

THEORETISCHE UND PRAKTISCHE ERGEBNISSE VON VERSUCHEN MIT DIESEL-GASMOTOREN

Von

I. SÁNDOR

Lehrstuhl für Gasmaschinen und Automobile, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 7. Dezember, 1967)

Vorgelegt von Prof. Dr. A. JUREK

In der Verwendung der auf der Erde verfügbaren Energievorräte hat das 20. Jahrhundert einschneidende Wandlungen gebracht. Die Vorrangstellung, die die Kohle lange Zeit eingenommen hatte, ist auf das Erdöl und Erdgas übergegangen.

Die Suche nach Erdöl- und Erdgasvorkommen hat in Ungarn Erdgaslagerstätten von beachtlicher Größe erschlossen. Ein Teil des hier gewonnenen Erdgases ist frei von Verunreinigungen, ein anderer Teil enthält Verunreinigungen; sein Gehalt an Kohlendioxyd reicht von einigen Zehnteln bis 94 Vol.-%, sein Fremdstoffgehalt schwankt mithin innerhalb weiter Grenzen. Je für sich sind die im Erdgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe und das Kohlendioxyd für die Volkswirtschaft überaus wertvoll, gemischt stören sie jedoch gegenseitig ihre Verwertung. Über eine gewisse Grenze hinaus schränkt der Gehalt an Kohlendioxyd den Verwendungskreis des Erdgases ein, ja unter Umständen macht ein hoher Kohlendioxydgehalt die Verwendung des Erdgases geradeswegs unmöglich.

Bis zu einem Anteil von 5—8 Vol.-% beeinträchtigt das Kohlendioxyd die Brenneigenschaften des Erdgases nicht.

Die hier angestellten Versuche haben gezeigt, daß im Dieselmotor selbst Erdgas mit einem Kohlendioxydgehalt von 60—65 Vol.-%, im Ottomotor hingegen solches mit einem Kohlendioxydgehalt von 45—50 Vol.-% in befriedigender Weise verbrennt.

Im Hinblick auf die großen Erdgasvorkommen im Lande und auf die ständige Zunahme der Biogasproduktion im Gefolge der sozialistischen Umstellung der Landwirtschaft hat es sich als nötig erwiesen zu prüfen, welche Ergebnisse sich durch Verwendung von Erd- und Biogas zum Antrieb von Motoren heimischer Bauart erzielen lassen. In Frage kommen die liegenden Einzylinder-MIB-Dieselmotoren mit direkter Einspritzung, wie sie vornehmlich für die Landwirtschaft gebaut werden, sowie der Vorkammer-Dieselmotor und der Benzinmotor der Automobilfabrik Csepel. Auf diese Weise war es möglich, Motoren mit direkter Einspritzung und mit unterteiltem Brennraum und sowohl Diesel- als auch Benzinmotoren auf ihr Verhalten bei Antrieb durch Gas gleichzeitig zu untersuchen.

Die Versuche mit gemischtem Erd- bzw. Biogasbetrieb von Dieselmotoren reichen in Ungarn erst auf einige Jahre zurück. Anderwärts auf der Welt sind hingegen auf diesem Gebiet nach Literaturangaben bereits bedeutende Fortschritte erzielt worden, und die Zahl der mit Gas angetriebenen Motoren kann auf mehrere hunderttausend geschätzt werden.

In Ungarn erscheint der Gebrauch von Dieselmotoren aus folgenden Gründen gerechtfertigt, ja geboten:

Vielfach stehen Erdgasvorkommen in engster Beziehung zu Erdöllagerstätten. Sie werden in solchen Fällen als Begleitgas zusammen mit dem Erdöl gefördert, häufig stellt also das Erdgas ein Nebenprodukt der Erdölgewinnung dar. Da es an das Öl chemisch nicht gebunden ist, kann es von diesem unschwer abgeschieden werden. Sofern die Erdgasleitung bis zum Ölfeld ausgebaut ist, erscheinen Abtransport und Verwendung gelöst. Ist man hingegen — aus technischen oder Rentabilitätsgründen — im gegebenen Falle nicht darauf vorbereitet, das aufbrechende Gas zu fassen und abzuleiten, wird es an Ort und Stelle vernichtet, verbrannt. Das so verlorengehende Erdgas ließe sich an Ort und Stelle, sei es zum Antrieb von Arbeitsmaschinen, sei es zur Erzeugung elektrischer Energie, verwenden.

Zur Zeit stehen — in erster Linie aus hygienischen Gründen — zum Schutz der natürlichen Gewässer, der Flüsse und Seen rund 30 Abwasserkläranlagen in Bau, in denen die an den Rechenanlagen abgesetzten Sinkstoffe bzw. der Abwasserschlamm der Gärung durch Methanbakterien zugeführt wird.

Das in diesen Anlagen gewonnene Biogas ließe sich in Diesel- oder in Motoren mit Fremdzündung nutzen. Auch könnten diese Anlagen ihren Eigenbedarf an elektrischer und anderweitiger Energie aus dem von ihnen selbst gewonnenen Biogas decken.

Die bereits erwähnte sozialistische Umstellung in der ungarischen Landwirtschaft hat zu einer Konzentration des Viehbestandes auf größere Betriebseinheiten geführt, die im Verein mit anderen günstigen Umständen die Mechanisierung des Transportes der anfallenden großen Stallungsmengen ermöglicht. Selbstverständlich wird auch hier wie anderwärts der Stallung der weiteren Nutzung zugeführt.

Nach Schrifttumsangaben kann ein landwirtschaftlicher Großbetrieb mit einer nutzbaren Ackerfläche von 230 ha und einem Viehbestand von 1000 Großvieheinheiten aus Dung und Abfällen anderer Art jährlich rund eine halbe Million Nm³ Biogas gewinnen. Diese Gasmenge darf nach vorsichtiger Schätzung etwa 330 t Gasöl gleichgesetzt werden, eine Zahl, die erkennen läßt, daß in der Landwirtschaft heute noch ungenützte Reserven verborgen liegen, deren Größe sich noch kaum erfassen läßt.

Die zunehmende Mechanisierung der landwirtschaftlichen Arbeiten, das Steigen des Lebensstandards der bäuerlichen Bevölkerung erfordern eine

immer bessere Versorgung des landwirtschaftlichen Sektors mit Energie im allgemeinen und mit elektrischer Energie im besonderen. Dieser gesteigerte Bedarf läßt sich durch Diesel- oder Ottogasmotoren befriedigen, die mit dem in der Landwirtschaft selbst gewonnenen Biogas oder — wo solches vorhanden ist — mit Erdgas betrieben werden.

Um diese Art der Energieversorgung je eher einführen zu können, müssen ernste Anstrengungen unternommen werden, damit der Volkswirtschaft tunlichst bald Diesel-Aggregate zur Verfügung stehen, die wahlweise auch mit heimischem Erd- oder Biogas angetrieben werden können. Die Nachfrage nach derartigen Motoren für gemischten Betrieb ist heute noch relativ gering, weshalb sie von der heimischen Industrie noch nicht gebaut werden. Ebenso wenig kann mit ihrem Import gerechnet werden. Für die Motorenfabriken wäre andererseits die Einzelfertigung derartiger Motoren in verhältnismäßig niedriger Stückzahl naturgemäß unrentabel. Aus diesem Grunde muß die Entwicklung von Diesel- und eventuell auch von Ottomotoren für den erwähnten gemischten Betrieb angestrebt werden, die von den in Serie gebauten Baumustern tunlichst wenig abweichen.

Entsprechend setzte sich die hier zu erörternde Forschungsarbeit das Ziel, die in Ungarn gebauten Diesel- bzw. Ottomotoren so umzugestalten, daß sie fallweise mit beiden Kraftstoffen, d. h. sowohl mit Gas (Erd- oder Biogas) oder auch mit Erdöl (Benzin) gefahren werden können. Sie müssen mithin auch nach der Umstellung vollwertige Diesel- bzw. Ottomotoren bleiben, ebenso aber auch mit Gas anzutreiben sein. Die Verfolgung dieses Zieles warf folgende Teilprobleme auf:

1. Läßt sich der Antrieb der gegenwärtig in Ungarn gebauten Diesel- bzw. Benzinmotoren durch Erd- und Biogas lösen?
2. Kommt eine Lösung in Frage, die es ermöglicht, die Einheiten sowohl als vollwertige Diesel- bzw. Benzinmotoren als auch als Motoren für gemischten Erd- und Biogasbetrieb einzusetzen?
3. Auf welche Weise kann die Entzündung des Gases im Motor bewerkstelligt werden?
4. Mit welchem wirtschaftlichen Wirkungsgrad arbeiten die Motoren?
5. In welchem Verhältnis zueinander stehen die mit dem Gas bzw. mit dem Zündöl eingeleiteten Kalorienmengen?
6. Mit welcher minimalen Zündölmenge wird die Konstruktion zu rechnen haben?
7. Die Dauerprobe wird das Verhalten der Motoren im Betrieb zu prüfen haben (Drehzahl, Leistung, Moment, Stabilität usw.).
8. Welche Auswirkungen wird der Betrieb mit Gas auf den Verbrauch an Schmieröl und auf dessen Verschmutzung haben?
9. Welche Abnutzung werden die beweglichen und rotierenden Teile des Motors nach der Dauerprobe aufweisen?

10. Eine Prüfung wird die Klarstellung auch jener Frage erfordern, wie die mit den Auspuffgasen und die mit dem Kühlwasser abgehenden Restwärmeenergien genutzt werden können.

Versuchseinrichtungen

Für die Zwecke der hier aufgezählten Untersuchungen wurde eine Versuchsanlage eingerichtet. Zunächst wurde ein liegender Einzylinder-Viertakt-Kolbenkammer-Dieselmotor Typ MIB mit direkter Einspritzung und

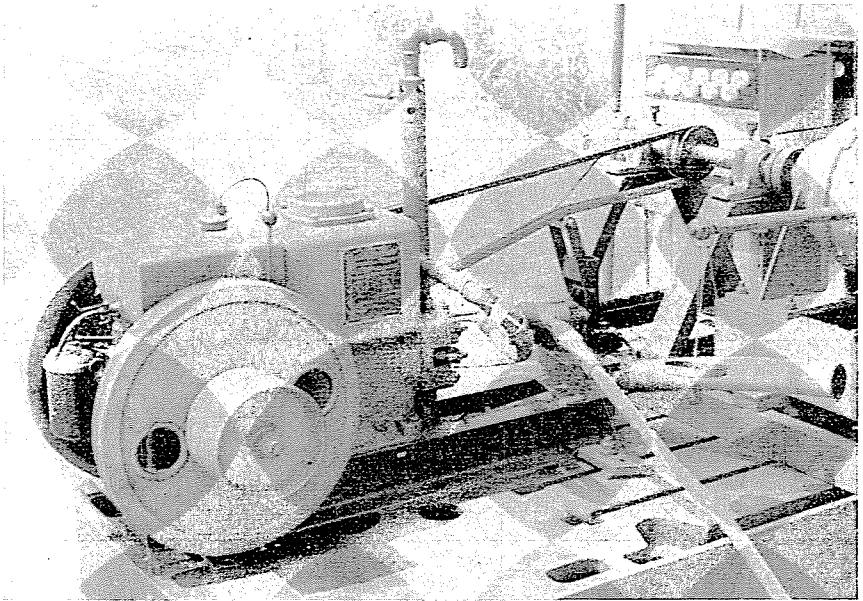


Abb. 1. Der Dieselmotor MIB, für die Untersuchungen vorbereitet

Verdampfungskühlung untersucht (Abb. 1). Der Motor hatte folgende Kennwerte:

- Nennleistung 8 PS,
- Nenndrehzahl 890 U/min,
- größtes Moment 7,3 mkp (bei 800 U/min),
- Hubraum 1460 cm³,
- Verdichtungsverhältnis 14 : 1.

Der Versuchsmotor trieb einen Pendeldynamo an, wobei die von diesem erzeugte elektrische Energie durch Widerstände in Wärmeenergie umgesetzt bzw. verzehrt wurde. Im Erregerstromkreis des Dynamos lag ein Spannungs-

regler, mit dem durch Einstellung entsprechender Erregerstrom-Spannungswerte die Motorleistung geregelt werden konnte (Abb. 2).

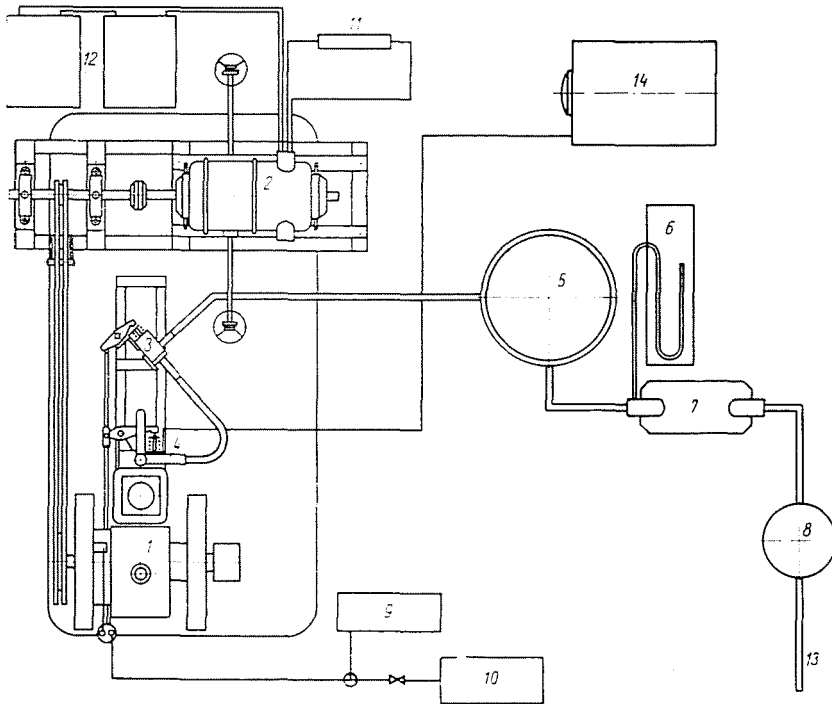


Abb. 2. Anordnung der Einrichtung für die Untersuchungen am MIB-Motor

1. Motor — 2. Gleichstromgenerator — 3. Gassteuerventil — 4. Gasmengenregelungsventil — 5. Gasausgleichsbehälter — 6. Flüssigkeitsmanometer — 7. Gasmesser — 8. Gasfilter mit Sperrwasser — 9. Gaszähler — 10. Gasölbehälter — 11. Regelwiderstand — 12. Belastungswiderstand — 13. Gasleitung — 14. Piezoelektrischer Druckanzeiger

Sodann wurde ein wassergekühlter Vierzylinder-Viertakt-Vorkammer-Dieselmotor Bauart DT-413 der Automobilfabrik Csepel (Abb. 3) mit den Kennwerten

- Nennleistung 60 PS,
- Nenndrehzahl 1650 U/min,
- größtes Moment 28 mkp (bei 1250 U/min),
- Hubraum 5320 cm³,
- Verdichtungsverhältnis 21 : 1

geprüft.

Die dritte Einheit war ein wassergekühlter Vierzylinder-Viertakt-Benzinmotor, Bauart Csepel B-413 mit Funkenzündung. Seine Kennwerte waren:

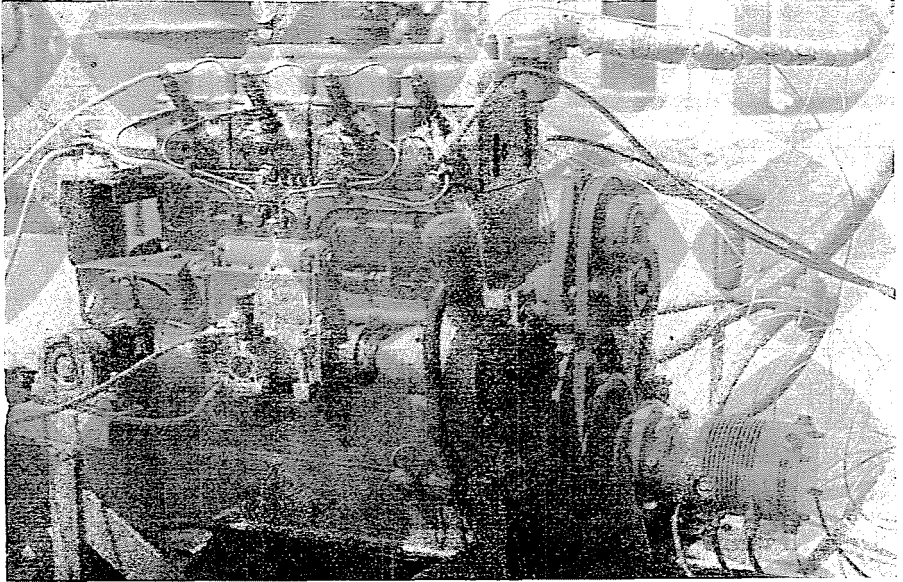


Abb. 3. Der Csepel-Dieselmotor. für die Versuche vorbereitet

- Nennleistung 85 PS,
- Nenndrehzahl 2300 U/min,
- größtes Moment 34 mkp (bei 1400 U/min),
- Hubraum 5320 cm³,
- Verdichtungsverhältnis 6,1 : 1.

Zum Bremsen dieses und des zweiten Motors wurde eine Junkerssche Wasserbremse, Fabrikat Schönebeck (Abb. 4) verwendet.

Umbau des Versuchsmotors auf Erd- bzw. Biogasbetrieb und die Erfahrungen mit diesem

Für die Zwecke der oben angedeuteten Versuche wurde ein Umbau gewählt — und auch die spätere Verwendung sollte auf dieser Grundlage geschehen —, bei dem in den Motor lediglich leicht herstellbare Teile eingebaut werden (etwa Gasmischer), durch die die Serienausführung keine wesentliche Veränderung erfährt. Diese Lösung trägt auch den Interessen der künftigen Benutzer Rechnung, da an der ursprünglichen Ausführung des Dieselmotors keine wesentlichen Änderungen vorgenommen zu werden brauchen. Die für den Erdgas-Diesel- bzw. für den gemischten Biogasbetrieb erforderlichen Zusatzeinrichtungen (Mischer, Druckminderer, Gemischregler usw.)

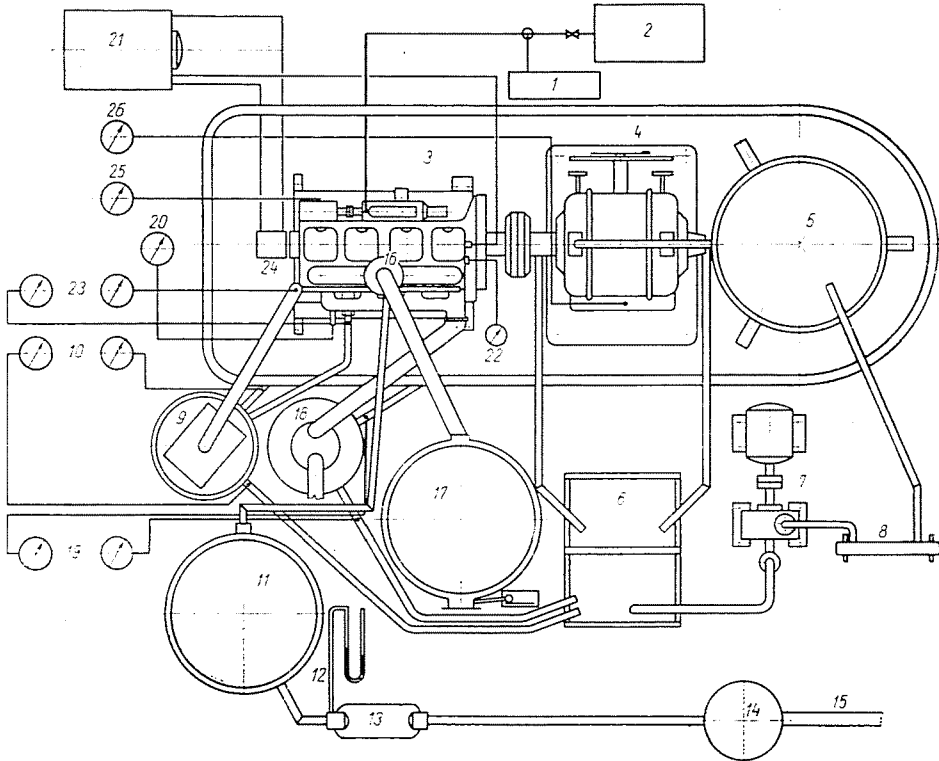


Abb. 4. Anordnung der Einrichtungen für die Untersuchungen am Csepel-Diesel- und am Csepel-Benzinmotor

1. Gesölzähler — 2. Gasölbehälter — 3. Motor — 4. Wasserbremse — 5. Bremswasserbehälter — 6. Wassersammelbehälter — 7. Wasserpumpe mit Elektromotor — 8. Bremswasserkühler — 9. Bremswasserwärmeaustauscher — 10. Thermometer zu 9 — 11. Gas-Ausgleichsbehälter — 12. Flüssigkeitsmanometer — 13. Gasmesser — 14. Mit Sperrwasser kombinierter Gasfilter — 15. Gasleitung — 16. Gas-Luft-Mischer mit Luftfilter — 17. Luft-Ausgleichsbehälter mit Meßflansch — 18. Wärmeaustauscher für das Auspuffgas — 19. Thermometer zu 18 — 20. Auspuffgas-Thermometer — 21. Piezoelektrischer Druckanzeiger — 22. Öldruckmesser — 23. Kühlwasser-Thermometer — 24. Indikatorrelais — 25. Öl-Thermometer — 26. Bremswasser-Thermometer

können auch in einer mit Werkzeugen mittelmäßig ausgestatteten Instandhaltungs- und Reparaturwerkstatt mit geringem Material- und Zeitaufwand hergestellt werden.

In die Saugleitung der Motoren wurden Gasmengen-Regelventile eingebaut, die an den Regulator der Einspritzpumpe angeschlossen waren. Das Gas gelangte durch eine auswechselbare Düse mit Kegelventil in den Motor. Der Motordrehzahl entsprechend verstellte der Regler das Kegelventil der Durchflußöffnung automatisch in die gewünschte Lage, womit die Qualität des in den Motor gelangenden Gas-Luft-Gemisches geregelt werden konnte (Abb. 5, 6, 7 und 8).

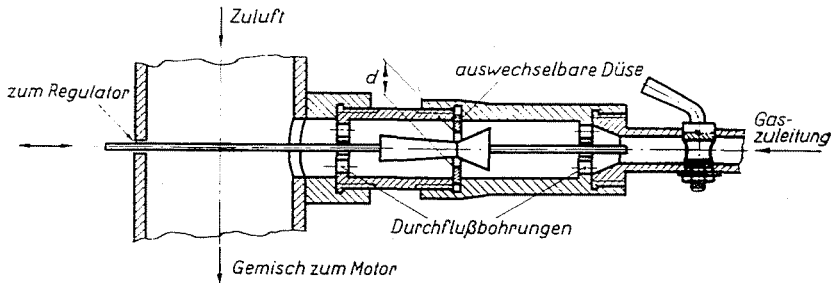


Abb. 5. Ventil zur Regelung der Gasmenge

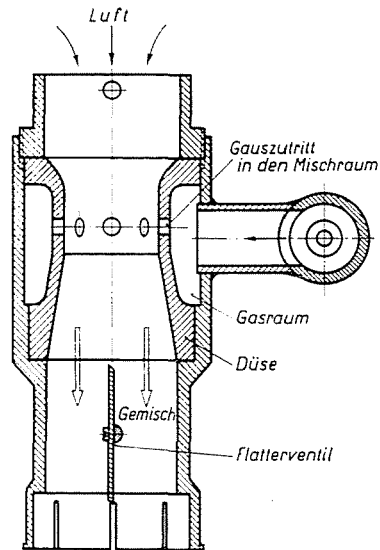


Abb. 6. Die beim Csepel-Diesel- und beim Csepel-Benzinmotor benutzten Mischer

Während der Versuche wurde das Kompressionsverhältnis des Csepel-Dieselmotors herabgesetzt. Hierbei wurde an der Form des Verbrennungsraumes tunlichst wenig geändert. Das Verdichtungsverhältnis wurde durch Änderungen einerseits an der Vorkammer (Abb. 9), andererseits an der Stärke der Zylinderkopfdichtung geändert.

Beim MIB-Diesel- sowie beim Csepel-Benzinmotor bedurfte es im Hinblick auf die Kompressibilität der bei den Versuchen verwendeten Gase keiner Änderung des Verdichtungsverhältnisses.

Beim Benzinmotor wurde die beim Csepel-Dieselmotor gebrauchte Vorrichtung zur Bildung des Gas-Luft-Gemisches benützt (Abb. 6 und 7), die an Stelle des Karburators eingebaut wurde. Bei Gasbetrieb wurde der Motor auch mit Gas angelassen.

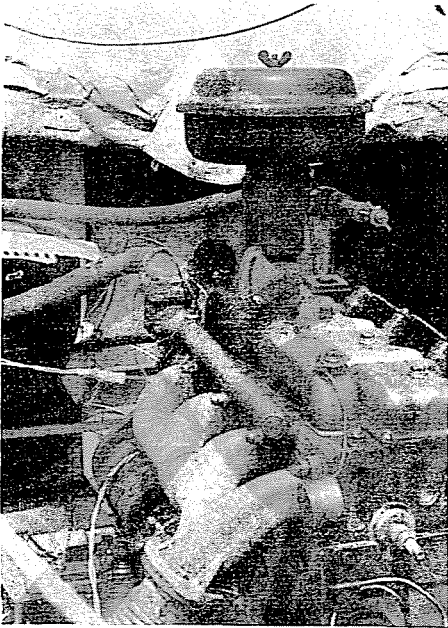


Abb. 7. Anordnung des Mischers am Csepel-Dieselmotor

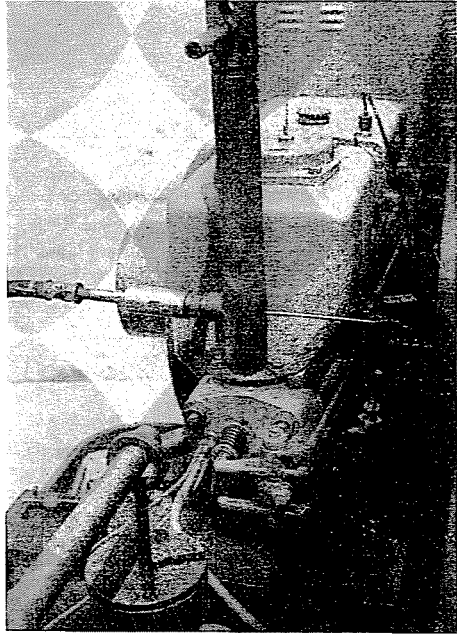


Abb. 8. Anordnung des Mischers am MIB-Dieselmotor

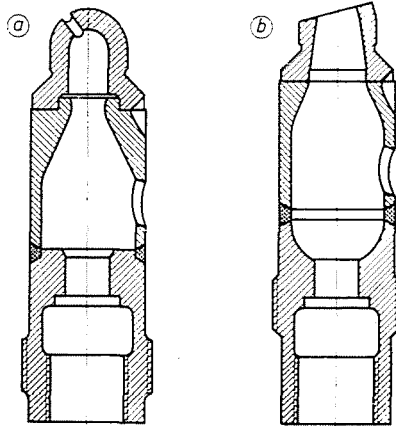


Abb. 9. a) die Vorkammer des Csepel-Dieselmotors, b) die für den gemischten Betrieb umgestaltete Vorkammer

Im Laufe der Versuche wurden die Dieselmotoren jeweils als solche angelassen. Sobald sie sich auf Betriebstemperatur erwärmt hatten, erfolgte bei gleichzeitiger Drosselung der Gasölzufuhr durch Öffnung des an die Saugleitung angeschlossenen Gashahnes der Übergang auf den Gasbetrieb (ge-

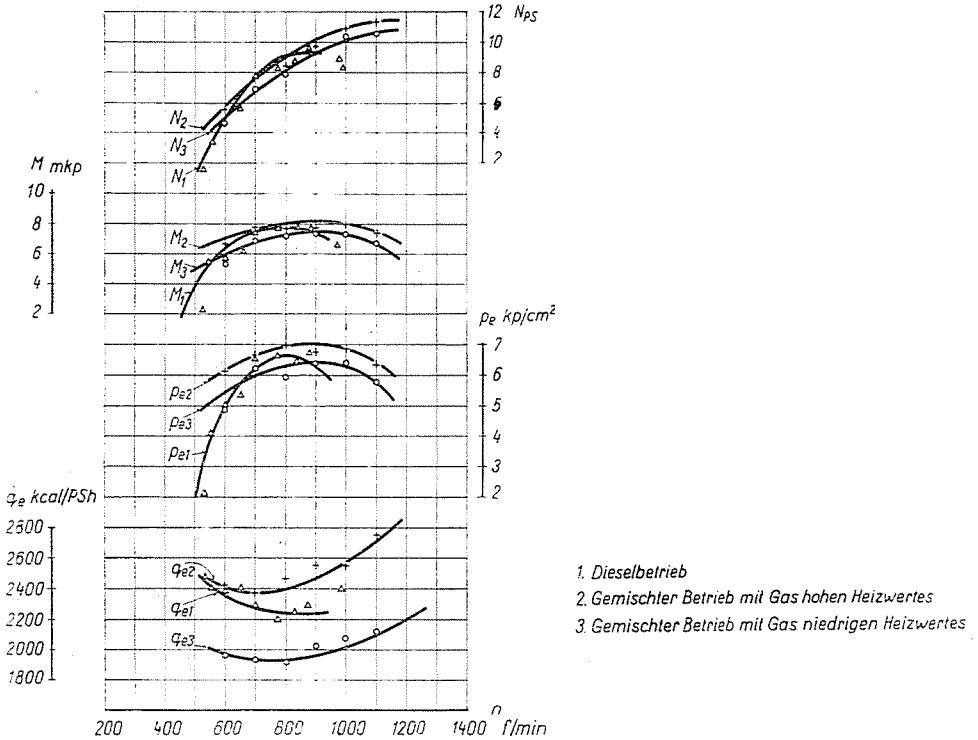


Abb. 10. Äußere Charakteristiken des MIB-Dieselmotors

mischer Betrieb). Das in den Zylinder eingesaugte Gas-Luft-Gemisch wurde durch das eingespritzte Gasöl entzündet.

Hierzu sei bemerkt, daß diese Ölmenge selbst dazu nicht genügte, den Motor im Leerlauf in Gang zu halten. Der Zündölverbrauch richtete sich einesteiis nach dem Gas-Luft-Mischungsverhältnis, andererseits nach dem jeweiligen Verdichtungsverhältnis im Motor. Den Beobachtungen zufolge stieg der Zündölverbrauch bei gasarmem Gemisch (bei hohem CO_2 -Gehalt) sowie bei Abnahme des Verdichtungsverhältnisses an.

Bei gemischtem Betrieb arbeiteten die Motoren in jeder Hinsicht zufriedenstellend. Es zeigten sich weder schädliche Überhitzungen, noch auffallend starke Abnützungen an irgendeinem Bauteil. Die Höchstleistung beispielsweise, die der Dieselmotor MIB im Laufe der Versuche im gemischten Betrieb entwickelte, lag um rund 25% über der Leistung im normalen Dieselbetrieb (Abb. 10). Auch während der 25%igen Überlastung waren die aus dem Motor entweichenden Verbrennungsprodukte ganz farblos und ihr Gehalt an CO (mit 0,01%) minimal, obwohl die Luftüberschußzahl kaum etwas über dem Wert von $m = 1,0$ lag, obwohl also der Motor nahezu mit der theoretisch

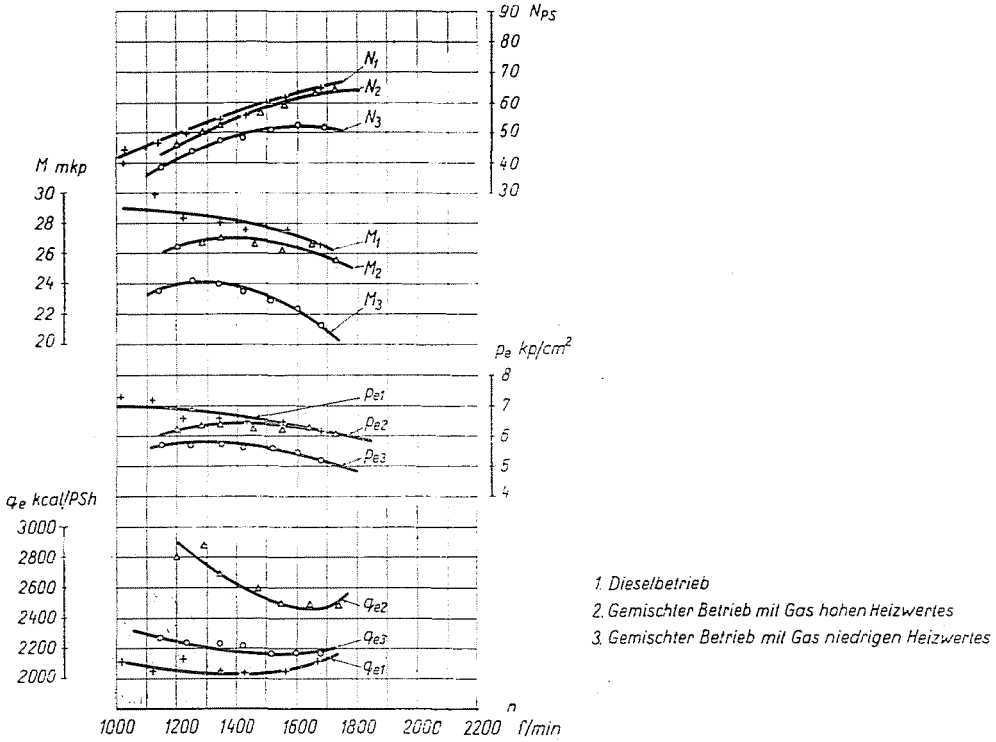


Abb. 11. Äußere Charakteristiken des Csepel-Dieselmotors

erforderlichen Luftmenge lief. Die beiden anderen Motoren entwickelten mit Gas und mit dem herkömmlichen Kraftstoff praktisch gleich hohe Leistungen (Abb. 11 und 12).

Bei den Versuchen wurden folgende Gase verwendet:

— Erdgas mit einem Heizwert von 8845 kcal/Nm^3 (Methangehalt 88%, Gehalt an sonstigen brennbaren Bestandteilen 6%, an nicht brennbaren 6%),

— Erdgas mit einem Heizwert von 2900 kcal/Nm^3 (Methangehalt 27%, sonstige brennbare Bestandteile 3%, Kohlendioxyd 68%, anderweitige nicht brennbare Anteile 2%),

— durch mesophile Gärung gewonnenes (Winter-) Biogas mit einem Heizwert von 5340 kcal/Nm^3 (Methangehalt 59%, Gehalt an Wasserstoff 11%, an Kohlendioxyd 29%, an sonstigen nicht brennbaren Bestandteilen 1%), (Sommer-) Biogas mit einem Heizwert von 5530 kcal/Nm^3 (Gehalt an Methan 63%, an Wasserstoff 5%, an Kohlendioxyd 33%, an sonstigen nicht brennbaren Bestandteilen 2%).

— durch thermophile Gärung gewonnenes Biogas (in Winter und Sommer praktisch gleichbleibender Qualität) mit einem Heizwert von 5600 kcal/Nm^3

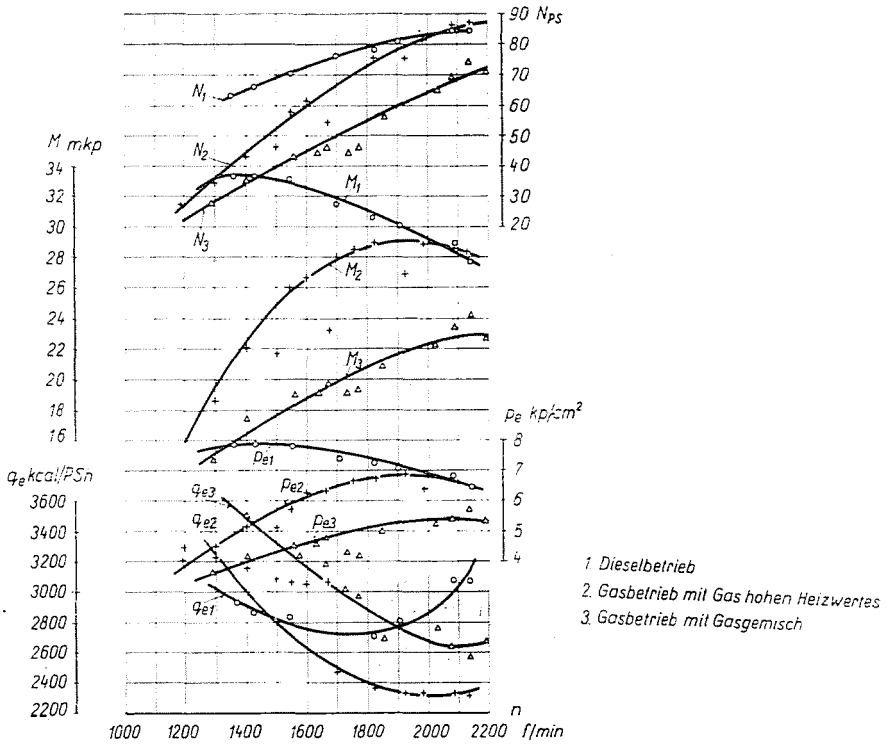


Abb. 12. Äußere Charakteristiken des Csepel-Benzinmotors

(Zusammensetzung: 63% Methan, 5% Wasserstoff, 30% Kohlendioxyd, 2% sonstige nicht brennbare Bestandteile).

Bemerkung: Am Benzinmotor wurden nur Versuche mit Erdgasbetrieb und ohne instrumentelle Dauerprobe mit zweierlei Gasen vorgenommen, u. zw.

— mit Erdgas von hohem Heizwert,

— mit einem Gemisch aus Erd-, Stark- und Schwachgas, dessen Heizwert 4950 kcal/Nm³ betrug (Zusammensetzung: Methan 46%, sonstige brennbare Bestandteile 5%, Kohlendioxyd 46%, anderweitige nicht brennbare Bestandteile 3%).

Versuchsergebnisse

Die Versuchsserie hat den eindeutigen Nachweis erbracht, daß sich sowohl der Vorkammer-Dieselmotor als auch der Dieselmotor mit direkter Einspritzung sowie der Ottomotor unabhängig von der Brennraumform und der Betriebsart mit minimalen Eingriffen auf Gasbetrieb umstellen lassen,

wobei der Motor nach der Umstellung jeweils nach Wahl mit flüssigen bzw. mit gasförmigen Kraftstoffen unterschiedlicher Qualität betrieben werden kann.

Der Dieselmotor Bauart Csepel konnte auch bei niedrigeren Verdichtungsverhältnissen mit der Glühkerze verlässlich angelassen werden. Einwandfrei waren bei der Dauerprobe im Betrieb mit Gas auch die Drehzahlen, die Momente und die Leistungen, d. h. die Betriebsstabilität beider Motoren.

Nach den Erfahrungen, die die Versuchsserie gezeigt hat, verdient der Betrieb des Motors, der nach dem sogenannten Diesel-Otto-Arbeitsprozeß arbeitet, besondere Beachtung. Seinem Wesen nach besteht der Diesel-Otto-Gasantrieb darin, daß der Motor ein brennbares Gemisch aus Gas und Luft ansaugt und verdichtet, worauf dieses durch eine ganz geringe Menge Dieseltreibstoff gezündet wird. Den Kraftstoff spritzt eine vorweg auf den Motor aufgebaute Einspritzpumpe in den Zylinder. Treibt man den Motor mit Gas an, läßt sich je nach seiner Konstruktion bei gleichem Verdichtungsverhältnis eine um rund 15—25% höhere Leistung erzielen als bei Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Will man den Motor nicht überlasten, oder ist die Konstruktion der hohen Leistung nicht gewachsen, erhält man beim Antrieb mit Gas dieselbe Leistung wie beim Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. In solchen Fällen genügt es, den Motor auf den wirtschaftlichen Betriebspunkt einzustellen. Bei dieser Betriebsart arbeitet man mit einem größeren Luftüberschuß, was sich auch insofern als günstig erweist, als sich Kolben und Ventile weniger stark erhitzen, bzw. ganz allgemein die Wärmebelastung des Motors geringer wird. Das aber erhöht die Betriebssicherheit und verlängert die Lebensdauer des Motors. Andererseits ist ein zu armes Gemisch nachteilig, weil Methan gegen Abweichungen vom richtigen Gas-Luft-Abteil im Gemisch äußerst empfindlich ist (der Bereich seiner Entflammung in Luft reicht von 5,3% bis 15,4% Methangehalt). Bei armem Gemisch verlangsamt sich der Verbrennungsprozeß, wodurch sich die Regelbarkeit des Motors und — bei Teilbelastungen — auch sein Wirkungsgrad wesentlich verschlechtert. Wegen des langsamen Verbrennens des zu armen Gasgemisches wird der Betrieb des Motors labil.

Den Wirkungsgrad des Gasmotors beeinträchtigt auch die Brennraumform. Erfahrungsgemäß lassen sich beim Gasantrieb von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung etwas bessere Ergebnisse erzielen als beim Gasantrieb von Dieselmotoren mit unterteiltem Brennraum.

Der zulässigen Veränderung des Verdichtungsverhältnisses setzt die Klopfestigkeit (die Oktanzahl) des betreffenden Kraftstoffes Grenzen. Die Anwesenheit freien Wasserstoffs in dem im Motor zur Verbrennung gelangenden Gas (im Biogas kommen selbst Anteile von 5—10% vor) ist unerwünscht, weil sie die Kompressibilität des Gases weitgehend beeinträchtigt. Zur Ausschaltung eines eventuell auftretenden Klopfens empfiehlt es sich, bei Dieselmotoren mit geringerer Verdichtung statt konstruktiver Eingriffe zur Herab-

setzung des Verdichtungsverhältnisses die Zündung zu verzögern und den Luftüberschuß bis zur gegebenen Grenze zu erhöhen (Arm-reich-Gemisch), womit sich zufriedenstellende Ergebnisse erzielen lassen. Da sie die Verbrennung verlangsamt, hat die Verzögerung der Zündung etwa die gleiche Wirkung wie die Herabsetzung des Verdichtungsverhältnisses. In diesem Fall entzündet sich das Gemisch nach dem oberen Kolbentotpunkt, was die Motorleistung und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes verschlechtert. Aus diesem Grunde ist die Verwendung des Armgemisches vorteilhafter, weil dabei vor allen Dingen bloß die Leistung sinkt.

Der Mindestverbrauch an Diesel-Zündöl wird durch den Energiebedarf des Verbrennungsprozesses bestimmt. Die Versuche haben eindeutig bewiesen, daß dieser Verbrauch bei den Motoren mit direkter Einspritzung (MIB-Dieselmotoren) 10–12% beträgt, also etwas unter demjenigen der Motoren mit unterteilten Brennraum liegt (beim Csepel-Dieselmotor 14–18%), da bei diesem letzteren die Selbstentzündung des Zündöls im Gas-Luft-Gemisch im unterteilten Brennraum nur mit Schwierigkeit vor sich geht. Wie die Versuche weiterhin gezeigt haben, sind der Herabsetzung des Diesel-Zündölverbrauchs auf ein Minimum einerseits durch die Regelbarkeit der gegebenen Diesel-Einspritzpumpe, andererseits durch die übermäßige Erhitzung des Zerstäubers Grenzen gesetzt. Diese Überhitzung kann allerdings durch Kühlung des Zerstäubers ausgeschaltet werden.

Über die soeben erörterten allgemeinen Feststellungen hinaus lieferten die Versuche bezüglich der Verbrennung der unterschiedlichen Gase folgende Ergebnisse:

Der kontinuierliche und ungestörte Betrieb erfordert bei beliebigen Betriebsverhältnissen die Zuleitung des Gases unter annähernd konstantem Druck, der möglichst einen Wert von 200 mm WS nicht übersteigen soll.

Bei Verwendung von Erdgas mit hoher Verbrennungswärme stieg die Höchstleistung beider Dieselmotoren an. Im Motorzylinder wurde selbst nahe um den theoretisch erforderlichen Luftmengenwert eine vollkommene Verbrennung erzielt. Die Motoren arbeiteten bei einer etwa 10– bis 18prozentigen Zündölmenge zufriedenstellend. (Die angegebene Zündölmenge ist als ein am spezifischen Verbrauch gemessener Wert zu verstehen.) Bei sämtlichen Betriebsverhältnissen ergab sich eine vollkommenerere Verbrennung als beim Antrieb durch Gasöl, wie dies die überaus günstigen Rauchgaswerte (1,2–2,5% nach der Bosch-Skala) eindeutig bewiesen haben.

Die Verwendung von Erdgas mit geringer Verbrennungswärme und hohem CO₂-Gehalt sowie von Biogas ergab bei beiden Dieselmotoren über Erwarten gute Ergebnisse. Der effektive Wirkungsgrad war in jedem Bereich besser als derjenige des Dieselbetriebes, ja selbst als der des Betriebes mit Dieselöl-Methan. Das Maximum des wirtschaftlichen Wirkungsgrades lag bei 36% (Abb. 13 und 14).

Bei Verbrennung von Erdgas mit einer vom Gesichtspunkt des Motors aus geringer Verbrennungswärme und von Biogas ergab sich als überaus günstige Erscheinung die Verminderung der Verbrennungsgeschwindigkeit

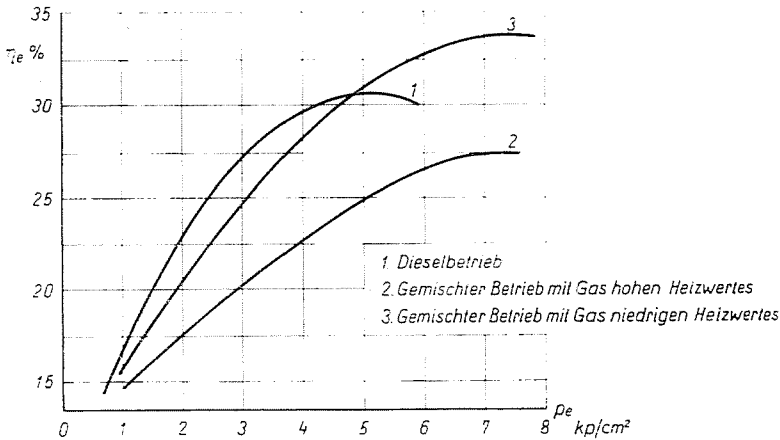


Abb. 13. Zusammenhang zwischen effektivem Wirkungsgrad und mittlerem Druck (MIB-Diesel)

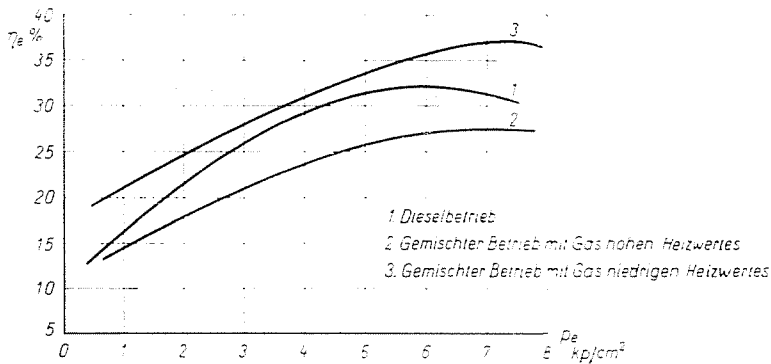


Abb. 14. Zusammenhang zwischen effektivem Wirkungsgrad und mittlerem Druck (Csepel-Diesel)

und des Verbrennungshöchstdruckes und damit ein ruhigerer Gang des Motors bei günstigerer mechanischer und Wärmebeanspruchung.

Mit sehr günstigen Ergebnissen konnten auch die Versuche am Ottomotor abgeschlossen werden. Beim Betrieb mit Erdgas großer Verbrennungswärme gab er eine höhere Leistung ab als bei Verarbeitung von Benzin. Hierbei arbeitete er selbst bei Abgabe der Höchstleistung nahezu rauchlos (1,0—2,5% nach der Bosch-Skala).

Der Wirkungsgrad des Motors lag um 7% über dem bei Antrieb mit Benzin erzielten. Da der Versuchsmotor mit niedrigem Kompressionsverhältnis arbeitete, ist anzunehmen, daß sich mit Motoren mit höherem Verdichtungsverhältnis noch bessere Ergebnisse erzielen lassen. Bei Verwendung von Erdgas mit geringerer Verbrennungswärme (Mischgas) arbeitete der Motor gleichfalls normal, doch reagiert er bei dieser Betriebsart wegen des niedrigeren Methangehaltes im Kraftstoff auf Verschiebungen im Gas-Luft-Anteil sehr empfindlich.

Wirtschaftlicher und thermischer Wirkungsgrad

Bei gleichem Verdichtungsverhältnis arbeitet der Vielstoffdieselmotor im Bereich der größeren Drehzahlen bzw. der höheren Leistung — bei Antrieb durch Gas mit Kohlensäureverunreinigungen — mit besserem Wirkungsgrad als der für reinen Dieselbetrieb ausgelegte Motor. Bei Verwendung von Gas mit größerer Verbrennungswärme lassen sich wegen der raschen Verbrennung des Methans bzw. wegen der starken Verzögerung bei seiner Entzündung bessere Ergebnisse nur mit kleineren Verdichtungsverhältnissen (13–14) erzielen.

Die Verbesserung des Wirkungsgrades bei hohen Drehzahlen ergibt sich aus folgenden Gründen:

a) Die kräftige Wirbelung im Brennraum, wie sie bei höheren Drehzahlen zustande kommt, ergibt eine bessere Gemischbildung. Beim Vielstoffdieselmotor wirkt sich dies sehr erheblich aus, weil die Gemischbildung länger dauert als beim Motor mit reinem Dieselbetrieb.

b) Die Arbeit des Motors verschiebt sich nachweislich vom Sabathéschen zum Ottoschen Arbeitsprozeß. Dieser aber ergibt bei gleichem Verdichtungsverhältnis einen besseren Wirkungsgrad. Beim Vielstoffdieselmotor beeinträchtigen diese Wirkung allerdings die mechanischen Verluste infolge des höheren Gasdrucks.

c) Rechnerisch läßt sich nachweisen, daß die Temperatur des verdichteten Gas-Luft-Gemisches am Ende des Verdichtungshubes unter gleichen Kompressions- und Betriebsverhältnissen bei Gasantrieb um etwa 150–200 °C niedriger war als bei Dieselbetrieb. Entsprechend war auch der Enddruck niedriger. Diese Abweichung rührt daher, daß die spezifische Wärme des Gas-Luft-Gemisches größer ist als die der Luft, bzw. daß sie bei höheren Temperaturen größere Änderungen erfährt als diese. So verhielt sich beispielsweise die spezifische Wärme des Biogas-Luft-Gemisches zu derjenigen der Luft bei 300 °K wie 1,17, bei 800 °K hingegen wie 1,55 zu 1.

Die Erscheinung zeichnet sich an den Verdichtungskurven in den Indikatordiagrammen der beiden Betriebszustände ab (Abb. 15 und 16). Wie aus diesen hervorgeht, ist der Richtungstangens der Verdichtungskurve des

Vielstoffdieselmotors am Ende des Verdichtungshubes kleiner als derjenige des Motors für reinen Dieselbetrieb.

Die Richtigkeit dieser Feststellung wird auch durch die im Zuge der Versuche — besonders bei niedrigem Dichtungsverhältnis — im Winter an Biogasmotoren beobachtete Erscheinung bekräftigt, daß der Übergang auf

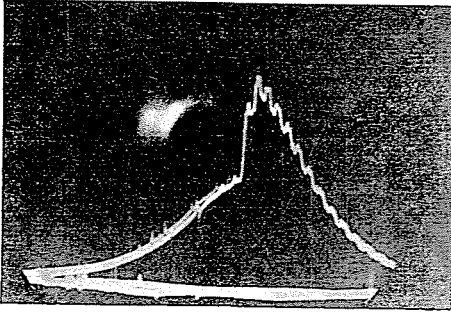


Abb. 15. Indikator-Schaubild des MIB-Dieselmotors bei Dieselbetrieb

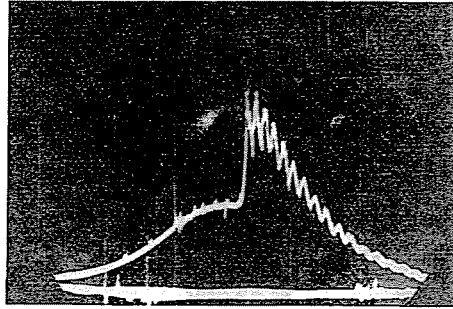


Abb. 16. Indikator-Schaubild des MIB-Dieselmotors bei gemischtem Betrieb

den Gasantrieb den im Dieselbetrieb ausreichend warmen Motor abwürgte, bzw. daß es eben wegen des Absinkens der Verdichtungs-Endtemperatur zu keiner Selbstentzündung kam. War der Motor genügend warm, dann war diese Erscheinung nach etwa 10–15 Minuten dauerndem Dieselbetrieb nicht mehr zu beobachten.

d) Sowohl die theoretischen Berechnungen als auch die Versuchsergebnisse zeigen in eindeutiger Weise, daß der Arbeitsprozeß des Vielstoffdieselmotors näher an den des Ottomotors zu stehen kam. Den Beweis hierfür lieferte die Tatsache, daß beim Vielstoffdieselmotor eine höhere Verbrennungsendtemperatur zustande kommt, ferner die Abnahme der Wärmeübertragung bei konstantem Druck auf die Verminderung des Verhältnisses V_3/V_2 hindeutet.

e) Auffallend war in der Auswertung der Versuchsergebnisse der bessere Wirkungsgrad des Vielstoffdieselmotors unter sonst gleichen Betriebsbedingungen, d. h. bei der höchsten Drehzahl und bei der ihr zugeordneten Höchstlast (Abb. 13 und 14).

Die Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung des thermischen Wirkungsgrades auch für den Fall des realen Arbeitsmediums — die die obigen Feststellungen bestätigen —, sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefaßt.

Den Berechnungen lag die Annahme eines vollkommenen Dieselmotors bzw. eines gemischten Gas-Diesel-Arbeitsprozesses mit realem Arbeitsmedium zugrunde. Aus den oben erörterten Daten konnten die thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmediums bestimmt werden.

Tabelle I

Vergleich der thermischen Kennwerte des MIB-Motors bei Diesel- und bei gemischtem Diesel-Biogas-antrieb

Kennwerte, Gemessene Größen	Dieseltreibetrieb	Gemischter Betrieb
n (U/min)	990	980
N_o (PS)	9,36	12,41
m	14	14
m	1,61	1,083
p_{\max} (kp/cm ²)	68	81
H_u (kcal/kg)	10,136	5422
G_1 (kg _{Luft} /kg _{Kst})	23,39	8,405
V_1 (m ³)	19,475	8,0181
u_1 (kcal/kg)	49,9	52,1
(T_1) (kcal/Mol K ^o)	39,738	39,905
(T_2) (kcal/Mol K ^o)	44,978	45,155
T_2 (K ^o)	793,0	734,6
u_2 (kcal/kg)	139,6	140,3
i_2 (kcal/kg)	194,00	191,79
\bar{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 ^o)	2216,3	2587,8
V_3 (m ³)	2,32	0,8999
V_3/\bar{V}_2	1,667	1,571
V_1/V_3	8,394	8,91
(T_4) (kcal/Mol K ^o)	48,327	50,577
T_4 (K ^o)	1237,7	1442,5
u_4 (kcal/kg)	254,5	325,07
t	50,275	52,60
b_t (kg/PS)	0,1257	0,1200
p_t (kp/cm ²)	11,172	15,102

Für den gemischten Diesel-Arbeitsprozeß ergibt sich ein besserer thermischer Wirkungsgrad. Notwendigerweise ist jedoch die Verbesserung des Wirkungsgrades geringfügiger, als für den theoretischen Arbeitsprozeß ausgewiesen werden konnte.

Wie aus diesen Ergebnissen erhellt, arbeitet der Vielstoffdieselmotor mit einem besseren thermischen und dementsprechend auch mit einem besseren wirtschaftlichen Wirkungsgrad als der Motor für reinen Dieseltreibetrieb. Dies gilt besonders für große konstante Belastungen. Er erscheint mithin als vorzüglich geeignet zum Antrieb von Stromerzeugern oder von Pumpen in Bewässerungsanlagen.

Die Ergebnisse der Betriebsstabilitätsmessungen

An den untersuchten Motoren wurden Stabilitätsmessungen unter verschiedenen Betriebsverhältnissen vorgenommen (Änderung des Verdichtungsverhältnisses, Antrieb mit Gasen unterschiedlicher Qualität und Herkunft, Leistungsänderungen usw.). Mit Hilfe von Wärmeaustauschern,

Tabelle 2

Vergleich der thermischen Kennwerte des Motors DT—413 bei Diesel-, bei gemischtem Diesel-Biogas- und bei Diesel-Erdgasbetrieb

Kennwerte, Gemessene Größen	Diesel-Betrieb		Diesel-Biogas-Betrieb		Diesel-Erdgas- Betrieb
n (U/min)	1650	1650	1650	1650	1650
N_2 (PS)	60	60	60	61	66
ε	21	17,50	13,7	17,5	14,9
m	1,50	1,37	1,20	1,34	1,30
p_{\max} (kp/cm ²)	100	75	57	85	78
H_u (kcal/kg)	10160	10160	5469	5658	11450
G_1 (kg _{Luft} /kg _{Kst})	21,83	20,38	10,50	11,78	22,88
V_1 (m ³)	18,48	17,18	9,16	10,14	19,38
u_1 (kcal/kg)	51,12	50,60	52,66	52,89	52,19
(T_1) (kcal/Mol K ^o)	39,83	39,82	40,69	40,015	39,760
(T_2) (kcal/Mol K ^o)	45,870	45,507	45,880	45,690	45,120
T_2 (K ^o)	928,3	871,3	837,5	824,5	659,0
u_2 (kcal/kg)	166,97	155,40	153,76	154,14	121,65
i_2 (kcal/kg)	230,60	215,13	211,30	210,72	167,80
V_2 (m ³)	0,88	0,98	0,66	0,58	1,30
p_2 (kp/cm ²)	67,45	52,96	38,54	49,15	34,60
i_3 (kcal/kg)	694,40	702,86	742,32	723,95	720,69
T_3 (K ^o)	2345,5	2365,0	2411,3	2379,5	2403,3
V_3 (m ³)	1,57	1,98	1,26	0,936	2,06
V_3/V_2	1,79	2,02	1,88	1,61	1,58
V_1/V_3	11,70	8,65	7,26	10,83	9,39
(T_4) (kcal/Mol K ^o)	48,10	48,912	43,587	50,278	49,900
T_4 (K ^o)	1193,8	1322,5	1383,7	1275,0	1349,5
u_4 (kcal/kg)	239,48	272,15	301,44	269,53	282,18
t (%)	57,12	52,77	51,47	54,22	53,50
b_1 (kg/PS)	0,108	0,118	0,224	0,205	0,103
p_t (kp/cm ²)	13,40	13,29	13,11	12,92	13,49

die an die Auspuffleitung bzw. an das Kühlsystem angeschlossen waren, wurde weiterhin geprüft, ob die mit den Auspuffgasen bzw. mit dem Kühlwasser abgehende Wärmeenergie — bei stabilem Betrieb — nutzbar wäre, und ob der an die Auspuffleitung angeschlossene Wärmeaustauscher den Betrieb des Motors nicht zu sehr stört.

Nach den Ergebnissen der Messungen arbeiteten sowohl der Diesel- als auch der Ottomotor unter den angedeuteten unterschiedlichen Betriebsverhältnissen bei Antrieb mit Gasen verschiedener Beschaffenheit mit einwandfreier Stabilität.

Es konnte weiter festgestellt werden, daß der an die Auspuffleitung angeschlossene Wärmeaustauscher die Arbeit des Motors nicht beeinträchtigte. Der Widerstand des Wärmeaustauschers überstieg selbst bei maximaler Motorleistung den Wert von 300 mm WS nicht. Die Auspuffgase wurden auf etwa 160—200 °C abgekühlt. Eine darüber hinausgehende Abkühlung war bei den Versuchen gar nicht beabsichtigt, da ein Absinken der Rauchgastemperatur unter den Taupunkt vor dem Verlassen des Auspuffsystems

und damit das Auftreten von Korrosion unbedingt verhindert werden sollte. Während der Messungen bzw. der Dauerproben wurden korrosionsbedingte Veränderungen weder an den Motoren, noch am umgeänderten Auspuffsystem festgestellt.

Wie die Messungen zeigten, läßt sich die sonst verlorengelassene Wärmeenergie (rund 5% der dem Motor zugeführten Wärmeenergie) bei stabilem Betrieb mit Hilfe der an die Auspuffleitung und an den Wasserkühler angeschlossenen Wärmeaustauscher zurückgewinnen. Die so gewonnene Wärmeenergie kann beispielsweise zum Heizen der Biogasgewinnungsanlage, aber auch von Gewächshäusern und sonstigen Räumen, zur Warmwasserzubereitung usw. nützlich verwendet werden.

Auswertung der Dauerproben

Der Dieselmotor Bauart Csepel arbeitete im 3-Schichten-Nonstop-Betrieb mit der Nennleistung von 60 PS 600 Stunden lang.

Die Dauerprobe verlief, ohne daß der Motor in nennenswerter Weise schadhaft geworden wäre, trotzdem die Proben unter weitgehenden Abweichungen von den Instandhaltungs- und Betriebsvorschriften der Fabrik vor sich gingen.

Die Automobilfabrik Csepel schreibt für ihre Motoren Ölwechsel nach je 50, die Überprüfung des Düsen-Öffnungsdruckes nach je 150 und die Ventilspieleinstellung nach je 300 Betriebsstunden vor.

Zur Überprüfung früherer Erfahrungen wurde das Öl während des Dauerbetriebs mit Gas statt nach 50 erst nach 200 Betriebsstunden erneuert, so daß der Motor ohne Unterbrechung (im Drei-Schichten-Betrieb) jeweils 200 Stunden lang lief. Erst nach deren Ablauf wurden die nach 50 bzw. 150 Betriebsstunden vorgeschriebenen Instandhaltungsarbeiten durchgeführt (Säuberung der Öl- und Luftfilter, Nachziehen der Zylinderkopf- und der eventuell gelockerten anderen Schrauben, Nachspannen der Keilriemen usw., während die Ventile erst nach 600 Betriebsstunden eingestellt wurden.

Während der Proben wurden auch der Ölbedarf und der Ölverbrauch gemessen. Hierbei wurde an dem in Rede stehenden Motor der spezifische Schmierölverbrauch nach 50stündigem Dieselmotorbetrieb und nach 200stündigem Betrieb mit Erdgas bestimmt. Während des 50stündigen Dieselmotorbetriebes und 400stündigen Antriebs mit Erdgas lief der Motor mit Sommer-Schmieröl und schließlich während der letzten 200 Stunden der 600stündigen Dauerprobe gleichfalls mit Erdgasantrieb — versuchsweise — mit dem für den Winter vorgeschriebenen Schmieröl. Die Ergebnisse erwiesen sich auch in diesem letzten Abschnitt als weitgehend zufriedenstellend. Bei beiden Schmierölsorten blieb der spezifische Schmierölverbrauch unter dem des Dieselmotorbetriebes (in Dieselmotorbetrieb 1,16 g/PSh, im Gasbetrieb 1,02 g/PSh.) Nach 50

bzw. je 200 Stunden dauerndem Betrieb wurde das Schmieröl abgelassen und je ein Muster untersucht. Die Analysenergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Tabelle 3

Ergebnisse der Schmieröluntersuchungen

<i>Frischöl MDX—90</i>	<i>Gebrauchtes Sommer-Öl</i>		
Dichte bei 20 °C 0,902	<i>nach 50stündigem Dieselbetrieb</i>		
Flammpunkt 215 °C	Conr.: 1,53	V/50 °C	87,22
Stockpunkt —25 °C	Asche: 0,62	Conr.: 0,92	
V/50 81,40 cSt 10,72 E	Rückstand: 0,90	Asche: 0,18	
V/100 13,49 cSt 2,17 E	<i>nach 200stündigem Erdgasbetrieb</i>		
VI. 88	Conr.: 1,28	V/50 °C	93,77
Conradson: 0,76 Gew. %	Asche: 0,58	Conr.: 1,00	
Asche: 0,49 Gew. %	Rückstand: 0,43	Asche: 0,35	
SO ₄ Asche: 0,61 Gew. %	<i>nach der 200. bis zur 400. Stunde im</i>		
Säurezahl: 0,75	<i>Erdgasbetrieb</i>		
	Conr.: 1,16	V/50 °C	93,93
	Asche: 0,57	Conr.: 0,96	
	Rückstand: 0,36	Asche: 0,32	
	<i>nach der 400. bis zur 600. Stunde im</i>		
	<i>Erdgasbetrieb</i>		
	(Winter-Altöl)		
	Conr.: 1,46	V/50 °C	71,59
	Asche: 0,71	Conr.: 1,00	
	Rückstand: 0,50	Asche: 0,42	

Die Ungarische Erdöl- und Erdgas-Versuchsanstalt faßte ihr Gutachten kurz wie folgt zusammen: »Mit jedem der untersuchten Öle hätte der Betrieb mit voller Sicherheit weitergeführt werden können. Den höchsten Grad der Verbrauchtheit wies unter den vier Proben diejenige nach dem 50stündigen Dieselbetrieb auf.«

Das Ergebnis der Untersuchungen erlaubt die Feststellung, daß die Schmieröle ohne Gefährdung der Betriebssicherheit ausnahmslos auch weiter hätten gebraucht werden können. Ohne die Sicherheit des Betriebs zu beeinträchtigen, kann die Conradsonzahl auf 3 bis 4 ansteigen.

Auffallend war bei den Untersuchungen die Erscheinung, daß sich das Öl, trotzdem es erst nach viermal längerem Betrieb ausgewechselt wurde als beim Dieselbetrieb, weniger stark verbrauchte als während des letzteren. Unter anderen ist dies einer der Gründe dafür, daß die Fabriken für die aus Dieselmotoren umgebauten Gasmotoren im allgemeinen eine längere Betriebsdauer garantieren. Die Erscheinung erklärt sich im übrigen aus den besseren Verbrennungseigenschaften des Antriebsgases bzw. aus dessen Reinheit. Besonders verdient die Tatsache hervorgehoben zu werden, daß der Versuchsmotor — unter sommerlichen Betriebsverhältnissen — die letzten 200 Stunden der Dauerprobe mit dem für den Winterbetrieb vorgeschriebenen Schmieröl ohne jeden Anstand überstand; ein weiterer Beweis für die Vorzüge des Antriebs mit Gas und für dessen günstige Auswirkungen auch auf die Lebensdauer.

Während der Versuchsreihe und der Dauerprobe haben sich folgende Motorschäden ergeben:

- der Glühfaden der Glühkerze des ersten Zylinders (vom Schwungrad gerechnet) brannte ab;
- Riß an der Brücke zwischen den beiden Ventilen am zweiten Zylinder;
- Dichtung an der Wasserpumpe schadhaft geworden;
- bei einer Gelegenheit völliger Ausfall des Schaltrelais am Anlaßmotor;
- einmaliger Bruch der Ventiltfeder des Saugventils am dritten Zylinder;
- bei einer einzigen Gelegenheit kam ein Ausblasen an der Zylinderkopfdichtung vor;
- wegen der Änderung der Verdichtungsverhältnisse mußten die Zylinderköpfe verhältnismäßig oft aus- und wieder eingebaut werden, wodurch die Gasöl-Druckleitungen an den Anschlußstellen sehr bald schadhaft wurden.

Geometrische Untersuchung des Versuchsmotors

Vor Beginn und nach Abschluß der Versuche bzw. der Dauerprobe wurde der Versuchsmotor einer geometrischen Untersuchung unterzogen.

Beide Untersuchungen fanden im Versuchsbetrieb und Forschungslaboratorium der Automobilfabrik Csepel statt.

Die Resultate der geometrischen Untersuchung

Vor allem konnte festgestellt werden, daß der Motor, nachdem er mit verschiedenen Kraftstoffen (Diesel-, Diesel-Erdgas-Kraftstoffen) 800 Stunden lang gelaufen hatte, nach geringfügigen Reparaturen auch weiterhin zum Dauerbetrieb durchaus geeignet war. Die 800 Betriebsstunden verteilten sich auf etwa 100 Stunden Einfahren im Dieselbetrieb, verbunden mit der Messung des Schmierölverbrauches, 600 Stunden Dauerprobe mit kohlenstoffhaltigem Erdgas und etwa 100 Stunden Messungen mit verschiedenen Kraftstoffen.

Meßergebnisse

- Die Kurbelwellenlager sind — abgesehen von geringfügigen, durch Verunreinigungen im Schmieröl verursachten Schrammen — unversehrt. An den Pleuelstangenlagern zeigen sich Spuren des Festfressens, weshalb sie ausgewechselt werden müssen;
- die Abnutzung der Nockenwellen-Lagerbohrungen übersteigt die zulässigen Werte nicht;
- die Zylinderbohrungen sind unversehrt, ihre Abnutzung übersteigt kaum die Fertigungstoleranz von 0,006 mm;

— die Oberflächen der liegenden und der Kurbelzapfen der Kurbelwelle sind frei größeren Anfrassungen, die Abnutzungswerte liegen innerhalb der Fertigungsverfahren;

— die Kolben sind unbeschädigt, können weiter in Verwendung bleiben;

— die Dehnungsfuge (Mundöffnung) der Kolbenringe hat sich nur ganz wenig erweitert, die Abnutzung ist minimal, und auch die Größe der Tangentialkraft entspricht;

— die Werte der Zylinderbüchsenabnutzung liegen unter den üblichen, wenngleich für die Ovalität und die Konizität höhere Werte gemessen wurden. Wegen der Ovalität wurden die vier Zylinderbüchsen ausgewechselt;

— die Nocken der Nockenwelle entsprechen den Anforderungen, die an sie gestellt werden können. Die Meßergebnisse zeigten, daß sowohl das Zahnübermaß, als auch die Teilkreisabweichung, die Zahnschräge, die Evolvente und die Härtewerte innerhalb der Fertigungstoleranzen lagen:

— die an den Stoßstangensohlen übliche Erscheinung, das Pitting, war auch hier zu beobachten. Die Abnutzung der Durchmesser war gering;

— die Zylinderköpfe befinden sich in einwandfreiem Zustand, sie eignen sich auch ohne Reparatur für den weiteren Betrieb;

— die Ventile sind nur geringfügig eingeschlagen, die Flächen von Ventilsitz und -teller waren in sehr gutem Zustand, das Nachschleifen der Ventile sollte ausschließlich die störungsfreie Fortführung des Betriebes sichern;

— die Ventilführungen waren zwar abgenutzt, doch konnte der Motor selbst mit dieser Abnutzung noch wirtschaftlich betrieben werden;

— die Abnutzung an den Schwinghebelzapfen der Ventile war minimal, wogegen die Schwinghebellager eine Abnutzung um 0,10—0,12 mm zeigten;

— die Elementenpaare und Kopfventile der Einspritzpumpe befanden sich in sehr gutem Zustand.

Aus den Meßergebnissen läßt sich folgende Bewertung ableiten: Nach rund 800stündigem Betrieb bewegte sich die Abnutzung der rotierenden, beweglichen und verschleißanfälligen Teile des Motors gewißermaßen immer noch innerhalb der Fertigungstoleranzen. Dies und die minimale Verbrauchtheit des Schmieröles gestatten den eindeutigen Schluß, daß der Motor bei Antrieb durch Gas — selbst bei maximaler Belastung — wegen der minimalen Verunreinigung des Schmieröls, der vollkommenen Verbrennung usw. geringeren Beanspruchungen ausgesetzt ist als bei reinem Dieselbetrieb.

Dies aber bedeutet ebenso eindeutig Schmieröleinsparung, Verlängerung der Lebensdauer, größere Sicherheit im Betrieb, mit einem Wort eine wirtschaftlichere Nutzung als bei Dieselbetrieb.

Die Überprüfung des Motors nach den Versuchen ergab, daß er der Beanspruchung durch den Betrieb mit dauernd maximaler Belastung gewachsen war.

Die Resultate der Versuchsserie erlauben es, folgende Schlußfolgerungen zu ziehen:

— Jeder Zwei- oder Viertakt-Verbrennungsmotor — gleichviel, ob es sich um einen Otto- oder um einen Dieselmotor handelt — läßt sich verhältnismäßig einfach zu einem Erdgasmotor umbauen, u. zw. so, daß er auch weiterhin zum Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen geeignet bleibt;

— die umgebauten Motoren können sowohl mit konstanter als auch mit veränderlicher Leistung gefahren werden;

— die technischen und die Wirtschaftlichkeitsparameter der für Antrieb mit Gas umgebauten Motoren ändern sich in vorteilhafter Weise: Leistungssteigerung, Erhöhung der Betriebssicherheit und Verlängerung der Lebensdauer, geringerer Schmierölverbrauch, Möglichkeit zur Nutzung der mit dem Kühlwasser oder mit den Auspuffgasen abgehenden Wärmeenergie usw.

— für Gasmotoren, die durch Umbau von Dieselmotoren entstanden sind, kommen zweierlei Arten der Entzündung des Gas-Luft-Gemisches in Frage:

a) die Zündung durch Einspritzen einer minimalen Dieselölmenge (Zündöl),

b) durch einen elektrischen Hochspannungsfunken aus der Zündkerze.

— bei Umbau von Ottomotoren braucht das Verdichtungsverhältnis nicht geändert zu werden, doch ist es vorteilhaft, von einem gegebenen kleineren auf ein größeres Kompressionsverhältnis überzugehen, da sich dadurch der thermische und der wirtschaftliche Wirkungsgrad verbessern läßt;

— für Gasmotoren, die durch Umbau von Dieselmotoren entstanden sind, hat sich — bei Zündung mit Zündöl — ein Kompressionsverhältnis von 14—17 als optimal erwiesen. Bei Umstellung auf elektrische Zündung ist ein größeres Verdichtungsverhältnis im allgemeinen günstiger;

— je nach dem Verdichtungsverhältnis ergab sich für den auf Gasantrieb umgestellten Motor bei Höchstbelastung ein Wirkungsgrad von 32—37%. Bei Verwendung von Gas mit einem Heizwert von minimal 3800—4000 kcal/Nm³ wird also der Motor auch bei reinem Gasantrieb jene Leistung abgeben, die ihm bei Antrieb mit flüssigem Kraftstoff entnommen werden kann.

— Die größten Vorteile bietet der Erdgasmotor zur Zeit vor allem im stabilen Betrieb. Dieser ermöglicht es — wie schon erwähnt —, die mit dem Kühlwasser bzw. mit den Auspuffgasen sonst verlorengehenden Wärmeenergien auf einfache Weise teilweise zurückzugewinnen. Die hierzu erforderlichen Einrichtungen stören den Betrieb des Motors nicht.

Zusammenfassung

Die beiden wichtigsten Energieträger Ungarns — Kohle und Erdöl — stehen nur in beschränktem Umfang zur Verfügung. Weit reicher sind die Erdgasvorkommen des Landes, und in weiterer Sicht kommt als Energiequelle auch das Biogas in Frage. Dieses entsteht durch bakterielle Umsetzung organischer Stoffe. Das Biogas, dessen Heizwert zwischen 4800 und 6000 kcal/Nm³ schwankt, zeigt viele Ähnlichkeit mit dem Erdgas.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die vom Verfasser durchgeführten Versuche mit Erd- und Biogas (Motordauerprobe, Lebensdauer, Schmierölverunreinigung, Verhältnis von Gasöl zu Gas, Änderung des thermischen und des effektiven Wirkungsgrades usw. bei verschiedenen Betriebsarten). Sie wertet ferner die Ergebnisse dieser Versuche aus und bespricht die Möglichkeiten der Umstellung von Diesel- und Ottomotoren ungarischen Fabrikats auf gemischten (Diesel-Gas-) bzw. auf Gasbetrieb.

Literatur

- Forschungsinstitut für Wärmetechnik: Biogas und die Erzeugung organischer Düngemittel (Studie),
SÁNDOR, I.: Der Antrieb von Dieselmotoren mit Bio-Faulschlammgas (Studie 1960), ungarisch.
SÁNDOR, I.: Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Verwendung von Bio- und Faulschlammgas als Motorkraftstoff (Dissertation 1963), ungarisch.
SÁNDOR, I.: Die Nutzung von Erdgas in Verbrennungsmotoren (Studie 1966), ungarisch.

Dr. Imre SÁNDOR, Budapest, IX. Stoczek u. 2—4, Ungarn