

DIE MÖGLICHKEIT DER MOTORISCHEN VERWENDUNG VON ERDGAS UND BIOGAS UND IHRE VOLKSWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG

Von

I. SÁNDOR

Lehrstuhl für Gasmotoren und Automobile, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 4. Juni, 1965)

Die fortschreitende Mechanisierung der Landwirtschaft und die wirtschaftliche und kulturelle Hebung des bäuerlichen Lebensstandards erfordern eine bessere Energieversorgung der Landwirtschaft, im besonderen ihre bessere Versorgung mit elektrischem Strom. Der wachsende Bedarf auf diesem Gebiet kann durch Dieselmotoren befriedigt werden, die mit dem im landwirtschaftlichen Großbetrieb produzierten Biogas oder, wo Erdgasvorkommen dies ermöglichen, mit Erdgas betrieben werden.

Die tunlichst rasche Ausbildung derartiger Motoren bildet also eine vordringliche Aufgabe. Da jedoch der Bedarf an solchen Motoren mit gemischtem Betrieb heute noch verhältnismäßig gering ist, werden sie von unserer Industrie noch nicht gebaut und aus demselben Grunde auch nicht importiert. Andererseits ist aber auch die Entwicklung solcher Motore für gemischten Betrieb nicht möglich, solange die prinzipiellen Probleme der Umstellung von Serien-Diesel- oder Benzinmotoren nicht gelöst sind. Die Lösung ist in erster Reihe Sache der Forschung, die der Volkswirtschaft wirtschaftlichere und verlässlicher arbeitende Konstruktionen in die Hand geben muß. Für den Motorenbau bedeutet die Einzelfertigung solcher Motoren in der gegenwärtig noch relativ kleinen Stückzahl unbedingt eine wirtschaftliche Belastung. Aus diesem Grunde ist die Entwicklung von Konstruktionen für gemischten Betrieb anzustreben, die von den serienmäßig gebauten Diesel- bzw. Benzinmotoren möglichst wenig abweichen.

Auf dieser Grundlage setzte sich unsere Forschungsarbeit zum Ziel, die im Inland gebauten Dieselmotoren so umzubauen, daß sie gegebenenfalls wahlweise mit beiden Betriebsstoffen, also mit Erd- oder Biogas bzw. mit Gasöl betrieben werden können; gleichzeitig sollen die Motoren auch nach dem Umbau als vollwertige Dieselmotoren arbeiten können.

Bemerkt sei noch, daß die Motoren für gemischten Betrieb zweckmäßig in stabiler Bauart ausgeführt werden müssen, da die Abfüllung von Erd- bzw. Biogas in Transportflaschen schwerfällig ist.

Detailfragen der skizzierten Zielsetzung

- 1) Können die derzeitig im Inland gebauten Dieselmotoren mit Erdgas bzw. mit Biogas betrieben werden?
- 2) Kann der gemischte Betrieb derart gelöst werden, daß der Motor sowohl als vollwertiger Dieselmotor, als auch als erd- bzw. biogasbetriebener Motor eingesetzt werden kann?
- 3) Auf welche Weise kann das in den Zylinder eingespritzte Gas gezündet werden?
- 4) Mit welchem thermischen Wirkungsgrad kann bei diesem gemischten Motor gerechnet werden?

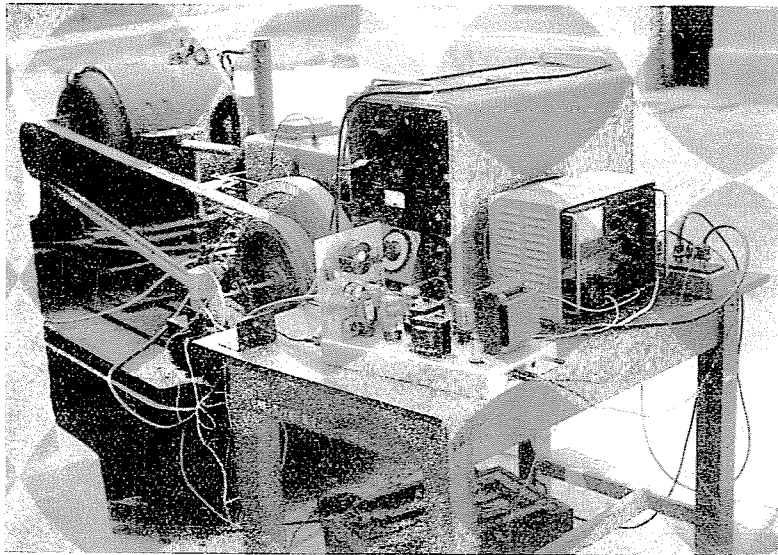


Abb. 1. Der zum Versuch vorbereitete Motor

Zur Klärung dieser Fragen wurde folgende Versuchseinrichtung benutzt:

Der zu untersuchende Motor war ein liegender Einzylinder-Viertakt-Dieselmotor mit direkter Einspritzung, Kolbenkammern und Verdampfungskühlung.

Nennleistung	8 PS
Maximales Drehmoment	7.3 mkp
Nenn Drehzahl	890 U/min
Hubvolumen	1460 cm ³
Kompressionsverhältnis	1 : 14

Der Versuchsmotor war gemeinsam mit dem Bremsdynamo auf die in Abb. 1 dargestellte Weise auf eine ca 5 t schwere Fundamentplatte montiert, so daß der Bremsdynamo vom Motor mit einem Keilriemen (1, beschleunigende Übersetzung) angetrieben wurde.

Die vom Bremsdynamo erzeugte elektrische Energie wurde in einem tragbaren Ohmschen Widerstand (Drahtwiderstand) in Wärmeenergie umgesetzt bzw. in diesem verbraucht. In den Erregerstromkreis des Bremsdynamos war ein spannungsregelnder Widerstand eingeschaltet. Die Motorleistung wurde durch Änderung der Erregerspannung geregelt.

Die Umgestaltung des Versuchsmotors auf Erdgas- bzw. auf Biogasbetrieb

Das ursprüngliche Saugrohr des Motors und der Saugkorb wurden durch ein um ca 300 mm längeres Saugrohr ersetzt, das mit oben verschließbaren Saugöffnungen versehen war und außerdem ein Gasregulierventil enthielt, das an den Regler der Einspritzpumpe angeschlossen war (Abb. 2).

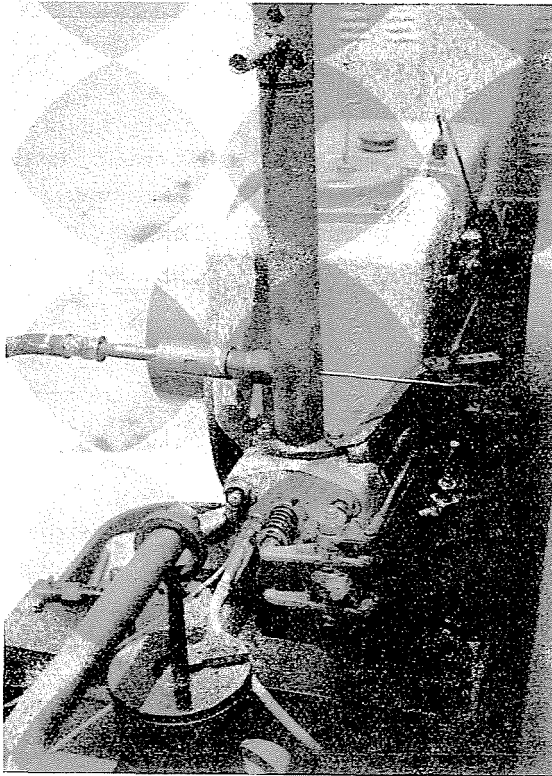


Abb. 2. Das umgestaltete Saugrohr des Versuchsmotors

Das Gas strömte durch eine austauschbare Öffnung mit vorgegebenem Durchmesser in das Saugrohr des Motors. In der Öffnung war ein beweglicher, doppelt-konischer Öffnungsregler angeordnet. Die Einstellung des Kegels, der

die Durchflußöffnung regelte, wurde vom Regulator in Abhängigkeit von der Motordrehzahl vorgenommen, und auf diese Weise wurde die Zusammensetzung des Gas-Luftgemisches geregelt (Abb. 3).

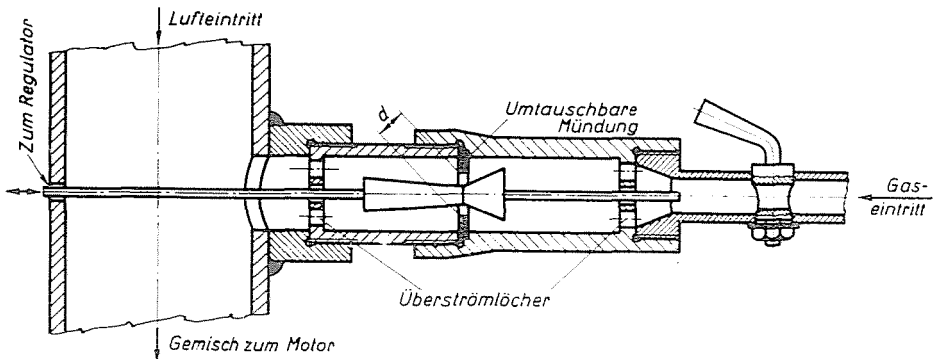


Abb. 3. Ventil zur Regulierung der Gasmenge

Die für die Zündung notwendige Gasölmenge konnte durch eine Stell-schraube dem Bedarf entsprechend eingestellt werden. Das Kompressionsverhältnis des Motors wurde während des Versuchs verändert.

Allgemeine Beschreibung des Verlaufes der Versuchsserie

Während der Versuche wurde der Motor in jedem Falle als »Dieselmotor« angeworfen, und erst nachdem die Betriebstemperatur erreicht war, auf gemischten Betrieb (Gasbetrieb) bei ständiger Verminderung des Gasöles und gleichzeitiger Öffnung des an das Saugrohr angeschlossenen Gashahnes umgeschaltet.

Das in den Zylinder eingespritzte Gasöl hatte lediglich das eingesaugte Biogas-Luftgemisch zu zünden. (Bemerkt sei hierzu, daß diese Ölmenge nicht einmal dazu ausreichte, den Motor im Leerlauf in Betrieb zu halten.) Der Verbrauch an Gasöl war einerseits vom Mischungsverhältnis Biogas-Luft und andererseits vom Kompressionsverhältnis abhängig. In beiden Fällen konnte beobachtet werden, daß der Verbrauch an Gasöl bei ärmerem Gasmisch oder bei kleinerem Kompressionsverhältnis stieg, d. h. bei ärmerer Mischung bzw. niedrigerem Kompressionsverhältnis wurde die Zündungsverzögerung größer, die Verbrennung erfolgte also langsamer. Die Einstellung der Zündölmenge wurde folgendermaßen vorgenommen: bei der Betriebsdrehzahl des Motors wurde in den Zylinder soviel Zündöl eingespritzt, daß der Verbrennungsdruck seinen Höchstwert im oberen Totpunkt erreichte, was mittels eines piezoelektrischen Druckindikators kontrolliert wurde.

Bei Schwächung des Gemisches oder Verminderung des Kompressionsverhältnisses verschob sich der Spitzendruck der Verbrennung bei gleichbleibender Zündölmenge hinter den oberen Totpunkt. In diesem Fall erhöhten wir die Zündölmenge so lange, bis der Spitzendruck der Verbrennung wieder im oberen Totpunkt seinen Höchstwert erreichte, womit wir den Verlauf der Verbrennung im Zylinder beschleunigten.

Die Meßdaten zeigten, daß die Zündölmenge etwa 7,5—33,5% des bei normalem Dieselmotor erforderlichen Kraftstoffes erreichte.

Während des gemischten Betriebs arbeitete der Motor in jeder Hinsicht zufriedenstellend. Er reagierte lebhaft auf die Zufuhr von Biogas. Eine schädliche Überhitzung, auffallender Verschleiß usw. war an keinem Bestandteil festzustellen, obwohl die Motorleistung im Verhältnis zum normalen Dieselmotor beim gemischten Biogasbetrieb und bei einem Kompressionsverhältnis von 1 : 14 um etwa 25% höher lag. Bei solchen Betriebsverhältnissen waren die aus dem Motor entweichenden Verbrennungsprodukte völlig farblos, ihr CO-Gehalt war minimal (0,01%), trotzdem die Luftüberschußzahl kaum die Grenze von $m = 1.0$ überstieg, der Motor also mit der theoretisch notwendigen Luftmenge arbeitete.

Reiner Biogasbetrieb

Mit den Versuchen suchten wir auch auf die Frage eine Antwort zu erhalten, ob die Zündung des eingesaugten Gases im Zylinder auf andere Weise zu lösen ist. Mit einem elektrischen Funken, d. h. mit einer Zündkerze wäre die Zündung natürlich möglich, ein derartiger Umbau des Motors würde jedoch

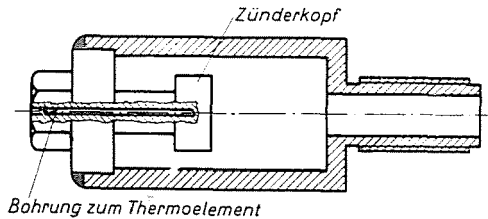


Abb. 4. Kompressionsverminderungskammer mit dem Zünderkopf

die Kosten überflüssig erhöhen und den Motorbetrieb komplizieren. Eine solche Ausführung wäre nur bei Benzinmotoren gerechtfertigt, bei Dieselmotoren wäre sie zu teuer und kompliziert. Es wurde deshalb versucht, das eingesaugte Gas durch einen entsprechend ausgestalteten Glühkopf zu zünden. Zu diesem Zweck entwickelten wir eine kompressionsraumvermindernde Kammer, in der der Glühkopf gemäß Abb. 4 angebracht war. Diese Kammer wurde an Stelle des Glühstiftes einmontiert, der vom Zylinderkopf entfernt worden war.

Das Anwerfen des Motors erfolgte auch in diesem Falle wie beim normalen Dieselmotor. Nachdem die Kammer auf etwa 500 °C erwärmt war,

konnte die Zufuhr von Zündöl gänzlich abgestellt werden, da die Zündung des im Zylinder eingesaugten Gas-Luftgemisches durch die hohe Temperatur des Zündkopfes gesichert war. Der Motor arbeitete bei solchen Betriebsverhältnissen ziemlich hart, und die Zündung erfolgte ungefähr $18-22^\circ$ vor dem oberen Totpunkt.

Der Spitzendruck der Zündung betrug nach dem Indikatorgramm minimal 100 atü, woraus auf einen ausgesprochen harten Motorbetrieb zu schließen war. Die aus dem Motor entweichenden Verbrennungsprodukte waren auch bei dieser Betriebsart gänzlich farblos und enthielten praktisch kein Kohlenmonoxyd. Der Motor lief unter den beschriebenen Betriebsverhältnissen nur kurze Zeit, da bei längerem Betrieb im Motor Beschädigungen hätten vorkommen können. Die Forschungsarbeit soll nach dieser Richtung fortgesetzt werden.

Der Versuchsmotor arbeitete unter den zuerst beschriebenen Betriebsverhältnissen etwa 500 Stunden lang. Nach Beendigung des Versuches wurde der Zylinderkopf abmontiert, und das Innere des Zylinders, der Kolbendeckel, die Ventile und Ventilsitze etc. wurden untersucht. An den angeführten Bestandteilen konnten keinerlei Veränderungen festgestellt werden; weder hatten sich Koks oder andere Verbrennungsprodukte abgelagert, noch war eine Verrussung eingetreten, und auch an den Ventilsitzen konnte kein Einbrand oder ein ungenügendes Schließen beobachtet werden. Aus der braunen Verfärbung des Auspuffventils war darauf zu schließen, daß die im Zylinder herrschende Temperatur höher war als bei Dieselbetrieb. Dies konnte auch durch theoretische Berechnungen nachgewiesen werden, doch waren am Ventil keine Brandspuren ersichtlich. Die im Zylinder herrschenden höheren Temperaturen hatte während des Betriebes auch das intensivere Sieden des Kühlwassers angezeigt, sobald der Motor um 20–25% über der Nennleistung gefahren wurde. Bei der fabrikmäßig vorgeschriebenen Nennbelastung war diese Erscheinung auch beim sogenannten gemischten Betrieb nicht zu beobachten.

Versuchsergebnisse

Um die gewonnenen Resultate auswerten zu können, wurden die Parameter des Versuchsmotors im reinen Dieselbetrieb ermittelt. Die Meßergebnisse sind in der *Abb. 5* dargestellt. Die Messungen wurden bei dem von der Fabrik eingestellten Kompressionsverhältnis von 1 : 14 und bei einer Belastung bis zur Rauchgasgrenze mit ausgeschaltetem Regulator vorgenommen. Aus den Meßergebnissen geht hervor, daß diese mit den katalogmäßig angegebenen Leistungs-, Verbrauchs-, Drehmoment- und anderen Daten übereinstimmten, der Motor also im einwandfreien Zustand war und somit für die weiteren Versuche geeignet erschien.

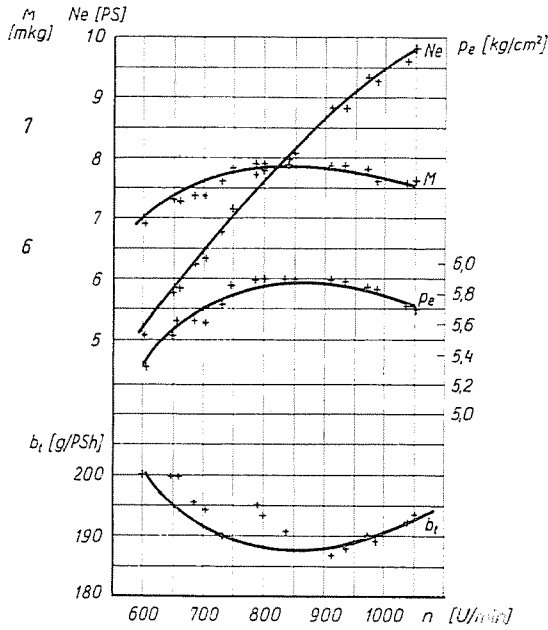


Abb. 5. Die Kennlinien des Versuchsmotors im Dieselbetrieb bei einem Kompressionsverhältnis von 1 : 14

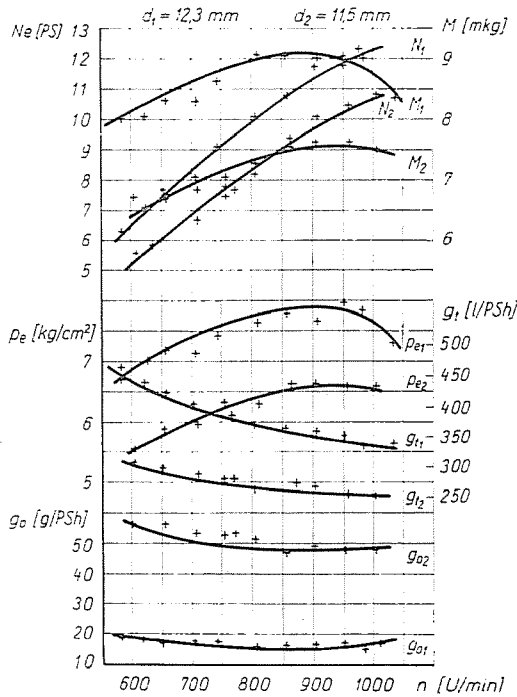


Abb. 6. Die Kennlinien des Versuchsmotors im gemischten Betrieb bei einem Kompressionsverhältnis von 1 : 14

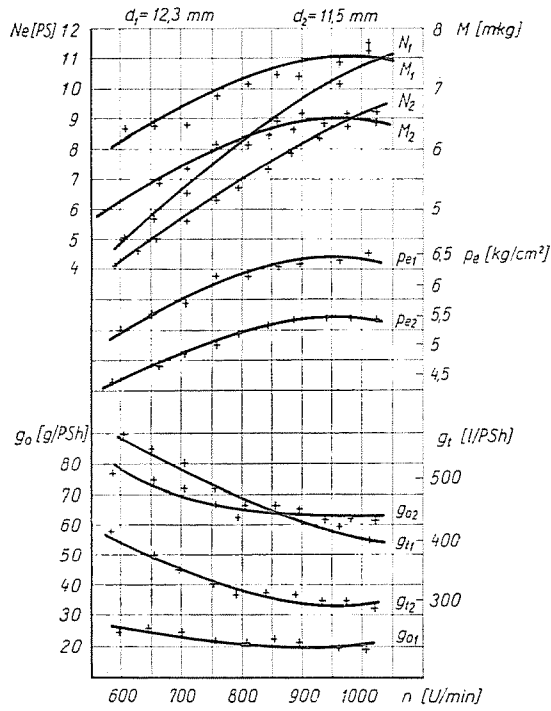


Abb. 7. Die Kennlinien des Versuchsmotors im gemischten Betrieb bei einem Kompressionsverhältnis von 1 : 12

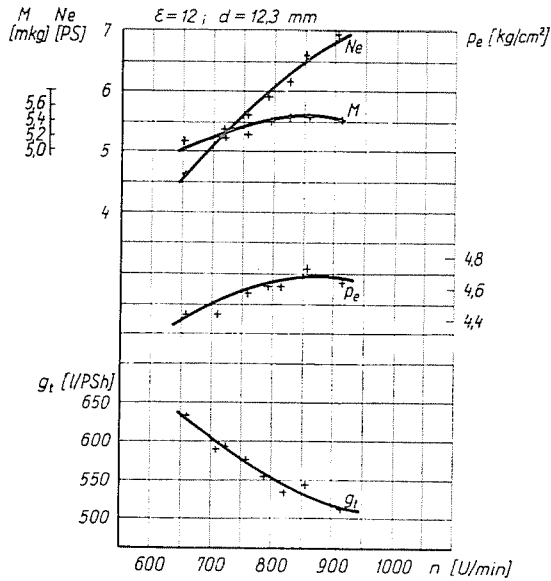


Abb. 8. Die Kennlinien des Versuchsmotors bei reinem Gasbetrieb und einem Kompressionsverhältnis von 1 : 12

Im gemischten Betrieb wurde zunächst das Kompressionsverhältnis des Motors zwischen 12 und 14 sowie der Öffnungsdurchmesser des Gasdurchlaßventils zwischen $d = 11,5 - 12,3$ mm geändert.

Im Diagramm sind die Extremwerte der Veränderungen aufgetragen. Während der Versuche wurden natürlich auch Zwischenwerte gemessen, diese liegen jedoch zwischen den angegebenen Extremwerten, weshalb von ihrer Erörterung abgesehen werden kann. In den *Abb. 6* und *7* sind die Meßergebnisse bei gemischtem Betrieb dargestellt. In den Diagrammen sind auch die den einzelnen Meßergebnissen zugehörigen Werte des Kompressionsverhältnisses und des Öffnungsdurchmessers des Gasdurchlaßventils angegeben. Die *Abb. 8* zeigt die Ergebnisse für den reinen Gasbetrieb.

Wie die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, scheint es unerlässlich zu sein, das Kompressionsverhältnis wegen der Veränderlichkeit des Wasserstoffgehalts im Gas ändern zu können. Hierauf kann natürlich nur eine neue Versuchsreihe eine befriedigende Antwort geben.

Die thermische Auswertung des reinen Diesel- und des gemischten Betriebes des Dieselmotors

Zur thermischen Auswertung des Dieselmotors mit reinem Diesel- und mit gemischtem sowie mit reinem Gasbetrieb wurden die durch die Versuche festgestellten Werte des wirtschaftlichen Wirkungsgrades in ein gemeinsames Diagramm aufgetragen. Auf Grund der *Abb. 9* können folgende Feststellungen gemacht werden:

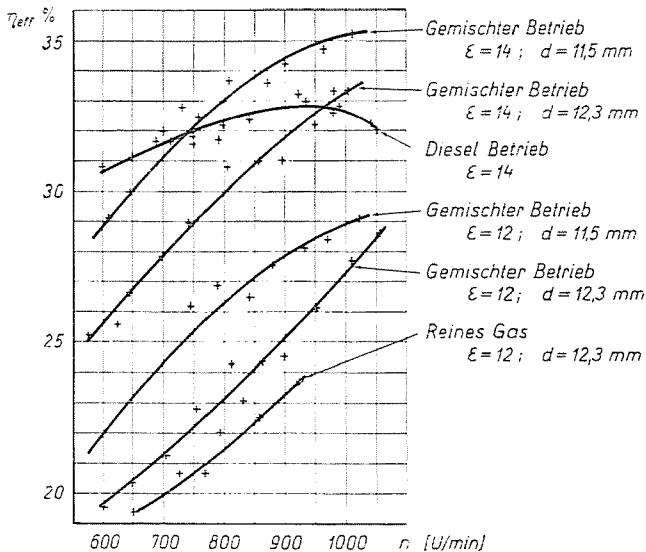


Abb. 9. Die effektive Änderung des Versuchsmotor-Wirkungsgrades unter verschiedenen Betriebsverhältnissen als Funktion der Drehzahl

Tabelle 1

Die thermisch berechneten wichtigeren Kennwerte bei reinem Dieselmotorbetrieb
sowie bei gemischtem Biogas-Dieselmotorbetrieb

	Reiner Dieselmotorbetrieb	Gemischter Betrieb
n (U/min)	990	980
N_e (PS)	9,36	12,41
V -Verhältnis	1 : 14	1 : 14
m	1,61	1,083
p_{\max} (kp/cm ²)	68	81
H_u (kcal/kg)	10136	5422
G_1 (kg Luft/kg Brennstoff)	23,39	8,405
V_1 (m ³)	19,475	8,0181
u_1 (kcal/kg)	49,9	52,1
φ (T_1) (kcal/Mol °K)	39,738	39,905
φ (T_2) (kcal/Mol °K)	44,978	45,155
T_2 (°K)	793,0	734,6
u_2 (kcal/kg)	139,6	140,3
i_2 (kcal/kg)	194,00	191,79
V_2 (m ³)	1,391	0,5727
p_2 (kp/cm ²)	38,65	36,15
i_3 (kcal/kg)	640,8	832,46
T_3 (°K)	2216,3	2587,8
V_3 (m ³)	2,32	0,8999
$\frac{V_3}{V_2}$	1,667	1,571
$\frac{V_1}{V_3}$	8,394	8,91
φ (T_4) (kcal/Mol °K)	48,327	50,577
T_4 (°K)	1237,7	1442,5
u_4 (kcal/kg)	254,5	325,07
η_t	50,275	52,60
b_t (kg/PSH)	0,1257	0,1200
p_t (kp/cm ²)	11,172	15,202

Selbst geringfügige Änderungen des Kompressionsverhältnisses beeinträchtigen den wirtschaftlichen Wirkungsgrad erheblich. Die Verschlechterung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades deutet darauf hin, daß der Dieselmotor auch bei gemischtem Betrieb mit dem größtmöglichen Kompressionsverhältnis gefahren werden muß. Diese Feststellung wird durch das Versuchsergebnis bekräftigt, nach dem die Wirkungsgradwerte bei gleichbleibendem Kompres-

sionsverhältnis im gemischten und im reinen Gasbetrieb voneinander nicht wesentlich abwichen.

Die Verschlechterung des Wirkungsgrades beim Dieselmotor mit reinem Gasbetrieb ist darauf zurückzuführen, daß sich das Mischungsverhältnis Gas-Luft infolge des Ausbleibens des Zündöls verändert, da das Biogas gegen Änderungen des Mischungsverhältnisses sehr empfindlich ist. Infolge der Verarmung des Gas-Luftgemisches nimmt die Verbrennungsgeschwindigkeit ab, und die Verzögerung der Verbrennung führt zur Verschlechterung des Wirkungsgrades.

Ein Vergleich der Wirkungsgrade im reinen und im gemischten Betrieb bei gleichbleibendem Kompressionsverhältnis läßt erkennen, daß der gemischt betriebene Dieselmotor bei höheren Drehzahlen bzw. bei höheren Leistungen einen besseren Wirkungsgrad aufweist als der reine Dieselmotor. Die Einspritzung einer größeren Zündölmenge (kleinere Gasdurchflußöffnung, weniger Gas), verbessert den Wirkungsgrad erheblich, was offenbar dem Umstand zuzuschreiben ist, daß die Verbrennung im Zylinder durch die größere Gasölmenge gefördert wird, bzw. daß die Verbrennung unter diesen Umständen besser geregelt werden kann. Diese Wirkung war auch im Bereich der niedrigeren Drehzahlen mit Sicherheit zu beobachten.

Bei höheren Drehzahlen ist die Verbesserung des Wirkungsgrades auf folgende Ursachen zurückzuführen.

a) Bei höheren Drehzahlen ergibt sich infolge der Wirbelbildung eine bessere Gemischbildung im Verbrennungsraum. Beim Motor mit gemischtem Betrieb ist diese Wirkung sehr beträchtlich, da die Gemischbildung länger anhält als beim reinen Dieselmotor.

b) Weiterhin läßt sich nachweisen, daß sich der Arbeitsprozeß des Motors vom Sabathé-Prozeß in Richtung zum Otto-Prozeß hin verschoben hat. Der Otto-Prozeß ergibt bei gleichbleibendem Kompressionsverhältnis einen besseren Wirkungsgrad. Diese Wirkung wird beim Dieselmotor für gemischten Betrieb infolge der mechanischen Verluste, die sich aus dem höheren Gasdruck ergeben, etwas verschlechtert.

Zur Kontrolle der obigen Ergebnisse wurden die thermischen Wirkungsgrade für den Fall eines wirklichen Arbeitsmediums auch theoretisch berechnet.

Bei diesen Berechnungen war ein vollkommener Diesel-Arbeitsprozeß bzw. ein gemischter Biogas-Diesel-Arbeitsprozeß und ein wirkliches Arbeitsmedium vorausgesetzt. In beiden Fällen wurden bei den Berechnungen die gleichen Werte gewählt, da der Kraftstoffverbrauch, die Luftmenge, usw. bekannt waren. Auf Grund dieser Werte konnten die thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmediums bestimmt werden.

Auswertung der in der Tabelle angeführten Kennwerte und deren Vergleich mit den Versuchsergebnissen

a) Das Kompressionsverhältnis war in beiden Fällen das gleiche. Trotzdem lag bei gemischtem Betrieb die Endtemperatur der Kompression um fast $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher und der Enddruck um $2,5\text{ atü}$ niedriger als beim reinen Dieseltreibstoff. Diese Abweichung ergibt sich daraus, daß die spezifische Wärme des Luft-Biogasgemisches bzw. deren Änderung bei höheren Temperaturen größer

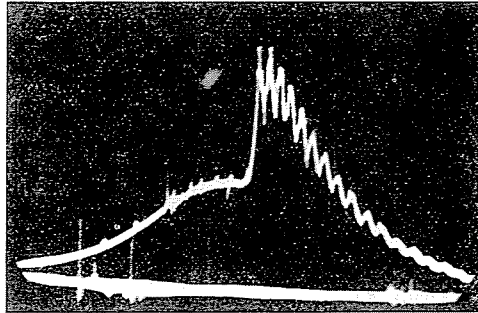


Abb. 10. Das Indikatorgramm des Versuchsmotors im Dieseltreibstoffbetrieb bei einem Kompressionsverhältnis von $1 : 14$

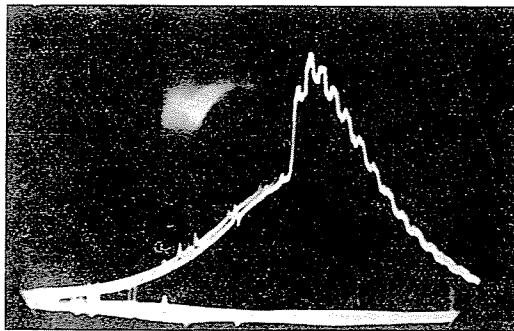


Abb. 11. Das Indikatorgramm des Versuchsmotors im gemischten Betrieb bei einem Kompressionsverhältnis von $1 : 14$

ist als die von Luft. So beträgt z. B. das Verhältnis der spezifischen Wärmen des Biogas-Luftgemisches zu derjenigen der Luft bei $300\text{ }^{\circ}\text{K}$ $1,17$, bei $800\text{ }^{\circ}\text{K}$ hingegen $1,35$.

Dieselbe Erscheinung zeigt auch die Abweichung der Kompressionskurven in den Indikatorgrammen der beiden Betriebszustände (Abb. 10 und 11). Aus diesen Abbildungen ist zu ersehen, daß die Richtungstangente der Kompressionskurve bei gemischtem Betrieb des Dieselmotors am Ende der Kompression kürzer ist als beim reinen Betrieb.

Das Gesagte wird auch durch die während des Versuches beobachtete Erscheinung bekräftigt, daß der Motor nach einem ca. 5 Minuten dauernden reinen Dieselmotorbetrieb — sobald der Motor für diesen genügend heiß war —, bei Umstellung auf Gas-Luftgemisch erstickte bzw. eben wegen des Absinkens der Kompressions-Endtemperatur keine Selbstzündung erfolgte. Diese Erscheinung war bei genügend erhitztem Motor nach ca. 15—20 Minuten reinem Dieselmotorbetrieb nicht mehr zu beobachten.

b) Sowohl die theoretischen Berechnungen, als auch die Versuchsergebnisse zeigen einwandfrei, daß sich der Arbeitsprozeß des gemischt betriebenen Dieselmotors dem Otto-Prozeß näherte. Insbesondere wird das durch die höhere Endtemperatur der Verbrennung im gemischten Betrieb sowie durch die Verminderung des Wärmeüberganges bei konstantem Druck bewiesen, was durch die Verminderung des Quotienten V_3/V_2 bestätigt wird.

c) Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse fiel der bessere Wirkungsgrad des gemischt betriebenen Dieselmotors bei beinahe gleichen Betriebsverhältnissen (maximale Drehzahl und zugehörige maximale Belastung) auf.

Auf Grund der durchgeführten thermischen Berechnungen für den idealen, aber mit wirklichem Arbeitsmedium arbeitenden Arbeitsprozeß ergab sich ein besserer Wirkungsgrad für den gemischten Diesel-Arbeitsprozeß. Diese Verbesserung des Wirkungsgrades ergibt sich aus der erwähnten Annäherung des Arbeitsprozesses des gemischten Dieselmotors an den Ottoschen Arbeitsprozeß. Im Hinblick auf die Verschlechterung des mechanischen Wirkungsgrades infolge des höheren mittleren Druckes, etc. muß die Verbesserung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades notwendigerweise geringfügiger sein, als sie für den Fall des theoretischen Arbeitsprozesses nachgewiesen werden konnte.

Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, daß der Dieselmotor für gemischten Erdgas- bzw. Biogasbetrieb mit besserem Wirkungsgrad arbeitet als der Motor für reinen Dieselmotorbetrieb, und dies besonders bei ständig großen Belastungen. Die Motoren für gemischten Betrieb scheinen sich also für den Antrieb von elektrischen Generatoren oder von Pumpen für die landwirtschaftliche Bewässerung außerordentlich gut zu eignen.

Schlußfolgerungen für den Betrieb von Dieselmotoren im gemischten System

Die Versuchsreihe hat gezeigt, daß die Dieselmotoren für gemischten Betrieb besondere Aufmerksamkeit verdienen.

In Übereinstimmung mit den Literaturangaben konnten im gemischten Betrieb um etwa 15—20% höhere Leistungen erzielt werden als mit reinem Diesel-Betriebsstoff, wie dies durch die Versuche eindeutig bestätigt wurde. Soll der Motor nicht überlastet werden bzw. läßt die Konstruktion des Motors die Entnahme einer höheren Leistung nicht zu und will man bei Erdgas- oder

Biogasbetrieb dieselbe Leistung erhalten wie im reinen Dieselbetrieb, genügt die Regelung des Motors auf den wirtschaftlichen Betrieb. In solchen Fällen muß im Motorbetrieb ein größerer Luftüberschuß zugelassen werden, der auch insofern günstig ist, als er die Wärmebelastung des Kolbenbodens und des Auspuffventils vermindert. Ungünstig wirkt sich aber diese Einstellung dadurch aus, daß sowohl das Erdgas als auch das Biogas auf Abweichungen vom richtigen Verhältnis des Gas-Luftgemisches sehr empfindlich reagieren. Bei einem armen Gemisch verlangsamt sich der Verbrennungsprozeß, was die Regulierbarkeit des Motors beeinträchtigt. Ferner verschlechtert sich auch der Wirkungsgrad des Motors; bei Teilbelastungen und unter einer bestimmten, minimalen Belastung wird der Motorbetrieb wegen der langsamen Verbrennung des zu armen Gas-Luftgemisches labil.

Das Wesen des Diesel-Gasbetriebes besteht darin, daß vom Motor ein Gemisch aus Erdgas bzw. Biogas und Luft angesaugt, verdichtet und durch eine kleinere Menge Gasöl gezündet wird. Dieser Kraftstoff wird durch eine normale Diesel-Einspritzpumpe am Ende des Verdichtungshubes in den Zylinder eingespritzt. Dieser Arbeitsprozeß ist dadurch gekennzeichnet, daß sich der Verbrennungsprozeß bei einem zu armen Gemisch einem Zustand nähert, der nicht mehr geregelt werden kann. Die Zündungsverzögerung vergrößert sich, und weicht die Luftüberschußzahl vom optimalen Wert ab, verbreitert sich die Verbrennungszone.

Die Verschiebung des Verbrennungsprozesses vom regelbaren Zustand ist vor allem durch die Erhöhung der Druckzunahme $\frac{dp}{dz}$ und des Spitzendruckes der Verbrennung gekennzeichnet. Durch die Erhöhung der Luftüberschußzahl und durch richtige Wahl des Zündzeitpunktes können die Werte $\frac{dp}{dz}$ und p_z auf den für den Motorbetrieb zulässigen Wert gebracht werden, ohne daß die anderen Kennwerte des Motors herabgesetzt werden müßten.

Die Regelung des Dieselmotors für gemischten Betrieb ist ähnlich jener des reinen Dieselmotors. Die Möglichkeit der qualitativen Regelung ist gegenüber der des Otto-Motors größer, da die Selbstzündung des Brennstoffes wirksamer ist als die Kerzenzündung. Die gezündeten Tröpfchen bilden gleichzeitig an mehreren Stellen brennende Knotenpunkte, und zwar nicht an den kalten Wänden, sondern inmitten des Luftgemisches. Solcherart bildet der gemischt betriebene Dieselmotor einen Übergang zwischen dem Otto-Motor und dem reinen Dieselmotor, da er ein Gemisch ansaugt, dieses aber durch die Verdichtung zündet.

Der Arbeitsgang eines Gasmotors, der nach dem Diesel-Arbeitsprozeß arbeitet, wird durch die Ausbildung des Verbrennungsraumes wesentlich beeinflusst. Nach Literaturangaben liefern die besten Resultate die Dieselmotoren mit direkter Einspritzung.

Das zulässige Kompressionsverhältnis wird durch die Klopf Eigenschaften des Brennstoffes (Oktanahl) begrenzt. Im Erdgas und Biogas ist die Gegenwart von Wasserstoffgas (H_2) nicht erwünscht, da es die Verdichtungswilligkeit des Gases beeinträchtigt.

Zur Ausschaltung des Klopfens läßt sich bei Dieselmotoren statt der konstruktiven Änderungen, die die Herabsetzung des Kompressionsverhältnisses bezwecken, durch Zündungsverzögerung sowie durch Erhöhung der Luftüberschußzahl bis zu einem gegebenen Grenzwert ein ähnliches Ergebnis erzielen. Die Zündungsverzögerung hat nahezu die gleiche Wirkung wie die Herabsetzung des Kompressionsverhältnisses, nämlich eine Verlangsamung der Verbrennung. Die Zündung erfolgt hinter dem oberen Totpunkt des Kolbens, dies aber beeinträchtigt die Leistung des Motors und verschlechtert den wirtschaftlichen Wirkungsgrad. Es ist also vorteilhafter, ein ärmeres Biogasmisch zu verwenden, da hierdurch nur die Leistung nachteilig beeinflusst wird.

Der minimale Zündölverbrauch des Motors wird durch den Energiebedarf des Verbrennungsprozesses bestimmt. Unter solchen Betriebsverhältnissen betrug der Zündölverbrauch bei mit Vollast laufenden Motoren mit ungeteiltem Verbrennungsraum im gemischten Betrieb nur ungefähr 8—14% des Verbrauches bei reinen Dieselmotoren. Nach Literaturangaben erhöht sich der Zündölverbrauch bei Dieselmotoren mit geteiltem Brennraum wegen der Schwierigkeit, den verflüssigten Brennstoffstrahl in die Mitte des Gas-Luftgemisches zu bringen, um 20—25%.

Im Betrieb liegt der Verbrauch im allgemeinen über den während des Versuches gemessenen Werten, da in der Praxis bei Teilbelastungen die optimale Regelung schwer gesichert werden kann. Außerdem kann der kalte Motor in jedem Fall nur mit Diesel-Kraftstoff — Gasöl — angelassen und erwärmt werden. Bei schwankenden Belastungen vermag der Sicherung der kleinsten erforderlichen Diesel-Kraftstoffmenge auch die Regelbarkeit der Einspritzpumpe eine Grenze zu setzen.

Der Versuch hat auch bewiesen, daß Dieselmotoren mit direkter Einspritzung leicht auf Biogas- bzw. Erdgasbetrieb umgebaut werden können, u. zw. so, daß der umgebaute Motor im gegebenen Fall wahlweise als vollwertiger Dieselmotor bzw. als mit Biogas betriebener Motor arbeiten kann.

Das Anfahren sowie die Erwärmung auf die Betriebstemperatur müssen in jedem Fall im Dieselbetrieb erfolgen. Die Umschaltung auf Biogas- bzw. auf Erdgasbetrieb erfolgt durch allmähliche Verminderung des Diesel-Brennstoffes bzw. durch allmähliche Zugabe von Gas.

Für die Zündung des im Zylinder angesaugten Gas-Luftgemisches gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- am Ende der Verdichtung durch Einspritzen von Diesel-Zündöl;
- durch einen im Zylinder bzw. im Verbrennungsraum entsprechend angeordneten Wärmeakkumulator;

— durch elektrische Hochspannungszündung, wenn es sich um einen umgebauten Benzinmotor handelt.

Bei Dieselmotoren kommen nur die beiden ersten Lösungen in Betracht, da die Montage einer besonderen elektrischen Zündung die Umbaukosten des Motors überflüssig erhöhen würde.

Bei Betrieb mit stark schwankender Belastung erscheint die Zündung mittels Diesel-Brennstoff die vorteilhaftere Lösung zu sein. Bei verhältnismäßig gleichbleibender Belastung kann auch die Zündung mit dem Wärmeakkumulator entsprechen, doch bedarf diese Frage noch der experimentellen Klärung.

Im stabilen Betrieb kann ein Teil der Verlustenergie der Verbrennungsgase und der Kühlung zurückgewonnen und vorteilhaft zur Heizung der das Biogas erzeugenden Einrichtung oder gelegentlich auch für andere Zwecke, wie z. B. zur Heizung von Räumen usw. verwendet werden.

Im Laufe der Versuche konnte festgestellt werden, daß sich der Arbeitsprozeß des Motors vom Sabathé-Arbeitsprozeß in Richtung zum Otto-Prozeß hin verschoben hat, wodurch bei gleichen Kompressionsverhältnissen ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden konnte. Diese Wirkung wurde bei Dieselmotoren für gemischten Betrieb dadurch etwas abgeschwächt, daß die mechanischen Verluste wegen des höheren Gasdruckes größer sind.

Bei dem gegebenen Versuchsmotor konnten wir beobachten, daß sich bei Betrieb mit der Nennzahl und Belastung der thermische und effektive Wirkungsgrad des Motors erhöhte.

Die beschriebene Versuchsserie hat das gestreckte Ziel praktisch erreicht und auch auf Detailfragen eine Antwort erteilt. Demnach können die in unserem Land gebauten Dieselmotoren auf Dieselmotoren für gemischten Betrieb, die sogenannten Diesel-Gasmotoren umgebaut werden.

Zusammenfassung

Die Abhandlung gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeit und die Bedeutung der Umstellung der im Inland erzeugten Dieselmotoren auf gemischten (Diesel-Gas-) Betrieb, unter besonderer Berücksichtigung der sozialistisch organisierten Landwirtschaft. Im Anschluß an das behandelte Thema werden die Versuchsergebnisse, die an dem von PRÉKO gebauten MIB-Dieselmotor in einzylindriger, liegender Ausführung mit direkter Einspritzung festgestellt wurden, zusammenfassend besprochen und ausgewertet.

Literatur

- Gépipari Enciklopédia: Band X S. 131—138 und 237—260 (1957).
 HRAPATSCH, G. K.: Energetičeskij Bjulleten, Moskwa S. 14—17 (1956).
 JUREK, A.: *Belsőégésű motorok* (Verbrennungsmotoren). S. 548—558 (1955).
 LEIKER, M.: Gasmotoren, 22—41 (1953).
 MTZ Motortechnische Zeitschrift: »Bihugas« als Motoren-Kraftstoff. 1, 26 (1959).

- SÁNDOR, I.: Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Anwendung von Biogas und Erdgas als Motorbrennstoff. Dissertation, 1962, S. 53—90.
- SCHMIDT, K.: Verbrennungsmotoren. S. 232—237 (1960).
- SITKEI, GY.: Die Gemischbildung und der Brennverlauf in Dieselmotoren, S. 122—149 (1960).
- TERPLÁN, S.: Untersuchungen an Kraftfahrzeugen, S. 17—137 (1961).
- The Oil Engine and Gas Turbine: Dual-Fuel Engine Operating on Farm Gas. Vol. 30. No. 346. S. 137 (1962).
- The Oil Engine and Gas Turbine: Dual-Fuel Enterprise in Gas-Supply Duties. Vol. XXIV. No. 275. S. 98—101. (1956).

Dr. Imre SÁNDOR, Budapest, III., Mátyáshegyi u. 15/a.