



12

Schriftenreihe der  
Forschungsanstalt  
für Betriebswirtschaft  
und Landtechnik FAT  
CH-8355 Tänikon TG

rapports rendus de la  
station fédérale de  
recherches d'économie  
d'entreprise et de  
l'agriculture rurale  
CH-8355 Tänikon TG

reports of the Swiss  
Federal Research Station  
for Farm Management and  
Agricultural Engineering  
CH-8355 Tänikon TG

081

E. Stadler und R. Studer

## Untersuchung über den Betrieb von Landwirtschaftstraktoren mit Dieselholzgas



E. Stadler und R. Studer

## Untersuchung über den Betrieb von Landwirtschaftstraktoren mit Dieselholzgas

Praxis von TAT  
auf Anfrage Zuberher erhalten  
(S1 06)

2. Exemplar in Bibliothek

1981

---

Herausgegeben von der  
Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft  
und Landtechnik, CH-8355 Tänikon TG

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Liste der nicht gebräuchlichen Abkürzungen	1
1. Einleitung	2
2. Bedeutung der Ersatztreibstoffe für die schweizerische Landwirtschaft	3
2.1 Entwicklung und heutiger Stand des Treibstoffbedarfs	3
2.2 Verfügbarkeit von Holz als Ersatztreibstoff	4
3. Versuchsanordnung	6
3.1 Der Versuchstraktor	6
3.2 Der Gasgenerator	7
3.2.1 Die Gaserzeugung	10
3.2.2 Die Gasreinigung und Gaskühlung	12
3.3 Die Gas-Luft-Mischung	12
3.4 Anpassungen am Dieselmotor	12
3.4.1 Einstellung der Zündölmenge	14
3.4.2 Umbau der Einspritzpumpe	14
3.5 Der Anbau der Generatorgasanlage am Traktor	18
4. Versuchsdurchführung und Ergebnisse	21
4.1 Praktischer Einsatz des Dieselholzgas-Traktors bei verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten	21
4.2 Betriebsstoffverbrauch	25
4.2.1 Verbrauch an Gasholz	25
4.2.2 Verbrauch an Zündöl (Dieselöl) in der Praxis	26
4.2.3 Motorölverbrauch	26
4.3 Verhalten des Gasgenerators im Betrieb	26
4.3.1 Herdbelastung	28
4.3.2 Inbetriebnahme des Traktors	30
4.3.3 Erhöhte Belastung der Motorkühlung	30
4.3.4 Gas-Luft-Mischverhältnis	31
4.3.5 Eignung und Gestehungskosten von unterschiedlich aufbereitetem Holz	33
4.3.6 Gasreinigung mit Trockenluftfilter	37
4.3.7 Gaszusammensetzung bei verschiedenen Motor-Betriebszuständen und Holzaufbereitungsarten	38
4.3.8 Massen- und Volumenströme sowie Energiebilanz	42
4.3.9 Abgase des dieselholzgasbetriebenen Motors	44
4.3.10 Schwelwasseranfall und dessen Beseitigung	46
4.4 Wirtschaftlichkeit	47
4.4.1 Umbaukosten bestehender Traktoren auf Dieselholzgas	47
4.4.2 Gesamtkostenvergleich pro Treibstoffeinheit	47

	<u>Seite</u>
5. Verdankungen	49
6. Schlussfolgerungen	50
7. Zusammenfassung	52
7.1 Résumé	54
7.2 Summary	56
8. Literaturverzeichnis	58
8.1 Im Bericht zitierte Autoren	58
8.2 Weitere, konsultierte Literatur, zusammengestellt durch H. Meier	59
9. Verzeichnis der Tabellen	60
10. Verzeichnis der Abbildungen	61

Liste der nicht gebräuchlichen Abkürzungen

AK	=	Arbeitskräfte
AMP	=	Armee-Motorfahrzeugpark
BAV	=	Verordnung über Bau und Ausrüstung von Strassenfahrzeugen
DHG	=	Diesel-Holzgasssystem
EAWAG	=	Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf
EMPA	=	Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, Dübendorf
EP 80	=	Ernährungsplan 1980
FAT	=	Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik, Tänikon
Ho	=	oberer Heizwert
Hu	=	unterer Heizwert
MJ	=	Megajoule = $10^6$ J
Nm <sup>3</sup>	=	Kubikmeter Gas bei Normalzustand
PJ	=	Petajoule = $10^{15}$ J
ppm	=	parts per million, $10^6$ ppm = 1 ‰
TJ	=	Terajoule = $10^{12}$ J
TS	=	Trockensubstanz
v. OT	=	vor oberem Totpunkt
WS	=	Wassersäule

## 1. Einleitung

Verschiedene Energiekrisen, vor allem jene vom Winter 1973/74, machten die grosse Abhängigkeit der stark motorisierten schweizerischen Landwirtschaft von ausländischen fossilen Energiereserven deutlich. Weitsichtigere Vertreter aus Praxis und Verwaltung forderten eine Intensivierung der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Ersatztreibstoffe für Landwirtschaftstraktoren.

Eine der naheliegendsten Alternativen war zweifellos die Holzgas-Technologie, deren Funktionstüchtigkeit bereits während des Zweiten Weltkrieges unter Beweis stand. Glücklicherweise hatte der Schweizerische Verband für Landtechnik (vormals Schweizerischer Traktorenverband) in Zusammenarbeit mit Professor Tognoni vom Zentralschweizerischen Technikum in Luzern mit der Fortsetzung der Versuche mit Holzgasbetriebenen Traktoren dafür gesorgt, dass das ehemals vorhandene Wissen über die Holzgas-Technologie nicht ganz in Vergessenheit geriet. In den sechziger Jahren wurden aus Schweden zwei Gasgeneratoren (System Volvo) beschafft und damit je ein Bühler- und Hürlimann-Traktor ausgerüstet und in der Praxis eingesetzt. Parallel dazu erfolgten am Zentralschweizerischen Technikum Labormessungen. In den Jahren 1961 und 1973 fanden zudem Studienreisen nach Schweden in die Statens Maskingprovning in Uppsala und Umea statt, wo ein breitangelegtes Forschungsprogramm zur Entwicklung des sogenannten Diesel-Holzgasystems (DHG) im Gange war.

Im Jahre 1976 wurden die bisher vom Schweizerischen Verband für Landtechnik und dem Zentralschweizerischen Technikum betreuten Holzgasversuche an die Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT) in Teningen übertragen mit dem Ziel, das Dieselholzgasystem unter schweizerischen Bedingungen so weiterzuentwickeln, dass im Krisenfall eine rasche Umstellung einer grösseren Zahl landwirtschaftlicher Traktoren technisch möglich und ihr Betrieb bezüglich Holzaufbereitung und Generatorbedienung zumutbar wäre.

## 2. Bedeutung der Ersatztreibstoffe für die schweizerische Landwirtschaft

### 2.1 Entwicklung und heutiger Stand des Treibstoffbedarfs

In den fünfziger und sechziger Jahren erfolgte der stufenweise Uebergang vom tierischen Zug zur Vollmotorisierung. Dadurch konnte zwar die schweizerische Landwirtschaft die massive Abwanderung an Arbeitskräften auffangen und die Nahrungsmittelproduktion beträchtlich ausweiten, geriet aber andererseits auf dem Energiesektor in eine gefährliche Abhängigkeit von den im Ausland liegenden Erdölreserven.

Betrag der Treibstoffbedarf für landwirtschaftliche Motorfahrzeuge 1939 lediglich zirka 26 Mio Liter oder 890 TJ [8], so lauten die Erhebungen [7] für das Jahr 1978 auf zirka 132 Mio Liter oder 4'500 TJ (Heizöl und Schmierstoffe, sowie Benzin für landwirtschaftliche Fahrten mit dem PW nicht eingerechnet). Rund drei Viertel dieser Menge oder 98 Mio Liter werden in Form von Dieseltreibstoff, der Rest als Benzin, benötigt. Innerhalb von vierzig Jahren hat sich der Bedarf nahezu versechsfacht.

Konnte sich die schweizerische Landwirtschaft vor vierzig Jahren noch zu 80 % mit einheimischer Energie versorgen, so beträgt dieser Anteil heute kaum mehr 20 % [8]. Eine längerdauernde Versorgungskrise auf dem Energiesektor müsste somit die Landwirtschaft, auch wenn ihr in der Energiezuteilung eine gewisse Priorität eingeräumt würde, derart empfindlich treffen, dass an eine Erfüllung des aufgestellten Ernährungsplanes EP 80 nach von Ah [2] nicht zu denken wäre, weil die Zugkräfte für die Bestellung, Pflege und das Einbringen der wertvollen Nahrungsmittel fehlen würden. Auch an eine Rückkehr zum tierischen Zug ist kurz- und mittelfristig nicht zu denken. Nach R. Fischer [5] müsste der heutige Zugpferdebestand mehr als verzehnfacht und das Arbeitskräftepotential verdoppelt werden. Zudem wären die für den tierischen Zug benötigten Gespannmaschinen nicht mehr vorhanden.

Obwohl der derzeitige Anteil der Landwirtschaft am Gesamt-Energieverbrauch der Schweiz mit zirka 1,7 % bescheiden ist, geht doch aus den genannten Ausführungen die grosse Bedeutung einer langfristigen gesicherten Energieversorgung hervor. Es drängen sich verschiedene Massnahmen auf:

- Vorratshaltung sowohl zentral als auch auf den einzelnen Landwirtschaftsbetrieben.
- Erarbeiten von Sparplänen (Kontingentierung und Rationierung) für eine gerechte Treibstoffverwendung.
- Suche nach Ersatztreibstoffen.

Als krisensichere Ersatztreibstoffe für die Landwirtschaft kommen vorzugsweise Energieträger in Betracht, die sich im Inland gewinnen und dezentralisiert aufarbeiten lassen, gut lagerfähig sind und/oder erneuerbar sind. Im weiteren sollten sich bereits vorhandene Traktoren (in der Landwirtschaft sind diese derzeit praktisch zu 100 % mit Dieselmotoren ausgerüstet) rasch und ohne grosse Aufwendungen auf den Ersatztreibstoff umstellen lassen. Holz vermag viele der vorgenannten Bedingungen zu erfüllen.

## 2.2 Verfügbarkeit von Holz als Ersatztreibstoff

Rund ein Viertel der schweizerischen Gesamtfläche ist mit Wald bedeckt. Nach Waldwirtschaftsexperten [3] liegt das jährliche Produktionsvermögen bei 5,7 Mio m<sup>3</sup>, davon wurden in den vergangenen Jahren durchschnittlich 4 Mio m<sup>3</sup> geschlagen. Rund ein Achtel davon oder rund 500'000 m<sup>3</sup> (entspricht 4,2 PJ = 0,7 % des Endenergieverbrauchs im Jahre 1975) wurde als eigentliches Brennholz verwertet, dazu kommen Abfälle aus der Holzverarbeitungsindustrie von 80'000 m<sup>3</sup> [4]. Verschiedene Autoren schätzen, dass sich der jährliche Holzschlag ohne weiteres auf 5 bis 6 Mio m<sup>3</sup> steigern liesse, womit der Brennholzanfall auf 1 Mio m<sup>3</sup> ansteigen würde. In Notzeiten liessen sich nach Affolter [1] mehrere Jahre hintereinander sogar 3 bis 4 Mio m<sup>3</sup> Brennholz gewinnen. Ausser diesem eigentlichen Wald-Brennholz ist die Nutzung von weiterem Energieholz (Nicht-Derbholzsortimente, Holz aus Obstkulturen, Parks und Gärten sowie Abfallholz aus Um- und Er-

neuerungsbauten) denkbar. Belser [3] schätzt den jährlichen Anfall auf bis 1 Mio m<sup>3</sup>. Längerfristig könnte also mit einem Energieholzanfall von rund 2 Mio m<sup>3</sup> pro Jahr oder rund 17 PJ gerechnet werden. Das wären knappe 3 % des derzeitigen Endenergiebedarfs der Schweiz. Da Energieholz in erster Linie im ländlichen Raum anfällt, wäre es durchaus denkbar, rund einen Drittel, das heisst zirka 650'000 m<sup>3</sup> oder 0,35 Mio t pro Jahr der Landwirtschaft für die Holzgasaufbereitung zu reservieren, ohne dass übrige Energieholzbenützer übermässig konkurriert würden. Bei einem vorsichtig angesetzten Umsetzungsverhältnis von 4,5 kg Holz für einen Liter Dieseltreibstoff liesse sich damit eine Dieseltreibstoffsubstitution von rund 70 Mio Liter errechnen, bei einem derzeitigen Dieselloilverbrauch in der Landwirtschaft von rund 98 Mio Liter pro Jahr. Das heisst, dass es vom Rohmaterial her theoretisch möglich wäre, den Treibstoffbedarf der schweizerischen Landwirtschaft (ausser dem Zündöl und dem Benzinbedarf für Kleinmotoren) weitgehend aus einheimischem Holz zu decken.

Nachfolgend soll über die bis Ende 1980 gesammelten Erfahrungen mit dem Versuchstraktor berichtet werden.

3. Versuchsanordnung

3.1 Der Versuchstraktor

Beim Versuchstraktor (Abb. 1) handelt es sich um einen in der Schweiz hergestellten Landwirtschaftstraktor Hürlimann Typ D 110 mit folgenden technischen Daten:



Abb. 1: Landwirtschaftstraktor Hürlimann Typ D 110, umgebaut auf Diesel-Holzgasbetrieb.

Motor : Typ: D 110  
 Art: Diesel-4 Takt-Direkteinspritzung  
 Bohrung/Hub: 95 / 104 mm  
 4-Zylinder, Hubraum: 2947 cm<sup>3</sup>  
 Verdichtungsverhältnis: 16 : 1  
 Einspritzpumpe : Bosch Kolbenpumpe PES 4A 70C  
 Regler : Bosch, mechanisch EP/RSV 300-1050  
 Einspritzdüsen : 4-Lochdüsen, DUAP LLS 140-30-D 210  
 Einspritzdruck : 185 bar  
 Einspritzbeginn: Dieselbetrieb 35° v. OT,  
 Diesel-Gasbetrieb 38° v. OT

Kupplung : Doppelkupplung

Getriebe : Art : Schubradschaltung  
 Anzahl Gänge: Vorwärts 10  
 Rückwärts 2

Zapfwelle: Motorzapfwelle, 1938/540 min<sup>-1</sup>

Hydraulik: 3-Punkt, Kategorie 2  
 Hydraulikpumpe am Motor, Fördermenge 32 l/min

Bereifung: Vorne : 6.50 - 16 AS Front  
 Hinten: 12.4/11 - 32 AS

Radstand : 1960 mm

Gewicht mit Sicherheitsverdeck und Generatoranlage:

Vorne : 1010 kg  
 Hinten: 1540 kg  
 Links : 1380 kg  
 Rechts: 1170 kg  
 Total : 2550 kg

Schwerpunktverlagerung: 116 mm nach links

3.2 Der Gasgenerator

Der für die Versuche benützte Generator wurde in den Jahren 1957 bis 1962 an der Staatlichen Prüfungsanstalt für Landmaschinen Ultuna Uppsala (Schweden) entwickelt.

Es handelt sich dabei um einen Sauggasgenerator mit absteigender Vergasung.

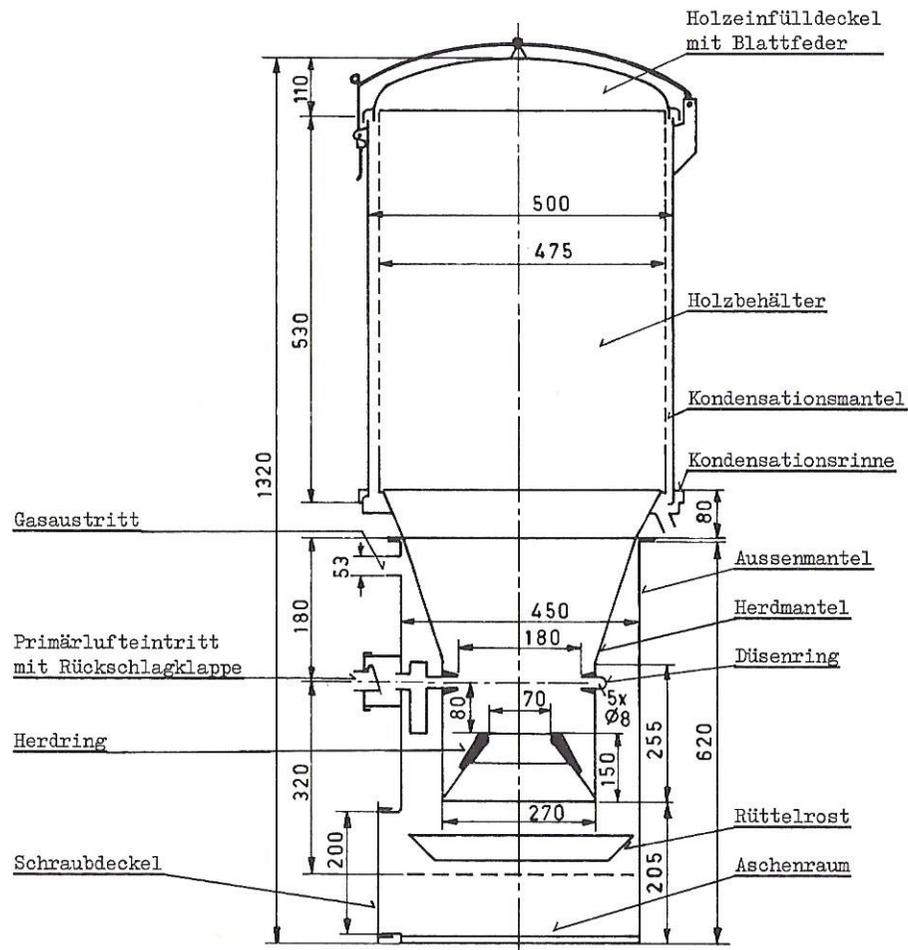


Abb. 2: Schnitt durch den Gasgenerator

Der Generator setzt sich aus vier Hauptteilen zusammen (Abb. 2):

1. Der Aussenmantel, bestehend aus dem Rüttelrost, einer mit einem Schraubdeckel verschlossenen Reinigungslücke, dem Zündloch mit Rückschlagklappe sowie den Gasaustrittsstutzen.
2. Der Herdmantel, der wichtigste Teil des Generators, bestehend aus dem eigentlichen Herd, dem Düsenring mit fünf Luftdüsen und den Luftröhren, dem auswechselbaren Herdring und dem Herdmantel.
3. Der Kondensationsmantel mit der darunterliegenden Kondensationsrinne.
4. Der Brennstoffbehälter und Holzeinfülldeckel, welcher durch eine Blattfeder auf den Dichtring gedrückt wird und bei eventuellen Verpuffungen als Sicherheitsventil wirkt. Am unteren Ende des Brennstoffbehälters befindet sich der Ablauf zum Schwelwasserabscheider.

Technische Daten:

Inhalt des Holzbehälters (Gasholz)	85 bis 90 l
(Nachfüllmenge) normal 20 kg, max.	30 kg
Durchmesser des Herdringes	70 mm
Durchmesser der 5 Luftdüsen	7 mm
Inhalt des Schwelwasserabscheiders	8 l
weitere Abmessungen gemäss Abb. 2	

Gasfilter:

Trockenluftfilter	MANN und HUMMEL
Typ	Pico-Luftfilter 45 440 65 104
Filterfläche	5,6 m <sup>2</sup>

Gewicht der Holzgasanlage:

Gasgenerator komplett leer	141 kg
Gasgenerator komplett gefüllt	177 kg
Befestigungsplatte	39 kg
Gaskühler mit Rohr	26 kg
Gasfilter mit Schlauch und Mischventil	14 kg
Steuerungsgestänge für das Mischventil	4 kg
Werkzeuge	6 kg
Gesamtgewicht der betriebsbereiten Anlage	266 kg

3.2.1 Die Gaserzeugung (Abb. 3):

Holzvergaser sind gleichzeitig Holzkohlehersteller im Mittelteil und Holz-  
kohlevergaser im Unterteil. Diese enthalten daher bis zu einer gewissen  
Höhe Holzkohle, auf welche erst nach einem mehr oder weniger raschen Ueber-  
gang das Holz folgt.

Im beschriebenen Holzvergaser folgen sich von oben nach unten:

1. Die Holz-Trocknungszone.
2. Verkohlungs-, Entgasungs- oder Schwelzone (Uebergang von Holz zu Holz-  
kohle).
3. Die Verbrennungs- oder Oxydationszone (enthält zunehmend schwindende  
Holzkohle).
4. Die Reduktionszone (enthält zunehmend schwindende Holzkohle). Bereich,  
in dem die Gase brennbar werden.

Durch die Saugwirkung des Motors entsteht in der gesamten Anlage ein ge-  
wisser Unterdruck, durch den die Primärluft durch das Zündloch in die Luft-  
kanäle und durch die fünf Luftdüsen ins Herdinnere (Verbrennungs- oder  
Oxydationszone) gesaugt wird. In der Oxydationszone wird durch Verbrennungs-  
vorgänge die für die Vergasungsreaktionen notwendige Wärmeenergie freige-  
setzt und die erforderlichen hohen Temperaturen erzeugt. Das dabei entste-  
hende Kohlendioxyd (Kohlensäure) und der Wasserdampf strömen in absteigen-  
der Vergasung, zusammen mit den aus der Verkohlungszone stammenden Säuren  
und Teerdämpfen, abwärts durch den Herdring in die Reduktionszone. Die ur-  
sprünglichen Verbrennungsprodukte werden durch die glühende Holzkohle unter  
Wärmeaufnahme teilweise zu den brennbaren Gasen Kohlenmonoxyd und Wasser-  
stoff reduziert.

Vor dem Austritt aus dem Generator umströmt das heisse Gas den Ringraum  
ausserhalb der Verbrennungs- und Verkohlungszone. Durch Wärmeabgabe wird  
dadurch die eingeleitete Verkohlung und Trocknung des Holzes unterstützt.

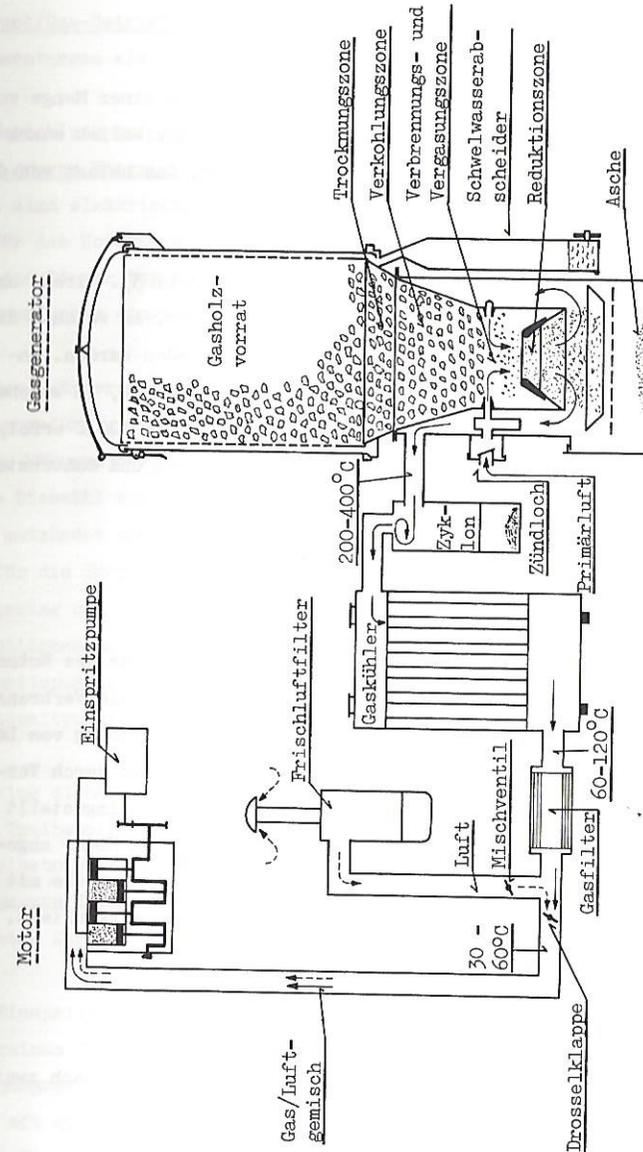


Abb. 3: Funktionsschema der Diesel-Holzgasanlage

Zwischen Kondensationsmantel und Aussenwand sammelt sich das sogenannte Schwelwasser; es wird in den Schwelwasserabscheider abgeleitet.

### 3.2.2 Die Gasreinigung und Gaskühlung

Das vom Generator erzeugte Rohgas enthält Kohlenstaub in einer Menge von durchschnittlich etwa  $2 \text{ g/Nm}^3$ . Der Staubgehalt variiert ziemlich stark und hängt von den Strömungsgeschwindigkeiten im Generator, das heisst von der Belastung desselben ab.

Die Gas-Kühlung und -Reinigung erfolgen stufenweise (Abb. 3). Direkt am Generatorausgang passiert das Gas einen Zyklonabscheider, in welchem die schweren Russteilchen durch Schleuderwirkung ausgeschieden werden. Anschliessend wird das heisse Gas durch den Gaskühler geleitet, in welchem eine Absenkung der Temperatur von  $200$  bis  $400^\circ\text{C}$  auf  $60$  bis  $120^\circ\text{C}$  erfolgt, dann durch den Feinfilter, in dem die feinen Russteilchen und Schwebstoffe abgeschieden werden.

### 3.3 Die Gas-Luft-Mischung

Die Gas-Luft-Mischvorrichtung (Mischventil) ist am Ansaugrohr des Motors (Abb. 3) angeflanscht und hat die Aufgabe, dem Gas die für die Verbrennung nötige Luftmenge zuzuführen und zugleich eine intensive Mischung von Luft und Gas vorzunehmen. Das Mischungsverhältnis muss vom Fahrer durch Verschieben des am Armaturenbrett befindlichen Einstellhebels eingestellt und dem wechselnden Belastungszustand angepasst werden. Die vom Motor angesaugte Gasgemischmenge wird ähnlich wie beim Benzinmotor durch die mit dem Fusspedal und dem Handgashebel verbundene Drosselklappe reguliert.

### 3.4 Anpassungen am Dieselmotor

Die Umstellung von Dieselmotoren auf Generatorgasbetrieb kann nach zwei verschiedenen Systemen erfolgen:

- Reiner Generatorgasbetrieb mit elektrischer Fremdzündung, ohne Zusatz von flüssigem Brennstoff.
- Diesel/Gas-Betrieb (Zweistoff-Betrieb mit Zündstrahl), das heisst: mit Generatorgas als Haupttreibstoff und Dieselöl als Zündtreibstoff.

Die Umstellung auf reinen Generatorgasbetrieb (erstgenannte Variante) bedingt grosse Eingriffe in den Dieselmotor. Die Kompressionszündung muss durch eine elektrische Zündung ersetzt und das Kompressionsverhältnis auf ein für das Holzgas angemessenes Niveau gesenkt werden. Darüber hinaus muss die Einspritzpumpe demontiert und durch eine Zündanlage ersetzt sowie ein Gasmischer eingebaut werden.

Bei der letzteren Methode wird das Generatorgas dem Ansaug-System des Motors zugeführt, mit Frischluft gemischt und in den Verbrennungsraum eingesogen. Während des letzten Teils des Kompressionstaktes wird eine kleine Menge Dieselöl eingespritzt, welches sich durch die Kompressionshitze sofort entzündet und seinerseits das Generatorgas-Luftgemisch in Brand setzt. Die für die Zündung des Generatorgases benötigte Menge Dieselöl (Zündöl) ist gering und über den ganzen Drehzahlbereich annähernd gleich gross. Die wesentlichen Änderungen am Motor bei Diesel-Gas-Betrieb betreffen die Einspritzpumpe, das Ansaugrohr, allenfalls die Einspritzdüsen und den Einspritzzeitpunkt.

Für eine sichere Zündung und eine genügende Kühlung der Einspritzdüsen ist eine Treibstoffmenge erforderlich, die etwa der normalen Leerlaufmenge bei Dieselmotorbetrieb entspricht. Damit die Einspritzpumpe diese Zündölmenge über den ganzen Drehzahlbereich liefern kann, muss sie umgestellt werden (siehe nächstes Kapitel).

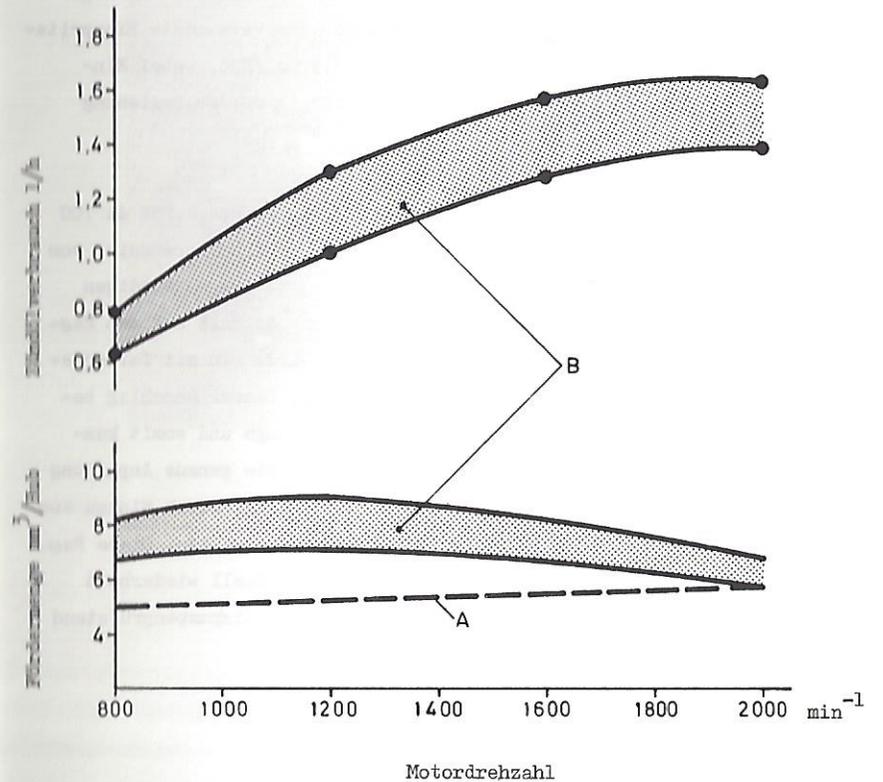
Der Einspritzzeitpunkt muss im allgemeinen mehr vorverstellt werden als bei reinem Dieselmotorbetrieb; der Grund dafür liegt an der niedrigeren Verbrennungsgeschwindigkeit des Generatorgases. Bei der Einstellung muss jedoch oft ein Kompromiss zwischen maximaler Leistung, klopfreiem Lauf und guten Starteigenschaften geschlossen werden.

### 3.4.1 Einstellung der Zündölmenge

Eine der wichtigsten Änderungen am Dieselmotor betrifft die Einspritzpumpe. Um eine möglichst effiziente Dieseltreibstoffeinsparung zu erreichen, ist die Zündölmenge insbesondere bei hoher Motordrehzahl möglichst tief zu halten. Die minimale Zündölmenge für eine sichere Zündung liegt nach unseren Erfahrungen im Bereich der Leerlaufmenge bei reinem Dieseltreibetrieb. Untersuchungen von Tognoni [10] und Nordström [6] über die kleinste Zündölmenge, die noch eine sichere Zündung und gute Leistung ergeben, haben gezeigt, dass mit steigender Motordrehzahl eine grössere Zündölmenge pro Hub erforderlich ist. Unsere Prüfstand-Versuche (Abb. 4, Kurve A) ergaben eine Bestätigung obiger Ergebnisse, der Traktoreinsatz in der Praxis zeigte jedoch bald ein sehr schlechtes Anfahrverhalten mit dieser Einstellung. Für ein gutes Anfahrverhalten des Motors (hohes Drehmoment bei tiefer Drehzahl) ist im Bereich von 1000 bis 1200 Motorumdrehungen ebenfalls eine höhere Zündöleinspritzung erforderlich. Somit musste die Zündölmenge über den ganzen Drehzahlbereich etwas erhöht werden.

### 3.4.2 Umbau der Einspritzpumpe

Der Zündölverbrauch hängt einmal von der Motordrehzahl, zum anderen wesentlich von der Fördermenge pro Hub ab (siehe Abb. 4). Bei einer Motordrehzahl von  $2000 \text{ min}^{-1}$  löst zum Beispiel eine Erhöhung der Fördermenge um lediglich  $1 \text{ mm}^3$  von  $5,8$  auf  $6,8 \text{ mm}^3/\text{Hub}$  einen Zündölmehrverbrauch von  $1,38$  auf  $1,63$  Liter pro Stunde aus. Differenzen in der oben genannten Höhe treten allein schon durch die Erwärmung der Einspritzpumpe bei länger andauerndem Vollastbetrieb auf. Dazu kommen noch die Mengenunterschiede zwischen den einzelnen Pumpenelementen, welche ihrerseits wiederum je nach Motordrehzahl unterschiedlich ausfallen.



- A = ungefähre Minimalmenge für eine Zündung
- B = erforderliche Zündölmenge für sichere Zündung, gute Leistung und gutes Anfahrverhalten

Abb. 4: Zündölbedarf in Abhängigkeit der Motordrehzahl

Die Versuche zeigten, dass mit einer serienmässigen Einspritzpumpe die Einhaltung einer so hohen Genauigkeit äusserst aufwendig, wenn nicht gar unmöglich ist. Die Herstellergarantie für die von uns verwendete Einspritzpumpe liegt bei einer Toleranz von maximal  $\pm 2,5 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ , wobei Einspritzpumpen anderer Bauart und anderer Hersteller in dieser Beziehung kaum besser abschneiden würden.

Bei der in unseren Versuchen verwendeten Einspritzpumpe Bosch PES 4A 70C erfolgt die Mengeneinstellung mit der Reglerstange, welche ihrerseits vom angebauten Regler Bosch EP/RSV 300-1050 betätigt wird. Die notwendigen Änderungen an der Einspritzanlage beschränkten sich deshalb auf den Reglerteil. Anstelle von normalen Reglerzusatzfedern wurde ein mit Tellerfedern gefederter Anschlag eingebaut (Abb. 5a und 5b). Dieser Anschlag bewirkt eine annähernd konstante Stellung der Reglerstange und somit konstante Fördermengen über den ganzen Drehzahlbereich. Die genaue Anpassung der Fördermenge auf die gewünschte Charakteristik erfolgt durch Einbau von Tellerfedern und durch mehr oder weniger Vorspannung derselben. Diese Regulierungsarbeiten müssen für jede Einspritzpumpe individuell wiederholt werden und können nur auf einem dafür geeigneten Einspritzpumpenprüfstand durchgeführt werden.

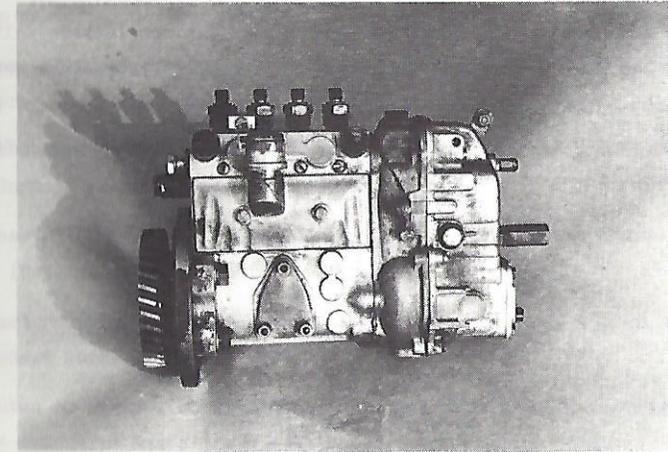
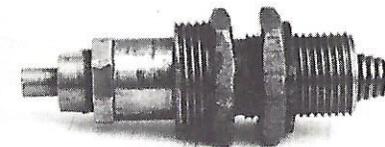


Abb. 5a + 5b: Anstelle der Reglerzusatzfeder wird ein durch Tellerfedern elastischer Anschlag eingeschraubt.



### 3.5 Der Anbau der Generatorgasanlage am Traktor

Eines der schwierigsten Probleme war schon zur Zeit des letzten Weltkrieges der Anbau der Generatorgasanlage am Traktor. Der Platzbedarf der Gasanlage (Abb. 6) hat sich seit jener Zeit, abgesehen vom Gasfilter, nur unwesentlich geändert, dafür umso mehr die Bauweise der Traktoren. Diese wurden grösser, länger und komplizierter.

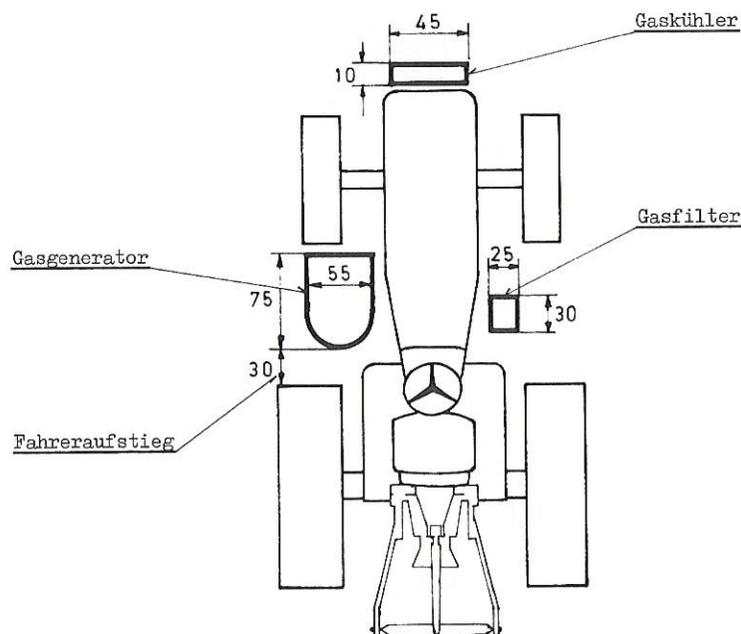


Abb. 6: Anordnung der Holzgasanlage am Versuchstraktor (alle Masse in cm)

Für den Umbau von Landwirtschaftstraktoren auf Gasbetrieb sind einige Forderungen unbedingt zu beachten:

- Für den Umbau auf Generatorgasbetrieb kommen nur bereits bestehende Traktoren in Frage.
- Der Umbau hat so zu geschehen, dass schnell und mit wenig Aufwand der alte Zustand wieder erreicht werden kann.
- Die gesetzlichen Vorschriften über Bau und Ausrüstung der Strassenfahrzeuge (BAV) müssen eingehalten werden.
- Die Wartungsarbeiten am Traktor, insbesondere am Motor, dürfen nicht verhindert werden.
- Der Anbau am Traktor soll so erfolgen, dass auch die Generatorgasanlage selbst inklusive Gasfilter und Mischer gut zugänglich sind.
- Durch den Anbau der Generatorgasanlage wird der Traktor um etwa 270 kg zusätzlich belastet.
- Die einseitige Gewichtsverschiebung ist möglichst gering zu halten, damit die Kippgefahr des Traktors am Hang oder auch beim Pflügen nicht zu stark erhöht wird.
- Der seitliche Auf- und Abstieg, die Sicht des Fahrzeugführers sowie die sichere und leichte Bedienung des Traktors dürfen nicht wesentlich beeinträchtigt werden.
- Der Anbau von Zusatzgeräten muss weiterhin gewährleistet sein.

Mit der Grösse der Traktoren steigt der Wunsch nach grösserer Bereifung, so dass der für den Gasgenerator nötige seitliche Freiraum zwischen Vorder- und Hinterrädern - besonders bei allradgetriebenen Traktoren - insgesamt eher kleiner als grösser geworden ist.

Der seitliche Freiraum für den Generatoreinbau hängt grundsätzlich von der Reifengrösse und dem Radstand ab. Aus Abbildung 7 kann der ungefähre Mindestradstand bei verschiedenen Reifengrössen für Normal- oder Allradantrieb entnommen werden. Der angegebene Mindestradstand reicht für einen Freiraum aus, in dem der komplette Gasgenerator und der seitliche Fahrer-aufstieg plaziert werden können.

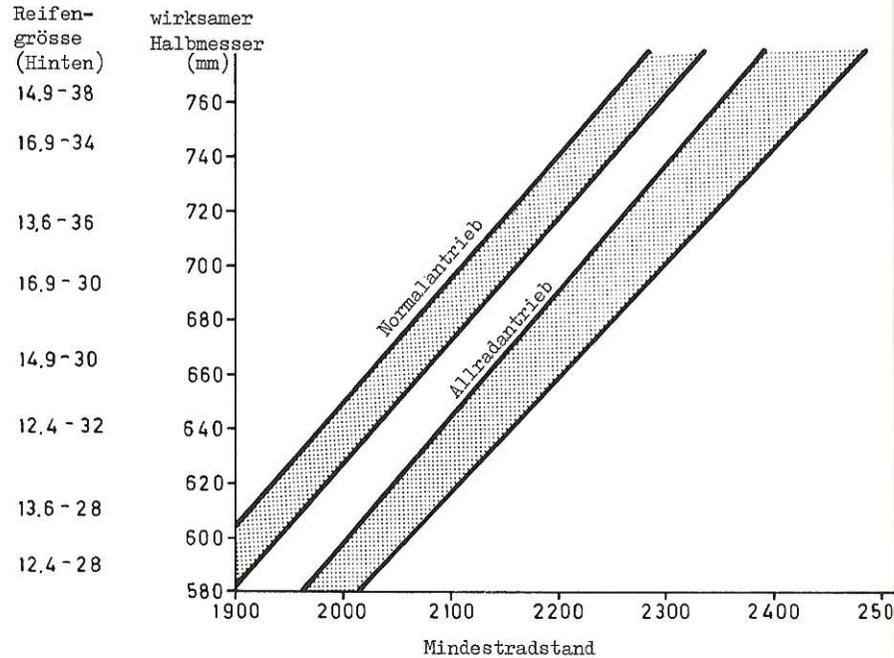


Abb. 7: Mindestradstand in Abhängigkeit der Reifengrösse, die den nötigen Freiraum für den Gasgenerator gewährleistet.

Die neueste Entwicklung im Traktorenbau, nämlich der Aufbau integrierter Fahrer-kabinen mit mehr nach vorne verlegtem Fahrerplatz, macht den seitlichen Anbau eines Gasgenerators auch bei Traktoren der mittleren Grösse mit Normalantrieb äusserst schwierig, bei Allradantrieb gänzlich unmöglich.

#### 4. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Der praktische Teil des Versuchsprogrammes sollte zeigen, wie weit ein auf das Diesel-Holzgasssystem umgerüsteter Landwirtschaftstraktor in der Praxis eingesetzt werden kann.

Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- = Für welche Arbeiten kann der Traktor eingesetzt werden?
- = Mit welchem Holzverbrauch muss gerechnet werden?
- = Wie hoch ist der Zündölverbrauch in der Praxis?
- = Wie hoch ist der Motorölverbrauch gegenüber normalem Dieselbetrieb?
- = Bewährt sich der neue Gasfilter in der Praxis?
- = Wie hoch ist der Schwelwasseranfall in der Praxis?
- = Kann das Schwelwasser schadlos beseitigt werden?
- = Können an Stelle von Klötzchenholz auch Hackholz oder andere Holzaufbereitungsarten verwendet werden?
- = Wie gross ist der Aufwand für die Gasholzaufbereitung?

##### 4.1 Praktischer Einsatz des Dieselholzgas-Traktors bei verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten

Die praktischen Einsätze erstreckten sich von Frühjahr 1977 bis Sommer 1980 und zeigten zusammengefasst folgendes Bild:

Der Traktor arbeitete ohne nennenswerte Störungen. Die Motorleistung mit maximal 25 kW (34 PS) reichte aus für Arbeiten wie zum Beispiel Heuwerbung mit dem Kreiselheuer, Heu- und Graslade mit einem mittleren Ladewagen, Gülle ausbringen mit einem Druckfass von 3'000 Litern sowie übliche Transportarbeiten.



Abb. 8a:



Abb. 8b:



Abb. 8a, 8b + 8c: Der auf Diesel-Holzgas umgebaute Traktor kann für alle üblichen landwirtschaftlichen Einsätze mit einer mehr oder weniger großen Leistungseinbusse eingesetzt werden.

Die Leistung des Motors genügt für das Pflügen mit dem Einscharpflug, für die Kreiselegge mit einer Arbeitsbreite von 2,3 m. Ungenügend dagegen ist die Motorleistung jedoch für die Bodenbearbeitung mit der Federzinkenegge bei einer Arbeitsbreite von 2,2 m.

In Tabelle 1 sind einige Einzelversuche mit den entsprechenden Verbrauchsangaben aufgeführt.

Der zusätzliche Wartungsaufwand liegt bei 15 bis 30 Minuten pro Tag. Je nach Anzahl Betriebsstunden müssen nach Beendigung des Einsatzes folgende Servicearbeiten durchgeführt werden:

- Holzfüllung mit Stoßerstange an drei bis vier Stellen durchstossen
- Schwelwassersammelbehälter entleeren
- Zyklonabscheider entleeren
- Gasfilter reinigen (ausklopfen oder spülen).

Tabelle 1: Praktische Einsätze und Verbrauchswerte bei Diesellochgasbetrieb

Einsatzart und Versuchsbedingungen	Einsatzdauer (Eff. Fahrzeit) h	Gasholz- verbrauch kg/h	Dieselöl- verbrauch l/h	Schwefelwasseranfall in % des Holz- gewichtes	
				l/h	x
Pflügen mit Einscharpflug "Menzi Rival 10", Fläche 1 ha	10,6	14	1,3	x	x
Leichte Warentransporte, Anhänger-gewicht: 2'000 kg	3,5	15,7	1,3	x	x
Heubergung mit Ladewagen "Bucher T 20 E"	2,5	10	0,85	x	x
Heubergung mit Erntewagen "Pöttinger"	1,75	14,3	1,18	1,14	8
Heubergung mit Erntewagen "Pöttinger"	3	12	1,06	1,2	10
Einsatz mit Kreiselhauer und Erntewagen "Pöttinger" (Gastemperatur am Gasfilter: 50 bis 70°C)	5,5	14,5	1,27	x	x
Eggen mit Federsinkenegge, Arbeitsbreite: 2,2 m; Fahrtgeschwindigkeit: 8 km/h	2	18	1,4	1,2	7
Strohtransport ab Feld mit Unterbrüchen für das Abladen	2,7	15	1,22	1,9	13
Strohtransport ab Feld mit Unterbrüchen für das Abladen	5,3	11,3	1,3	1,6	14
Strohtransporte Tänikon-Manzenhub, 17 km Anhängergewicht: 3'700 kg	3,1	11,3	1,1	1,3	12
Einsatz mit Kreiselhauer	3,3	12	1,2	1,2	10
Heutransport "Alp Hörnli", Fahrstrecke 34 km Anhängergewicht: 2'150 kg	2,5	12	1,3	1,6	13
Pflügen mit Einscharpflug "Menzi Rival 10", Fläche 1 ha	9,2	13	1,1	1,1	8

x = nicht erhoben

4.2 Betriebsstoffverbrauch4.2.1 Verbrauch an Gasholz

Der Gasholzverbrauch hängt weitgehend von der Belastung des Motors, aber auch zum Teil vom Fahrer bzw. von der Einstellung des Gasmischventils ab. Aus Tabelle 1 sind einige typische Versuche mit Verbrauchsangaben ersichtlich. Dabei war der Verbrauch an Gasholz mit 10 kg/h am kleinsten (Transportarbeiten mit Ladewagen) und mit 18 kg/h am grössten (Versuch mit der Federsinkenegge). Im Durchschnitt aller Versuche lag der Gasholzverbrauch bei 13,4 kg/h. Die normale Nachfüllmenge des Generators beträgt zirka 20 kg Gasholz, das heisst es muss je nach Arbeitseinsatz frühestens nach einer und spätestens alle zwei Stunden nachgebunkert werden. Im Durchschnitt reicht eine Bunkerfüllung 1,5 Stunden aus. Für das Nachbunkern muss der Motor nicht abgestellt werden (Abb. 9).



Abb. 9: Das Nachbunkern ist bei laufendem Motor möglich.

Nennenswerte Unterschiede bezüglich Holzverbrauch bei Klötzchen- oder Hackholz konnten nicht festgestellt werden.

#### 4.2.2 Verbrauch an Zündöl (Dieselöl) in der Praxis

Der Zündölverbrauch hängt vor allem von der Motordrehzahl und den Fahrge-  
wohnheiten des Traktorführers ab. Er betrug im Minimum 0,85 l/ha beim Ver-  
such mit dem Ladewagen und im Maximum 1,4 l/ha beim Versuch mit der Feder-  
zinkenegge.

Der Durchschnittsverbrauch an Zündöl aus allen Versuchen lag bei 1,21 l/ha.

Die Minimalmenge von 0,85 l/h beim Versuch mit Ladewagen Bucher lässt sich  
damit erklären, dass während des ganzen Abladevorganges der Motor mit  
stark gedrosselter Drehzahl (zirka  $1'200 \text{ min}^{-1}$ ) betrieben wurde und weil  
der Zündölverbrauch weitgehend drehzahlabhängig ist.

Der durchschnittliche Zündölverbrauch über die ganze Versuchsperiode be-  
trägt etwa 1,2 l/h, er beläuft sich auf etwa einen Drittel bis einen Vier-  
tel des Verbrauches bei normalem Dieselbetrieb.

#### 4.2.3 Motorölverbrauch

Ein abnormaler Motorölverbrauch konnte nicht festgestellt werden. Wie aus  
dem Untersuchungsbericht der EMPA zu entnehmen ist, war das Motoröl nach  
50 Betriebsstunden DHG-Betrieb nur wenig durch Russ verschmutzt. Der Be-  
richt stellt weiter fest, dass das Motoröl unter gleichbleibenden, offen-  
bar günstigen Betriebsbedingungen noch länger verwendet werden könnte.  
Oelwechselintervalle von 100 Betriebsstunden, verbunden mit einem Filter-  
einsatzwechsel nach jeweils 200 Betriebsstunden, sind nach Angaben des  
Motorherstellers durchaus zu verantworten.

#### 4.3 Verhalten des Gasgenerators im Betrieb

Obwohl das Versuchsprogramm keine eigentlichen Untersuchungen über den  
Gasgenerator vorsah, war es für uns doch einigermaßen wichtig, die gro-  
ben Zusammenhänge besser zu kennen und nachzumessen. Abbildung Nr. 10  
zeigt das Verhalten des Gasgenerators, bestückt mit einem Herdring von  
70 mm Durchmesser und 5 Primärluftdüsen von je 8 mm Durchmesser.

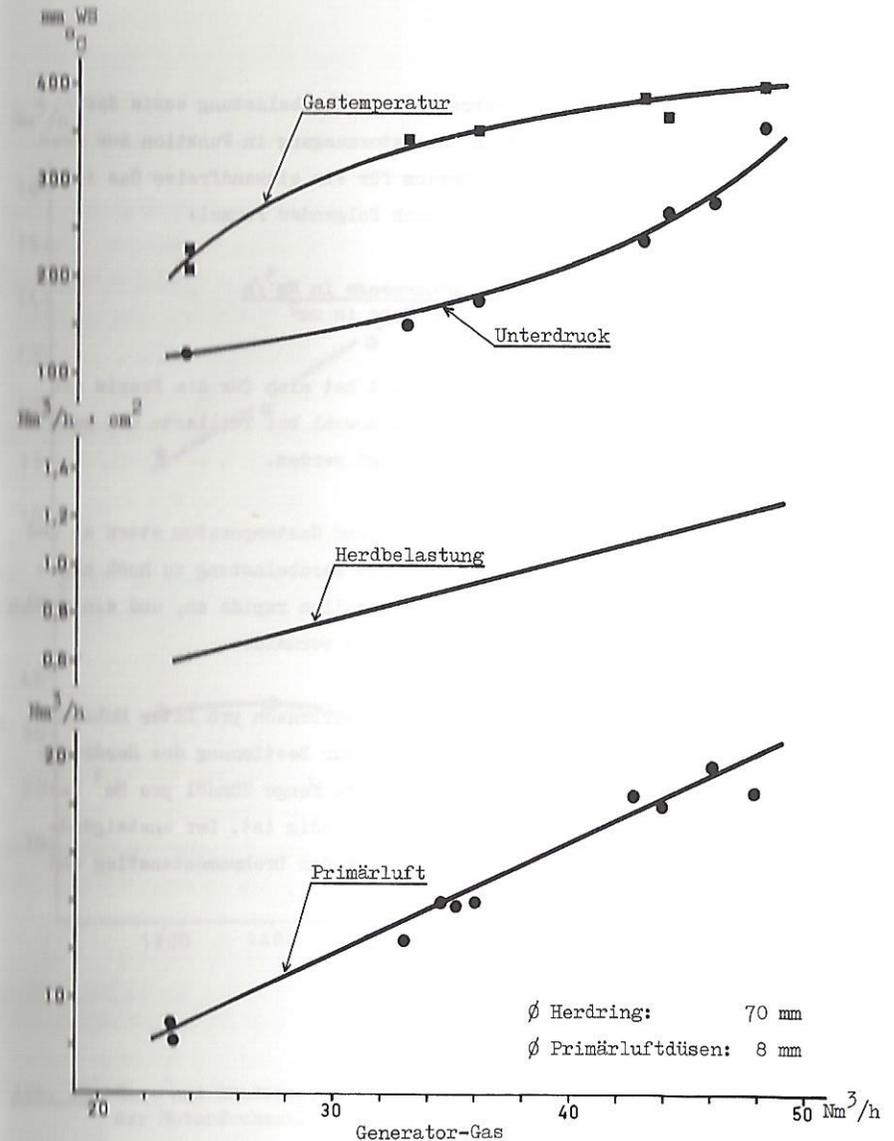


Abb. 10: Darstellung der Abhängigkeit des Primärluftbedarfs, der Herdbelastung, des Unterdrucks sowie der Gastemperatur von der erzeugten Generatorgasmenge

### 4.3.1 Herdbelastung

Aufgetragen sind der Primärluftverbrauch, die Herdbelastung sowie der Unterdruck und die Gastemperatur am Generatorausgang in Funktion zur produzierten Gasmenge. Wichtigstes Kriterium für ein einwandfreies Gas ist die Herdbelastung. Sie errechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{Herdbelastung} = \frac{\text{produzierte Gasmenge in Nm}^3/\text{h}}{\text{Herdringfläche in cm}^2}$$

Die Herdbelastung im Bereich von 0,6 bis 1,4 hat sich für die Praxis als guter Kompromis herausgestellt. Damit kann sowohl bei Teillast- als auch bei Vollastbetrieb ein teerfreies Gas erzeugt werden.

Bei zu tiefer Herdbelastung sinkt die Herd- und Gastemperatur stark ab und es besteht grosse Teergefahr. Wird jedoch die Herdbelastung zu hoch angesetzt, steigt der Unterdruck im Generator ziemlich rapide an, und ein grösserer Leistungsverlust des Motors ist nicht zu vermeiden.

In Abbildung 11 zeigt die obere Kurve den Gasverbrauch pro Liter Hubraum in Abhängigkeit der Motordrehzahl. Sie dient zur Bestimmung des Herdringquerschnittes. Die untere Kurve gibt an, welche Menge Zündöl pro Nm<sup>3</sup> Gas bei einem Vierzylindermotor dieser Grösse notwendig ist. Der ansteigende Verlauf bei fallender Motordrehzahl verbessert den Drehmomentanstieg und somit die Elastizität des Motors.

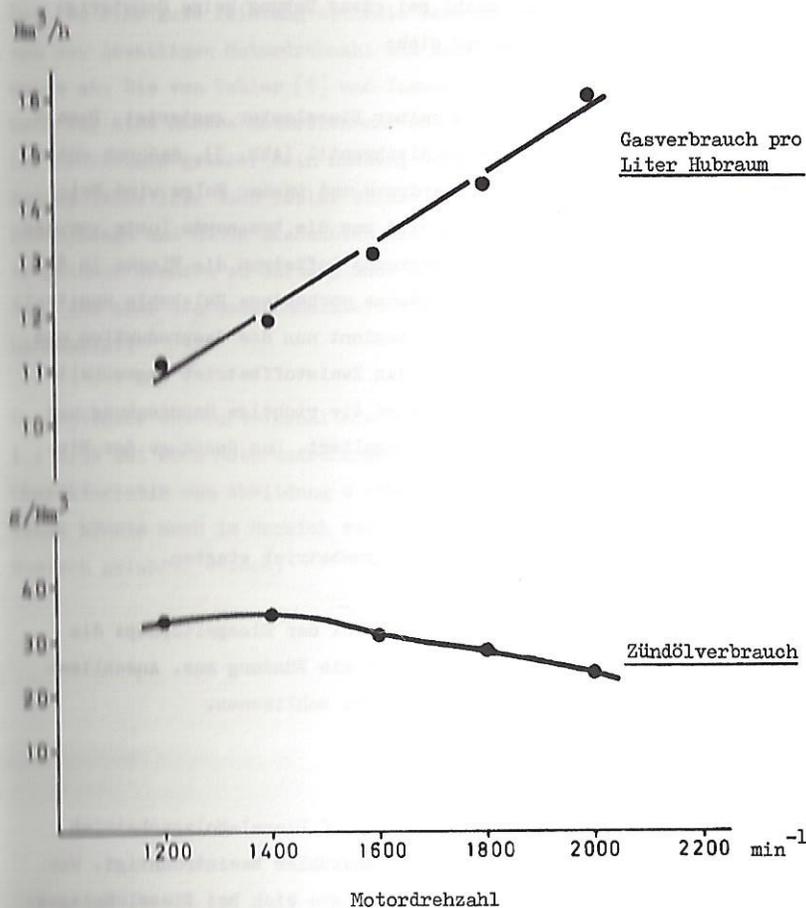


Abb. 11 Gas- und Zündölverbrauch bei Vollastbetrieb in Abhängigkeit der Motordrehzahl

#### 4.3.2 Inbetriebnahme des Traktors

Die Inbetriebnahme des Traktors macht bei etwas Übung keine Schwierigkeiten. Sie geht folgendermassen vor sich:

Der Motor wird im kalten Zustand als reiner Dieselmotor gestartet. Danach schliesst man die Frischluftklappe am Mischventil (Abb. 3), dadurch entsteht in der ganzen Gasanlage ein Unterdruck und in der Folge wird Primärluft durch das Zündloch angesogen. Wird nun die brennende Lunte vor das Zündloch gehalten, zieht der dort entstehende Luftstrom die Flamme in den Generator, wobei die in der Verbrennungszone vorhandene Holzkohle unmittelbar in Brand gesetzt wird. Im Generator beginnt nun die Gasproduktion und der Motor kann nach einigen Minuten auf den Zweistoffbetrieb umgeschaltet werden, das heisst mit dem Mischventil wird die richtige Gasmischung und mit der Drosselklappe die Motordrehzahl reguliert. Das Gestänge der Einspritzpumpe bleibt in der Leerlaufstellung.

Der warme Motor lässt sich direkt im Dieselpgasbetrieb starten.

Zum Abstellen des Motors wird mit dem Stophebel der Einspritzpumpe die Zündölmenge auf null gebracht, dadurch fällt die Zündung aus. Anschliessend sind die beiden Klappen am Mischventil zu schliessen.

#### 4.3.3 Erhöhte Belastung der Motorkühlung

Die Wasserkühlung des Motors wird beim Umbau auf Diesel-Holzgasbetrieb durch den dem Wasserkühler vorgeschalteten Gaskühler beeinträchtigt. War die Kühlung bei Dieselpbetrieb genügend, so zeigte sich bei Diesel-Holzgasbetrieb, dass bei Aussentemperaturen von über 25°C das Kühlwasser des Motors bei schwerer Arbeit die 90°C-Marke übersteigt, und der Motor zu klopfen beginnt, begleitet von einem starken Leistungsabfall. Dem Problem wurde dadurch begegnet, dass anstelle des Ventilatorflügels mit sechs Blättern ein solcher mit neun Blättern montiert wurde. Die dadurch um etwa 30 % höhere Lufttrate reicht nun auch für schwierige Bedingungen aus.

#### 4.3.4 Gas-Luft-Mischverhältnis

Das für eine gute Leistung optimale Gas-Luft-Verhältnis hängt einerseits von der jeweiligen Motordrehzahl und andererseits auch von der Zündölmenge ab. Die von Tobler [9] und Tognoni [10] gemachte Feststellung, wonach für eine höhere Motordrehzahl sowohl die Zündölmenge wie auch der Luftüberschuss grösser sein müssen, bestätigte sich in unseren Versuchen erneut (Abb. 12). Nach Tobler bildet der grosse Zündverzug bei kleiner Zündölmenge und hohen Drehzahlen die Hauptschwierigkeit. Um diese in erträglichen Grenzen zu halten, muss mit mehr Luftüberschuss gefahren werden, was aber den Gemischheizwert und damit die erzielbare Motorleistung herabsetzt.

Das optimale Gas-Luft-Verhältnis liegt im Bereich von 1 : 1 bei 1200 und 1 : 1,38 bei 2000 Motorumdrehungen, wenn die Zündölmenge entsprechend der Charakteristik von Abbildung 4 eingestellt ist. Mit einer höheren Zündölmenge könnte auch im Bereich von 2000 Motorumdrehungen mit einem fetteren Gemisch gefahren werden.

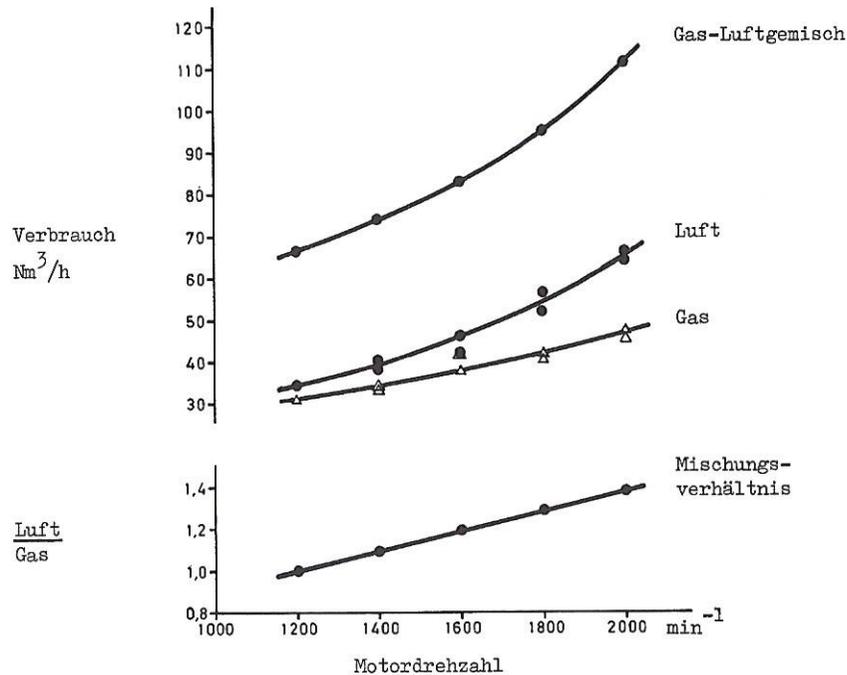


Abb. 12: Gas-Luftgemisch bei Vollastbetrieb

#### 4.3.5 Eignung und Gesteuerungskosten von unterschiedlich aufbereitetem Holz

Für eine möglichst gute Leistung, verbunden mit wenig Störungen, kommt nur gesundes Holz in Frage. Es darf keine Fremdkörper wie Metalle, Steine usw. enthalten. Es muss praktisch frei sein von Sägemehl, Blättern und Reisig. Das Gasholz sollte möglichst in gleichmässiger Stückgrösse und zum Überwiegenden Teil aus Hartholz bestehen. Das Holz sollte etwa ein Jahr gelagert und der Wassergehalt nicht höher als 22 % sein. Die Stückgrösse darf in der Länge 8 cm nicht übersteigen. Andernfalls verklemmt sich das Holz im Generator, was zur Hohlraumbildung, verbunden mit einer unregelmässigen Gasproduktion, führt. Ausgesprochen feines Holz wie Späne und Splitter ergeben schlechte und zu feine Holzkohle, wodurch der Staubgehalt des Holzgases merklich ansteigt. Die Folge davon sind kürzere Reinigungsintervalle des Gasfilters.

Das für die Versuche verwendete Gasholz bestand aus:

- einem Holzklotzengemisch, bestehend aus einem Drittel Tannen- und zwei Dritteln Buchenholz, gemäss Abbildung 13; Holzfeuchte zwischen 18 und 20 %.
- Hackholz in der Schnittlänge von 4 bis 5 cm und 8 bis 10 cm, gemäss Abbildung 14; Holzfeuchte zwischen 12 und 20 %.
- Holzschnitzen, wie sie für automatische Feuerungsanlagen verwendet werden, gemäss Abbildung 15; Holzfeuchte zwischen 20 und 24 %.

Die Versuche mit den Holzschnitzen (c), Abbildung 15, verliefen sehr negativ, sodass schon nach wenigen Betriebsstunden im Bereich der Trocknungs- und Verkohlungszone der Inhalt derart zusammenbakte, dass kaum mehr eine Gasproduktion stattfand. Zudem stieg der Unterdruck im Generatorausgang sehr stark an, was einen grossen Leistungsabfall des Motors zur Folge hatte.

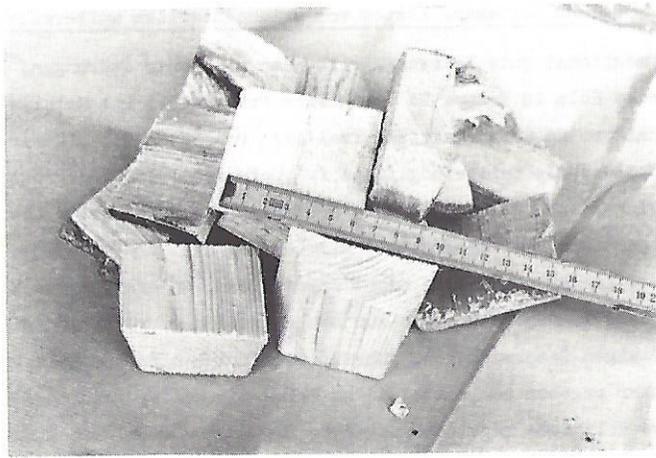


Abb. 13: Klötzchenholz aus Spalten.

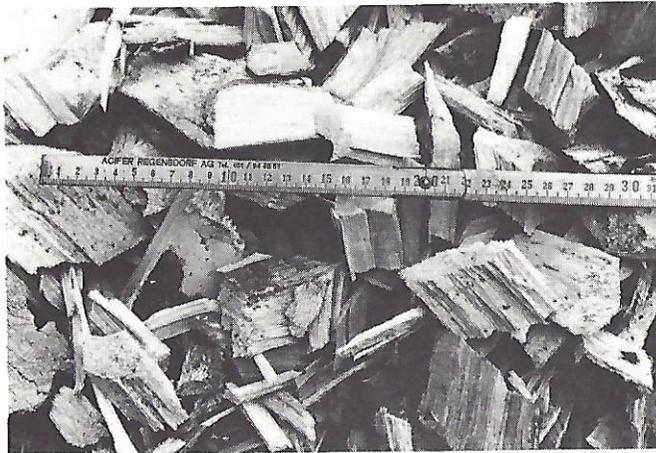


Abb. 14: Hackholz aus Aesten, Schnittlänge 4 bis 5 cm.



Abb. 15: Holzschnitzel aus Schwarten und Stämmen.

Hackholz (b) in der Schnittlänge von 8 bis 10 cm eignet sich für diese Generatorgrösse und -konstruktion nicht, weil wegen der ausgeprägten Hohlraum- und Brückenbildung im Generator die Gasproduktion unregelmässig wird. Ausserdem lässt sich das Hackholz in dieser Schnittlänge sehr schlecht in Säcke abfüllen und wieder entleeren.

Hackholz (b) kann in der Schnittlänge von 4 bis 5 cm ebensogut wie Klötzchenholz verwendet werden. Besonders günstig ist es aber, wenn vor dem Hacken die Äste im Durchmesser von weniger als etwa 2 cm ausgeschieden werden, oder mittels Sortiermaschine der Anteil des zu feinen Holzes aus dem Hackgut gesiebt wird. Bei einem Raumgewicht von  $285 \text{ kg/m}^3$  ist der Raumbedarf rund fünfzehnmal grösser als für die entsprechende Dieselmengen. Um in der Praxis einen Treibstoffvorrat von normalerweise zirka 50 Litern pro Tank zu ersetzen, müssten auf dem Traktor elf Säcke à 70 l (bzw. à 20 kg) Hackholz mitgeführt werden!

#### Gestehungskosten für Hack- und Klötzchenholz

Holzschnitzel konnten in der Praxis nicht befriedigen und werden deshalb nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Kostenberechnung für Hack- und Klötzchenholz (Preisstand Herbst 1980)

Position	Hackholz Buschholzhacker mit Zapfwellenantrieb	Klötzchenholz Brennholzfräse und Klötzchenmaschine
Maschinen: Anschaffungskosten	14'000.--	5'000.--
Jährliche Auslastung	250	250
Leistung: m <sup>3</sup> Gasholz/h	3	0,9
Leistung kg Gasholz/h (Holzfeuchte 18 %)	840	250
Maschinenkosten (Miete)	18.--	5.--
Kosten für Antrieb Traktor/Elektromotor	13.--	-.60
Lohnkosten 2 AK à Fr. 10.50	21.--	21.--
Aufarbeitungskosten	52.--	26.60
Aufarbeitungskosten	6.20	10.60
<b>Holzkosten:</b>		
Hackholz (m <sup>3</sup> von 285 kg à Fr. 18.--)	6.30	-.--
Spalten (Ster von 455 kg à Fr. 50.--)	-.--	11.--
Total Gesamtkosten für 100 kg Gasholz	12.50	21.60
Total Gesamtkosten für 1 Liter Dieselöl-ersatz (4,5 kg Gasholz = 1 Liter Dieselöl)	0.56	0.97

4.3.6 Gasreinigung mit Trockenluftfilter

Der Trockenluftfilter "MANN und HUMMEL" Typ 45 440 65 104, welcher in unseren Versuchen an Stelle des sperrigen Glasgewebefilters angebaut wurde, ist von seinen Abmessungen her gesehen sehr interessant. Seine Aussenmasse sind etwa ein Drittel, die Filterfläche ist mit 5,6 m<sup>2</sup> jedoch mehr als doppelt so gross wie beim Glasgewebefilter. Die Filterwirkung scheint sehr gut zu sein, es konnten keine "Staubansätze", weder im Mischrohr noch an den Einlasskanälen zu den Einlassventilen, festgestellt werden. Die Filterwartung muss alle 20 bis 30 Betriebsstunden erfolgen, wobei der Zeitpunkt leicht daran zu erkennen ist, dass der Unterdruck im Ansaugrohr unzulässig hoch wird und deshalb die Luftmischklappe fast oder ganz geschlossen werden muss.



Abb. 161 Der Gasfilter MANN und HUMMEL kann schnell demontiert und zum Reinigen leicht ausgeklopft oder ausgewaschen werden.

Der Filtereinsatz ist leicht und schnell zu demontieren. Zum Reinigen kann der Einsatz leicht ausgeklopft oder mit einem milden Waschmittel ausgewaschen werden, wobei das letztere anschliessend eine Trocknungszeit von etwa zwei Tagen benötigt.

Die Reinigungsintervalle sind mit 20 bis 30 Betriebsstunden relativ kurz. Zudem stellten wir fest, dass sich nur etwa 40 bis 50 % der gesamten Staubmenge im Zyklonvorabscheider ablagert, während etwa 50 bis 60 % im Pico-Luftfilter zurückbleiben. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde dem ersten Zyklonabscheider noch ein zweiter, kleinerer nachgeschaltet, in der Hoffnung, damit den Staubanteil im Gas zu verringern und die Reinigungsintervalle des Pico-Luftfilters zu verlängern. Das Ergebnis war jedoch negativ, die Staubabscheidung zu gering und der Druckverlust zu hoch.

Dauerversuche über mehrere hundert Betriebsstunden konnten mit dem Filtereinsatz nicht gefahren werden, aber aufgrund der gemachten Erfahrung kann man bei sorgfältiger Pflege mit einer Standzeit von 500 Betriebsstunden oder einem Jahr rechnen.

#### 4.3.7 Gaszusammensetzung bei verschiedenen Motor-Betriebszuständen und Holzaufbereitungsarten

Obwohl es nicht Aufgabe des Projektes sein konnte, die chemisch-thermischen Vorgänge der Holzgasaufbereitung zu untersuchen, waren Gasanalysen dennoch unumgänglich, um sich ein Bild über das Leistungsvermögen des benutzten Holzgasgenerators bei verschiedenen Betriebszuständen machen zu können.

Die EMPA erklärte sich einverstanden, die entsprechenden Analysen durchzuführen. Die Abbildung 17 zeigt den Versuchsstand. Die Versuche wurden sowohl mit Hackholz als auch mit Klötzchenholz durchgeführt.

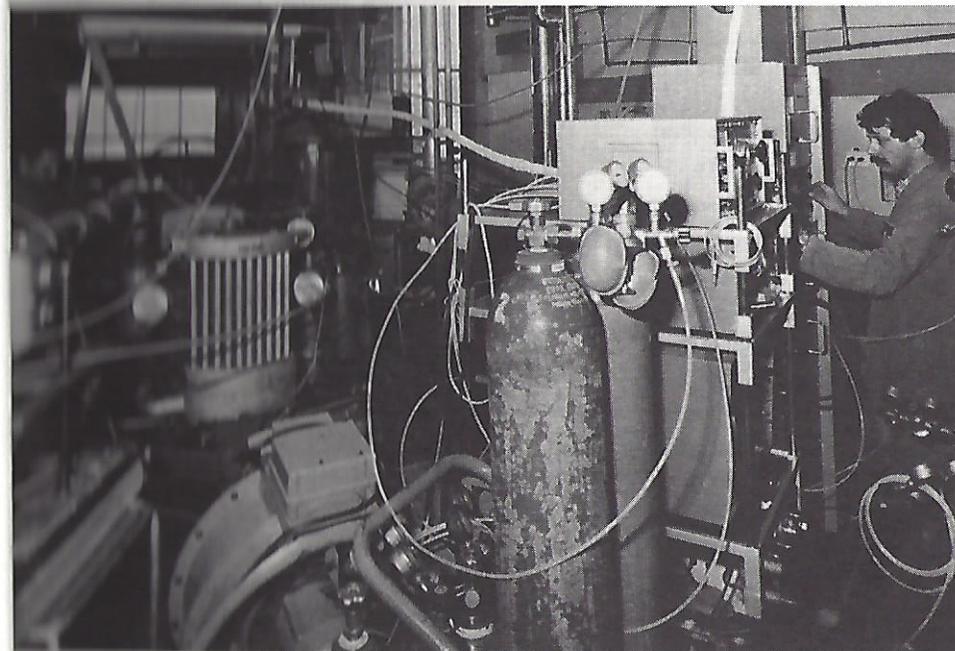


Abb. 17) Versuchsstand zur Entnahme der Gasproben.

Tabelle 3: Analyse des verwendeten Hack- oder Klötzchenholzes  
(Quelle: EMPA-Bericht)

Bestandteile	Hackholz Mischung (Buche, Tanne, Esche)	Klötzchenholz Hartholz (Buche)
a) Wassergehalt eingesandte Probe %	13,2	12,7
b) Holz, lufttrocken:		
- Wassergehalt %	4	2,5
- fixer Kohlenstoff %	14,9	15,0
- flüchtige Bestandteile %	80,2	80,9
- Kohlenstoffgehalt total %	47,5	47,9
- Wasserstoffgehalt total %	5,7	5,7
- Heizwert oberer MJ/kg	18,84	18,98
- Heizwert unterer MJ/kg	17,46	17,62

Die Gastemperatur am Generatorausgang ist gemäss Tabelle 4 bei gleichem Motorzustand bei Klötzchenholz durchwegs höher als bei Hackholz. Umgekehrt ist der am Generatorausgang gemessene Unterdruck stets deutlich höher als bei Klötzchenholz, was auf einen erhöhten Strömungswiderstand bei Hackholz hindeutet.

Bei den Gasanalysen lassen sich keine eindeutigen Tendenzen feststellen. Immerhin scheint der Restsauerstoffgehalt bei Hackholz höher als bei Klötzchenholz. Ebenso scheint der Gehalt an Methan und höheren Kohlewasserstoffen bei Hackholz tendenzmässig höher zu liegen als bei Klötzchenholz. Umgekehrt scheint bei Klötzchenholz der Wasserstoffgehalt eher etwas höher zu sein. Vermutlich dürften diese Unterschiede auf die unterschiedlichen Temperatur- und Unterdruckverhältnisse zurückzuführen sein. Insgesamt sind gegenüber den in der Literatur vorgefundenen Angaben keine grösseren Differenzen zutage getreten.

Gastemperatur und Unterdruck bzw. Zusammensetzung des trockenen Gases in Volumen- prozent	Vollast bei Motorrehzahl von ...				Vollast 50 % bei Motorrehzahl von ...				Leerlauf/ Motor- drehzahl von ...					
	2000 min <sup>-1</sup>		1600 min <sup>-1</sup>		2000 min <sup>-1</sup>		1600 min <sup>-1</sup>		2000 min <sup>-1</sup>		1600 min <sup>-1</sup>		700 min <sup>-1</sup>	
	Hh	Kh	Hh	Kh	Hh	Kh	Hh	Kh	Hh	Kh	Hh	Kh	Hh	Kh
Gastemperatur *)	340	380	312	361	288	340	251	322	158	210	13,5	56,0	1,6	10,2
Unterdruck *)	71	46	62	28	49	28	32	15	7	7	17,2	17,2	1,4	1,4
Wasserstoff	16,9	16,4	17,0	19,1	17,2	19,3	16,0	19,1	.	13,5	13,5	56,0	1,6	10,2
Stickstoff	47,3	51,2	48,2	46,9	48,3	47,6	50,2	45,3	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4
Sauerstoff	3,3	0,7	2,9	1,1	2,0	1,7	2,0	1,3	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4
Kohlenmonoxyd	20,0	19,4	20,3	19,7	18,9	22,9	21,3	19,8	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4
Kohlendioxyd	9,8	10,7	9,4	11,2	9,9	6,9	8,3	12,4	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4
Methan	2,3	1,4	1,8	1,9	3,5	1,4	0,9	2,0	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4
höhere Kohlenwasserstoffe	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	.	17,2	17,2	17,2	1,4	1,4

Hh = Hackholz

Kh = Klötzchenholz

. = infolge Panne keine Resultate

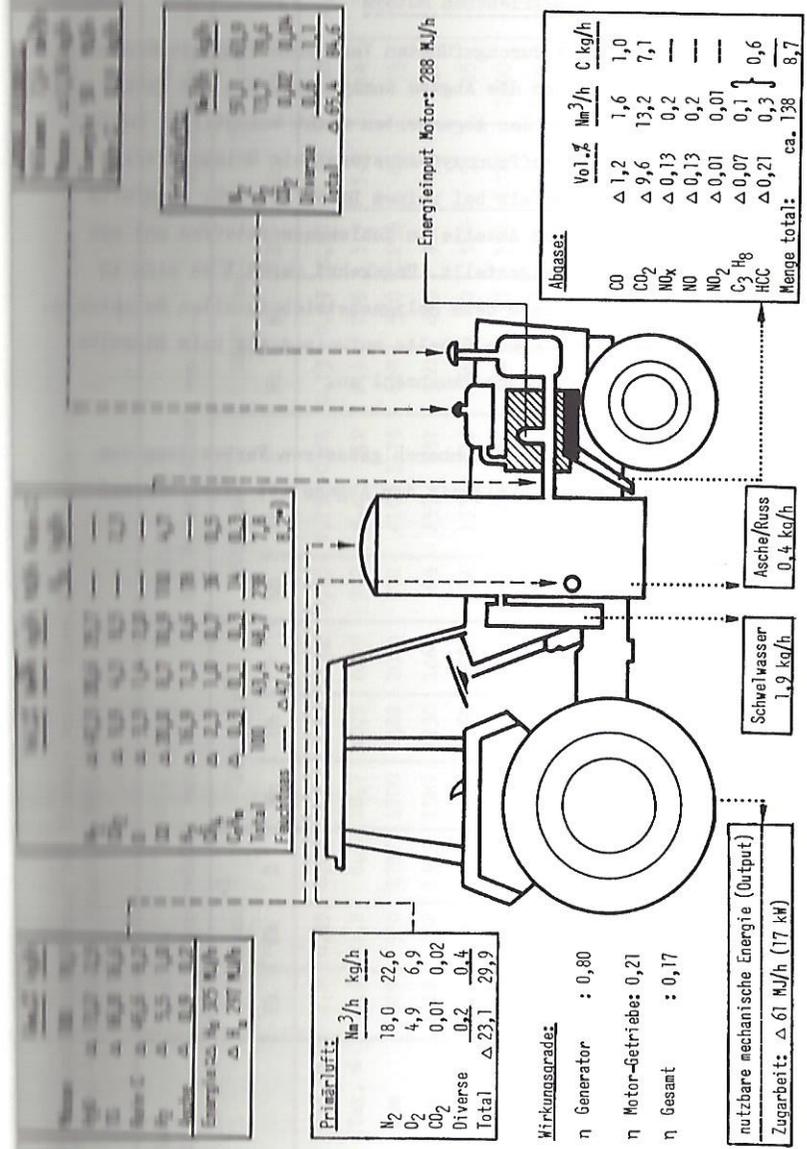
\*) = je am Generatorausgang

#### 4.3.8 Massen- und Volumenströme sowie Energiebilanz

Anlässlich der für die Entnahme der Gasproben durchgeführten Prüfstandmessungen bot sich auf dem Rollenprüfstand der EMPA Gelegenheit, auch die an den Hinterrädern abgegebene mechanische Zugleistung zu messen. Abbildung 18 zeigt schematisch die Massen- und Volumenflüsse einmal für den Holzgasgenerator und in zweiter Stufe auch für den im Zweistoffsystem betriebenen Motor mit Getriebe und Radantrieb. Leider war es bei den Kurzzeitmessungen nicht möglich, den Holzverbrauch gravimetrisch zu erheben, sodass er anhand der Gemischgasmenge errechnet werden musste. Daraus ergibt sich eine Differenz zu der aus der Primärluft berechneten N-Bilanz.

Was den Gesamtwirkungsgrad von 17,6 % betrifft, so ist zu berücksichtigen, dass Getriebe- und Reifenübertragungsverluste bereits enthalten sind. Bei reinem Dieselbetrieb errechnet sich bei gleicher Motorbelastung und gleicher Motordrehzahl ein Gesamtwirkungsgrad von 22,9 %. (Bei Vollast und reinem Dieselbetrieb läge der Wirkungsgrad bei 26,2 %). Wird im Diesel-Holzgasbetrieb der Generatorwirkungsgrad von rund 80 % abgezogen, so errechnet sich ein Motor-Getriebewirkungsgrad von 21,2 %. Das bedeutet, dass der Dieselmotor die im Holzgas vorhandene Energie nur um etwa 7 % schlechter verwertet als reinen Dieseltreibstoff.

Wesentlich ungünstiger präsentieren sich die Wirkungsgrade des Dieselholzgassystems im Teillastbereich, in welchem sowohl der Holzgasgenerator als auch der Motor selbst nicht mehr optimal arbeiten.



**Anmerkungen:**

- mit Δ versehene Zahlen = Messwerte; übrige Werte errechnet
- \*) = Rein C in Gas und C-Reste in Staub, Teer, Schmelzwasser und Asche
- infolge Komplexität des Versuches war statistische Absicherung durch Wiederholungen nicht möglich

Abb. 18: Volumenströme, Materialflüsse und Energiebilanz des Dieselholzgasstraktors bei maximaler

4.3.9 Abgase des dieselholzgasbetriebenen Motors

Gleichzeitig zu den an der EMPA durchgeführten Versuchen über die Generatorgaszusammensetzung wurden auch die Abgase analysiert. Wie der Tabelle 5 zu entnehmen ist, treten in den Abgaswerten recht beachtliche Unterschiede auf. So ist der Kohlenstoffmonoxyd-Ausstoss beim Holzgasbetrieb mindestens 10 bis 50 mal grösser als bei reinem Dieselbetrieb. Ebenfalls wurden beim Holzgasbetrieb höhere Anteile an Kohlenwasserstoffen und zyklischen Kohlenwasserstoffen festgestellt. Umgekehrt verhält es sich im Falle der Stickoxyde, wo die Abgase beim Holzgasbetrieb in allen Belastungs- und Drehzahlbereichen stets geringere Gehalte aufweisen als beim Dieselbetrieb. Dies trifft auch für die Bosch-Rauchzahl zu.

Bei einer zwar im Moment nicht voraussehbaren grösseren Verbreitung des Dieselholzgassystems müsste die Giftigkeit der Abgase mit grösserer Aufmerksamkeit weiterverfolgt werden.

Abgase bzw. Rauchzahl	Vollwert bei Motorleistung von ...												Teilwert bei Motorleistung von ...												
	2000 min <sup>-1</sup>				1500 min <sup>-1</sup>				2000 min <sup>-1</sup>				1500 min <sup>-1</sup>				2000 min <sup>-1</sup>				1500 min <sup>-1</sup>				
	Hh	Kh	D		Hh	Kh	D		Hh	Kh	D		Hh	Kh	D		Hh	Kh	D		Hh	Kh	D		
CO	1,2	0,35	0,02	0,75	0,25	0,02		0,55	0,73	0,01	0,73	0,89	0,02	0,98	1,30	0,16									
CO <sub>2</sub>	9,6	11,2	6,4	10,7	10,7	6,17		9,2	9,4	4,2	8,1	7,8	3,9	3,7	6,4	1,3									
NO <sub>x</sub>	1288	970	1787	1700	1582	2000		472	610	1175	608	510	1250	83	75	139									
NO	1212	832	1387	1587	1230	1468		388	455	837	540	450	900	32	40	65									
NO <sub>2</sub>	76	138	400	113	360	532		84	155	338	68	60	350	51	35	74									
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	710	650	378	605	415	352		540	780	380	585	520	332	1075	2400	399									
HCC	2130	1950	1134	1815	1245	1056		1620	2340	1140	1755	1560	996	3225	7200	1197									
Bosch Rauchzahl	1,1	0,6	1,2	1,2	0,4	1,2		0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2	0,8									

Hh = Hackholz  
 Kh = Klötzchenholz  
 D = reiner Dieselbetrieb

4.3.10 Schwelwasseranfall und dessen Beseitigung

Der Anfall an Schwelwasser hängt vor allem von der Auslastung des Generators und von dem Feuchtegehalt des Holzes ab. Die grösste Schwelwassermenge wird produziert, wenn der Traktor immer wieder ausser Betrieb gesetzt wird, wie zum Beispiel in den Versuchen mit Strohtransporten (Tab. 1). Bei diesen Versuchen wurden Strohballen auf dem Feld mit einem Ballenlader geladen, zum Hof transportiert und dort von Hand abgeladen. Während des Abladevorganges, der etwa 0,5 h dauerte, wurde der Traktor jeweils ausser Betrieb gesetzt. Der Schwelwasseranfall war mit 1,6 und 1,9 l/h (bis zu 14 % des Holzgewichtes) sehr hoch. Wie zu erwarten, war der Schwelwasseranfall bei langen und schweren Einsätzen am geringsten und betrug beispielsweise beim Pflügen mit Einscharpflug lediglich 1,1 l/h, entsprechend 8 % des Holzgewichtes.

Im Durchschnitt aller Versuche betrug der Schwelwasseranfall 1,33 l/h oder 10 % des Holzgewichtes.

Zur Zeit des letzten Weltkrieges konnte das von den Holzgasgeneratoren anfallende Schwelwasser noch an bestimmten Plätzen in das Erdreich abgelassen werden. Die heutigen Umwelt- und Gewässerschutzvorschriften verbieten dies. Somit musste eine andere, bessere Lösung zur Beseitigung des Schwelwassers gesucht werden. Th. Conrad von der EAWAG zieht in seinem Bericht über die Untersuchung zur Beseitigung von Schwelwasser aus Holzgasgeneratoren in der Landwirtschaft nachstehende Schlussfolgerung:

- Zur Beseitigung kleinerer Mengen Schwelwasser, wie sie aus Holzgas-Generatoren im landwirtschaftlichen Betrieb anfallen, kann die relativ gute Abbaubarkeit der Inhaltstoffe dieses Abwassers in Mischung mit einem N- und P-haltigen Substrat ausgenützt werden. Dies kann durch Zugabe des Schwelwassers in die Jauche- oder Mistgrube erfolgen. Dabei entfällt auch die getrennte Neutralisation des stark sauren Schwelwassers.
- Sollte diese Beseitigung nicht möglich sein, wäre eine Stapelung des Schwelwassers in einem Behälter zur Abscheidung von Teer, zur Neutralisation mit Kalk und zum Rückhalten der Feststoffe erforderlich. Die wässrige, neutrale Phase könnte der häuslichen Kanalisation zugegeben werden.

4.4 Wirtschaftlichkeit

Es ist lediglich um den Ersatz des bisherigen Dieseltreibstoffes geht, wird keine volle Kostenrechnung durchgeführt, sondern es sollen nur die Mehrkosten pro Liter ersetzten Dieseltreibstoff ausgewiesen werden. Der Kostenvergleich gilt streng genommen nur für die Leistungsklasse 30 bis 40 kW. Für grössere Traktoren wären die Mehrkosten etwas kleiner.

4.4.1 Umbaukosten bestehender Traktoren auf Dieselholzgas

Die Umbaukosten bestehender Traktoren auf Dieselholzgas setzen sich zusammen aus den Kosten für die Holzgasanlage sowie den Aufwendungen für Anpassungen und Montagearbeiten.

Die Kosten für die Holzgasanlage betragen gemäss Offerte vom 10. Oktober 1980 der Firma Schmid AG, Heizkesselbau, 8360 Eschlikon:

• Für den Gasgenerator	Fr. 5'532.--
• Für Gasreiniger und Gaskühler	Fr. 1'450.--
• Für Mischventil und Steuergestänge	Fr. 1'119.--
• Für Anbauplatte	<u>Fr. 71.--</u>
Total Anlagekosten	Fr. 8'172.--
Anpassungs- und Montagearbeiten	zirka <u>Fr. 528.--</u>
TOTAL Umbaukosten pro Traktor	Fr. 8'700.-- =====

Die Kostenberechnung basiert auf einer serienmässigen Produktion von mindestens 1'000 Anlagen.

4.4.2 Gesamtkostenvergleich pro Treibstoffeinheit

Die folgende Jahreskostenberechnung basiert auf einer geschätzten Nutzungsdauer der Holzgasanlage von acht Jahren und einer jährlichen Betriebszeit des Traktors von zirka 850 Stunden, bzw. einem Treibstoffverbrauch von 1'000 Litern pro Jahr. Der Reparaturfaktor für die Holzgasanlage wurde auf 1,5 veranschlagt, das heisst während der gesamten Nutzungsdauer betragen die Reparaturkosten den 1,5-fachen Betrag der Anschaffungskosten.

Tabelle 6: Anlage- und Bedienungsmehrkosten (Preisstand 1980)

	Einheit	
a) <u>Investitionskosten</u>		
Anschaffungskosten der Anlage, gemäss Offerte	Fr.	8'172.--
Anpassungs- und Montagearbeiten, Schätzung	Fr.	528.--
Total Umbaukosten	Fr.	8'700.--
		=====
b) Berechnung der Kosten pro Liter Treibstoffersatz	Fr./l Treibstoff	
Amortisation $\frac{8'700.--}{24'000 \text{ l}} =$	Fr./l	0.362
Zins 5 % von $\frac{0,6 \cdot 8'700.--}{3'000 \text{ l}} =$	Fr./l	0.087
Reparaturkosten $\frac{8'700.-- \cdot 1,5}{24'000 \text{ l}} =$ (inkl. Filterersatz)	Fr./l	0.543
Wartung $\frac{1/10 \cdot 11,5}{3,5 \text{ l}} =$	Fr./l	0.328
Inkonvenienz wegen Minderleistung (während 10 % der Betriebszeit 1/4 geringere Leistung)	Fr./l	0.080
Total Anlage- und Bedienungsmehrkosten	Fr./l	1.40

Tabelle 7: Gesamtkosten pro Liter eingesparten Dieseltreibstoff

	Einheit	Hackholz	Klötzchenholz
Kosten für Gasholz	Fr./l	0.56	0.97
Anlage- und Bedienungsmehrkosten	Fr./l	1.40	1.40
Gesamtkosten total	Fr./l	1.96	2.37

## 5. Verdankungen

Während der ganzen Versuchsperiode durften wir von verschiedenen Stellen immer wieder wertvolle Ratschläge entgegennehmen, die hier bestens verdankt seien. Speziell erwähnen und verdanken möchten wir die umfangreichen Vorarbeiten des Schweizerischen Verbandes für Landtechnik (W. Bühler) sowie des Zentralschweizerischen Technikum in Luzern/Horw (Prof. R. Tognoni und H. Zwyrer). Weiterer Dank gebührt Dr. K. Banholzer, Dr. B. Bieri und M. Veron von der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) für die Uebernahme von Motoröl-, Holzgas- und Abgasanalysen sowie ferner Dr. Th. Konrad von der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) für die Schwelwasseranalysen und den Armeefahrzeugparks Bronschhofen und Hinwil für die Zuverfügungstellung von Personal und Prüfständen sowie A. Fritschi von den Eidg. Flugzeugwerken für die zeichnerische Aufnahme der ganzen Versuchsanlage. Schliesslich sei auch der Traktorenfabrik Hürlimann für die preisgünstige Ueberlassung eines Versuchstraktors gedankt.

## 6. Schlussfolgerungen

Nach der dreijährigen, nunmehr abgeschlossenen Versuchsperiode können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Der Versuchstraktor konnte soweit entwickelt werden, dass er in allen landwirtschaftlichen Einsatzbereichen betriebssicher arbeitet.

Die Beschaffung von Holz als dezentralisiert anfallender, regenerierbarer Rohstoff dürfte für Landwirtschaftsbetriebe keine unüberwindlichen Hindernisse darstellen.

Im Hackholz ist eine Aufbereitungsart gefunden worden, die von den Landwirten dezentralisiert und kostengünstig durchgeführt werden kann.

Im Vergleich zum Traktor mit normalem Dieselbetrieb weist demgegenüber der Dieselholzgasbetrieb folgende Erschwernisse und Nachteile auf:

- Die Beschaffung und die Aufarbeitung von Gasholz ist arbeitsaufwendig.
- Die Betriebsstoffkosten für die am Traktor nutzbare Kilowattstunde sind derzeit rund doppelt so hoch wie bei reinem Dieselbetrieb.
- Dieseltreibstoff ist trotzdem notwendig (Zweistoffbetrieb).
- Eine Motorleistungseinbusse von zirka 25 % muss in Kauf genommen werden.
- Auf dem Fahrzeug lässt sich nur eine sehr beschränkte "Treibstoffreserve" mitführen.
- Platzbedarf für die gesamte Anlage am Traktor: Die Anbaumöglichkeit für gewisse Zusatzgeräte ist erschwert, eventuell sogar verunmöglicht.
- Zusätzliches, seitlich angebrachtes Gewicht am Traktor erhöht die Kippgefahr.
- Vermehrte, unbequeme und schmutzige Wartung.
- Vergiftungs- und Brandgefahr.
- Der Gesamtwirkungsgrad ist um rund einen Drittel geringer als beim konventionellen Dieseltraktor.

Aufgrund der genannten Nachteile erscheint es als wenig aussichtsreich, dass das untersuchte Diesel-Holzgasprinzip als langfristige Energie-Alternative für den Betrieb von Landwirtschaftstraktoren grosse Bedeutung erlangen könnte.

Hingegen könnte dieses als funktionstüchtig zu betrachtende System bei einem kurz- bis mittelfristigen gänzlichen Ausfall der Energiezufuhren und beim Fehlen anderer Alternativen zum Strecken der Dieselölvorräte durchaus in Betracht gezogen werden. In diesem Fall müsste man sich auf bestimmte, für den Umbau gut geeigneter, grösserer Traktortypen konzentrieren.

Eine weitere zukünftige Möglichkeit zur Nutzung des Holzgassystems ist im Stationärbetrieb in Kombination von Gasmotoren mit Wärmepumpe oder mit Elektrogenerator (Wärme-Kraft-Koppelung) zu sehen, weil hier mehrere der erwähnten Nachteile wegfallen würden. Um einen guten Gesamtwirkungsgrad zu erzielen, muss allerdings vorausgesetzt werden, dass sich die anfallende Abwärme jederzeit voll nutzen lässt.

## 7. Zusammenfassung

In den Jahren 1977 bis 1980 wurden praktische Versuche mit einem Traktor mit Diesel-Holzgasanlage durchgeführt. Diese zeigten zusammengefasst folgendes Bild:

Der Motor arbeitete während der ganzen Versuchsdauer ohne grössere Störungen. Die bei heissem Wetter und grosser Belastung anfänglich aufgetretenen Klopferscheinungen konnten mit einer verstärkten Motor Kühlung behoben werden. Die Leistung am Motor mit maximal 25 kW (34 PS) bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  liegt für diese Motorgrösse (Hubraum 2,95 Liter) bei Diesel-Holzgasbetrieb im üblichen Rahmen. Gegenüber reinem Dieselbetrieb bedeutet dies eine Leistungseinbusse von etwa 25 %.

Der Gasholzverbrauch von durchschnittlich 13,4 kg/h Holzklötzchen oder Hackholz kann im Vergleich zu anderen Autoren als normal bezeichnet werden. Er variiert stark und wird vor allem durch die Belastung des Gasgenerators, die Holzsorte (Hart- oder Weichholz) sowie die Fahrweise beeinflusst. Im Schnitt ersetzen 4,5 kg Holz einen Liter Diesel-Treibstoff. Der Verbrauch an Zündöl liegt bei durchschnittlich 1,2 l/h, das heisst bei etwa 30 % des Verbrauches vom normalen Dieselbetrieb. Dieser Verbrauch ist vor allem im Teillastbereich hoch und wird im weiteren durch die Fahrweise erheblich beeinflusst.

Ein Holzklötzchengemisch von einem Drittel Tanne und zwei Dritteln Buche sowie Hackholz in der Schnittlänge von 4 bis 5 cm eignen sich gut für die Holzvergasung, das letztere insbesondere dann, wenn Astholz unter 2 cm Durchmesser vor dem Hacken ausgeschieden wird.

Je Liter Treibstoffersatz belaufen sich derzeit die Holzkosten inklusive Holzaufbereitung bei Klötzchenholz auf etwa Fr. 1.--, bei Hackholz auf etwa Fr. -.60. Werden noch die Mehrkosten für den Betrieb der Gasgeneratoranlage (Amortisation, Reparatur, Bedienung, usw.) dazugerechnet, so kostet 1 Liter ersetzter Dieseltreibstoff bei Klötzchenbetrieb rund Fr. 2.40 und bei Hackholzbetrieb zirka Fr. 2.--.

Der neu eingesetzte Gasfilter hat sich bezüglich Gasreinigung gut bewährt. Ein abnormaler Motorölverbrauch oder ein übermässiger Verschleiss des Motors konnte nicht festgestellt werden.

Der Schwelwasseranfall hängt vor allem stark von der Auslastung des Generators ab und beträgt durchschnittlich 10 % des Holzgewichtes. Kleinere Mengen dürfen ohne Schadenfolge der Gulle beigemischt werden.

Der Anbau der Generatorgasanlage ist wegen der vielseitigen Verwendung des Traktors sehr schwierig geworden. Als einzige Anbaumöglichkeit für den Gasgenerator bietet sich nach wie vor der seitliche Freiraum zwischen Vorder- und Hinterrad an. Bei nur hinterrad-getriebenen Traktoren genügt der Freiraum auch für den seitlichen Fahreraufstieg, bei Allradantrieb werden die Platzverhältnisse wegen der grösseren Vorderräder bereits sehr knapp. An Traktoren der neuesten Entwicklung mit integrierten Fahrer кабинен ist der Anbau von Gasgeneratoren ohne umfangreiche Abänderungen am Traktor gänzlich unmöglich. Die Generatorgasanlage weist betriebsbereit ein Gewicht von zirka 270 kg auf, infolge des seitlichen Anbaues am Traktor wird der Schwerpunkt um etwa 12 cm zur Seite verschoben. Dadurch erhöht sich die Kippgefahr des Traktors bei Fahrten an Hanglagen.

### 7.1 Résumé

#### Investigation concernant le tracteur agricole avec système de Diesel-gaz de bois

De 1977 à 1980, nous avons entrepris des essais pratiques avec un tracteur fonctionnant sur un système combiné Diesel-gaz de bois. Voici l'énumération de nos observations:

Le moteur a fonctionné pendant toute la durée des essais pratiquement sans grand dérangement. Les cognements de moteurs qui se sont développés au début et qui étaient dus d'une part à la température ambiante fort élevée et d'autre part, à la charge importante à laquelle était soumise le moteur, ont pu être évités grâce à un refroidissement plus poussé du moteur. La puissance mesurée au moteur à raison de max. 25 kW (34 ch) et à 2000 tours/minute se situe dans un cadre normal pour cette puissance de cylindrée (2,95 litres). Si on compare celle-ci avec celle d'une commande à Diesel, la perte de puissance est d'environ 25 %.

La moyenne de consommation de gaz de bois de 13,4 kg/h (petits cubes de bois ou billots de bois), est normale. Cette consommation varie considérablement, suivant la charge à laquelle est soumise le générateur à gaz, suivant le bois utilisé (bois dur ou bois tendre); ainsi que selon le conducteur du tracteur. En moyenne, on peut dire que 4,5 kg de bois remplacent 1 litre de carburant Diesel. La consommation de l'huile d'allumage tourne autour de 1,2 litre à l'heure, c'est-à-dire environ 30 % de la consommation d'une commande normale à Diesel. Cette consommation relative est particulièrement élevée à charge partielle et est également fortement influencée par la façon de conduire le tracteur.

Un mélange de cubes - 1/3 de sapin et 2/3 de hêtre -, ainsi que des billots coupés à une longueur de 4 à 5 cm, se prêtent très bien pour la gazéification, d'autant plus si l'on a pris la peine au moment de la coupe du bois, d'éliminer les branchages de moins de 2 cm de diamètre.

Les frais pour un litre de ce carburant de remplacement s'élève à environ Frs. 1.-- quand il s'agit de petits cubes de bois et à environ Frs. -.60 quand il s'agit de billots. (Les travaux de coupe et de la préparation du bois sont compris dans ces prix.) Si l'on tient compte des frais supplémentaires pour l'installation du gazogène, ainsi que de l'amortissement, des réparations et de l'entretien, on arrive à environ Frs. 2.40 par litre avec les petits cubes de bois et environ à Frs. 2.-- avec les billots.

Le type de filtre à gaz qui a été utilisé pour les essais a donné de bons résultats. Nous n'avons constaté ni une consommation anormale d'huile de moteur, ni une usure exagérée de celui-ci. La partie d'eau résiduelle dépend fortement de l'utilisation du générateur; elle s'élève à environ 10 % du poids du bois. Des petites quantités de cette eau peuvent être sans autre mélangées au lisier.

L'emplacement de l'installation du générateur est devenu assez difficile à trouver, étant donné l'utilisation polyvalente des tracteurs.

Le seul emplacement possible pour monter le générateur à gaz est encore toujours l'espace latéral libre entre la roue avant et la roue arrière. Lorsqu'il s'agit de tracteurs à commande sur les roues arrières, l'espace est suffisant pour permettre au conducteur d'utiliser la marche d'accès sur le côté du tracteur. Pour ce qui est des tracteurs à commande sur toutes les roues, l'espace devient très précaire, à cause de la dimension des roues avant, nettement supérieure. Et pour les tracteurs nouvellement munis de cabine de sécurité, une installation de cette envergure n'est possible qu'après avoir prévu des modifications plutôt conséquentes. L'installation de gaz de bois présente, prête à l'emploi, un poids de 270 kg et une fois montée sur le tracteur, son point de gravité se déplace latéralement de 12 cm, donc le risque de renversement du tracteur sur les terrains en pente est plus grand.

## 7.2 Summary

### Investigation on agricultural tractors driven with Diesel-wood gas

In the years between 1977 and 1980, some practical tests with a wood gas driven tractor were undertaken in our Institute. Here, in summary, the results obtained:

The engine worked during the whole period of tests without any particular failures. Some knocking symptoms which were due to very hot weather were avoided through a stronger refrigeration of the engine. The capacity for these tractors were in a normal range (capacity at the engine 25 kW (34 PS) and 2000 revolutions per minute and 2,95 liter - cylinder). If one compares with pure Diesel engines, there is a capacity loss of approximately 25 %.

The consumption of wood-gas is at an average of 13,4 kg wooden cubes or chopped wood and can be considered as normal. It does vary considerably according to the load of the gas generator, but also according to the kind of wood used (hard wood or soft wood), as well as according to the way of driving the tractor. At an average one can say that 4,5 kg wood can replace one liter of Diesel fuel. The consumption of ignition oil is about 1,2 liter per hour at an average, i.e.: about 30 % of the consumption of a normal Diesel engine. This consumption is especially high with part-loading and differs very much according to the way of driving the vehicle.

A mixture of 1/3 in pine wood and 2/3 in beech wood as well as chopped wood with a length of about 4 to 5 cm is adequate for a good gasification. It is recommended to cut off branches with less than 2 cm diameter.

The costs for the wood, (per liter of substituted fuel) amount to Frs. 1.-- for wooden cubes and to Frs. -.60 for chopped wood, taking into account the wood processing. If you take into account the supplementary costs for the gas generator (depreciation, repairs, servicing etc. etc.) you reach an amount of Frs. 2.40 per liter of substituted fuel for wood cubes and Frs. 2.-- per liter for chopped wood.

A newly used gas filter has been very useful, from the gas-cleaning point of view. We have not observed any abnormal motor oil consumption or any exaggerated wear and tear of the engine.

The part of waste water depends highly on the utilization of the generator and is about 10 % of the weight of wood. Small quantities can be mixed to the liquid manure without any danger.

As far as the appropriate way of installing the gas generator is concerned, it has become more and more difficult due to the many sidedness of the utilization of the tractors now-a-days. The lateral free place is still the most appropriate one, between front- and rear wheel. With the rear-wheel drive tractors, there is even enough space for the driver's step (laterally), but for the all-wheel drive tractors and due to their larger front wheels, the space is very narrow. As for the newly built tractors with safety cabins, the installation of a gas generator is not possible without considerable modifications. The installation as a whole weighs some 270 kg and, due to this weight, the centre of gravity is shifted by 12 cm laterally. The result of this displaced centre of gravity increases of course the risks of turning-over on steep slopes.

8. Literaturverzeichnis

8.1 Im Bericht zitierte Autoren

- [1] Affolter, E. : Der Beitrag von Wald und Holz in der Energieversorgung der Landwirtschaft.  
Schweiz. Landwirtschaftliche Monatshefte 1/1980.
- [2] von Ah, J. : Das versorgungspolitische Konzept der Ernährungsplanung.  
Neue Zürcher Zeitung Nr. 36, 1980.
- [3] Belser, E. : Der Energieholzmarkt.  
Zeitschrift Wald und Holz Nr. 9/10, 1979.
- [4] Bosshard, H. und Steinmann, Ph. : Systemstudie Holzabfälle.  
Interner Zwischenbericht im Auftrag des schweizerischen Nationalfonds, Februar 1980.
- [5] Fischer, R. : Untersuchung über den Einfluss verschiedener Traktionsarten auf den Fremdenergiebedarf in der Landwirtschaft.  
Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre an der ETHZ, 1979.
- [6] Nordström, O. : Aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Ersatztreibstoffe in Schweden.  
Zeitschrift Motorlastwagen Nr. 18, 19, 20 und 22/1960.
- [7] Oberzolldirektion: Eidg. Landwirtschaftsstatistik über Treibstoffzoll-Rückerstattung.  
Unveröffentlichter Bericht 1980.

- [8] Studer, R. : Studie über den Energie-Input und -Output in der Schweizer Landwirtschaft in den Jahre 1939 bis 1976.  
Neue Zürcher Zeitung Nr. 28/1978.
- [9] Tobler, J. : Holz und Holzkohle als Treibstoff für Motorfahrzeuge.  
Verlag SGSM, Bern 1944.
- [10] Tognoni, R. : Technischer Bericht I und II 1973.  
Unveröffentlicht.

8.2 Weitere, konsultierte Literatur, zusammengestellt durch H. Meier

- Jantsch, F. : Fahrzeuggeneratoren: Bau, Betrieb, Einsatz.  
J. Kaspar & Co., Berlin W9, 1943.
- Jögert, P. : Grundlagen der Holzgasanlagen.  
Novi Sad, 1935.
- NN : Technische Anweisungen für Motorfahrzeuge, die mit Generatorgas betrieben werden.  
SGS 1960 aus dem Schwedischen übersetzt.
- NN : Holzgasgeneratoren.  
Prüfungsbericht. Oesterreichisches Kuratorium für die Wirtschaftlichkeit, 1939.

Des weiteren befindet sich ein über 100 Zitate umfassendes Literaturverzeichnis an der Bibliothek der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich.

9. Verzeichnis der Tabellen

	<u>Seite</u>
Tab. 1: Praktische Einsätze und Verbrauchswerte bei Dieselholzgasbetrieb	24
Tab. 2: Kostenberechnung für Hack- und Klötzchenholz (Preisstand Herbst 1980)	36
Tab. 3: Analyse des verwendeten Hack- oder Klötzchenholzes	40
Tab. 4: Zusammensetzung des im Generator erzeugten Holzgases in Abhängigkeit von Holzaufbereitungsart, Motordrehzahl und -belastung	41
Tab. 5: Abgaszusammensetzung bei Diesel- sowie Dieselholzgasbetrieb und verschiedenen Motordrehzahlen und -belastungen	45
Tab. 6: Anlage- und Bedienungsmehrkosten (Preisstand 1980)	48
Tab. 7: Gesamtkosten pro Liter eingesparten Dieseltreibstoff	48

10. Verzeichnis der Abbildungen

	<u>Seite</u>
Abb. 1: Landwirtschaftstraktor Hürlimann Typ D 110, umgebaut auf Diesel-Holzgasbetrieb	6
Abb. 2: Schnitt durch den Gasgenerator	8
Abb. 3: Funktionsschema der Diesel-Holzgasanlage	11
Abb. 4: Zündölbedarf in Abhängigkeit der Motordrehzahl	15
Abb. 5 a + b : Anstelle der Reglerzusatzfeder wird ein durch Tellerfedern elastischer Anschlag eingeschraubt	17
Abb. 6: Anordnung der Holzgasanlage am Versuchstraktor (alle Masse in cm)	18
Abb. 7: Mindestradstand in Abhängigkeit der Reifengrösse, die den nötigen Freiraum für den Gasgenerator gewährleistet	20
Abb. 8 a, b, c: Der auf Diesel-Holzgas umgebaute Traktor kann für alle üblichen landwirtschaftlichen Einsätze mit einer mehr oder weniger grossen Leistungseinbusse eingesetzt werden	23
Abb. 9: Das Nachbunkern ist bei laufendem Motor möglich	25
Abb. 10: Darstellung der Abhängigkeit des Primärluftbedarfs, der Herdbelastung, des Unterdrucks sowie der Gastemperatur von der erzeugten Generatorgasmenge	27
Abb. 11: Gas- und Zündölverbrauch bei Vollastbetrieb in Abhängigkeit der Motordrehzahl	29

	<u>Seite</u>
Abb. 12: Gas-Luftgemisch bei Vollastbetrieb	32
Abb. 13: Klötzchenholz aus Spalten	34
Abb. 14: Hackholz aus Aesten, Schnittlänge 4 bis 5 cm	34
Abb. 15: Holzschnitzel aus Schwarten und Stämmen	35
Abb. 16: Der Gasfilter MANN und HUMMEL kann schnell demontiert und zum Reinigen leicht ausgeklopft oder ausgewaschen werden	37
Abb. 17: Versuchsstand zur Entnahme der Gasproben (Foto EMPA)	39
Abb. 18: Volumenströme, Materialflüsse und Energiebilanz des Dieselholzgastraktors bei maximaler Leistung, Motordrehzahl 2000 min <sup>-1</sup>	43