligen Prozessen mit kontinuierlichen Zeitparametern stammen, z.B.:

- zwischen Kraft- und Arbeitsmaschine bzw. in der kinematischen Kette der Arbeitsmaschine ablaufende Prozesse des Energieflusses (z.B. Zugkraft, Antriebsmoment)
- Schwingungs- und Schwankungsprozesse an bestimmten Rahmenpunkten (Ortsänderung, Beschleunigung)
- aus den technologischen Prozessen bzw. aus der Ortsänderung an den Rahmen entstehende Vorgänge der Beanspruchung und daraus folgend die an den verschiedenen Rahmenpunkten entstehenden Spannungszustände.

Die betrachteten Signale stammen erfahrungsgemäß aus zufälligen Vorgängen, die über innere Beziehungen verfügen, Bild 1.

Bei der Projektierung von Messungen dieser korrelierten Prozesse ist die Frage aufzuwerfen, über welche Zeit Messungen benötigt werden, um eine Schätzung mit bestimmtem Zuverlässigkeitsniveau und bestimmter Genauigkeit von den Größen des Prozesses (z.B. Erwartungswert, Streuung) zu ermöglichen. In zahlreichen