

= o =

I - 73

B e r i c h t

Untersuchung über Verwendung und Klopfverhalten verschiedener Treibstoffe im Hesselman-Motor bei Saughub- und VerdichtungsHub-Einspritzung sowie bei Betrieb mit Vergaser.

---

Inhaltsangabe:

	Seite:
A) Zusammenfassung.	2
B) Zweck der Versuche.	3
C) Versuchsdurchführung, Aufbau der Versuchsanlage.	4
D) Allgemeine Untersuchungen über	
1. Änderung des Einspritzendes,	5
2. Änderung des Zündbeginns (Magnetzündung),	5
3. Änderung der Einspritzdauer,	6
4. Änderung der Verdichtung,	6
5. Änderung der Kühlwassertemperatur,	7
6. den Verlauf von Abgas- und Verbrennungstemperaturen,	7
7. die Aussetzergrenze bei verschiedenen Treibstoffen.	7
E) Prüfung und Vergleich von leicht- und schwer siedenden Treibstoffen, wie Benzol-Gemische, Benzol, Alkohole, Gasöle und Steinkohlenteeröle,	8
F) Erhöhung der Klopfestigkeit von	14
1. Gasöl durch Zusatz von B.V.-Benzol, Steinkohlenteeröl und Pb,	
2. Petroleum durch Zusatz von B.V.-Benzol und Steinkohlenteeröl.	
G) Vergleichsmessungen und Klopfverhalten bei Vergaser- und Einspritzbetrieb.	17
H) Einspritzen in den Saughub beim Hesselman-Motor.	21
J) Gegenüberstellung mit Vergaser- u. Dieselmotor	25

Zusammenfassung:

In der ersten Versuchsreihe wurde zunächst der Einfluß der Änderung des Einspritzbeginns bzw. Einspritzendes, des Zündbeginns, der Einspritzdauer, der Verdichtung und der Kühlwassertemperatur untersucht und in Schaubildern aufgetragen.

Weitere Versuche wurden mit Treibstoffen verschiedener Oktan- und Cetanzahlen sowie mit Alkoholen, Methyl- und Äthylalkohol, durchgeführt. In einem Schaubild wurde ferner das unterschiedliche Verhalten von leicht- und schwer siedenden Treibstoffen in Hesselman-Motor dargestellt. Untersucht wurden weiter verschiedene Kraftstoffe, deren Klopfestigkeit durch Mischungen mit B.V.-Benzol bzw. Steinkohlenteeröl, oder durch PB-Zusätze künstlich erhöht wurde.

Bei Vergaser- und Einspritzbetrieb wurden Vergleichsmessungen hinsichtlich Leistung, Wärmeverbrauch und Klopfverhalten durchgeführt.

Schließlich wurden Treibstoffe zu Vergleichszwecken in den Saughub eingespritzt, und zwar nach dem unteren bzw. oberen Totpunkt des Saughubes. Sämtliche Versuchsergebnisse wurden in Schaubildern zusammengefasst und an Hand dieser erläutert.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Hesselman-Motor mit leicht- und schwersiedenden Treibstoffen unter etwa gleichen Bedingungen betrieben werden kann. Für die Höhe der Verdichtung ist das Klopfverhalten der Treibstoffe maßgebend, bei leichtsiedenden die Oktanzahl und bei schwersiedenden die Cetanzahl.

Bei Vergaserbetrieb wurden günstigere Werte als bei Einspritzbetrieb erhalten. Die Ursache dürfte darin zu suchen sein, daß die Gemischbildung durch die im Hesselman-Motor vorhandene künstliche Luftdrehbewegung weitgehend verbessert wird. Für den Einspritzbetrieb von leichtsiedenden Treibstoffen spricht wieder der Vorteil, daß man bei Einspritzbetrieb wahrscheinlich mit Treibstoffen geringerer Oktanzahl auskommen kann als bei Vergaserbetrieb.

Günstigere Leistungs- und Verbrauchswerte erzielt man bei leichtsiedenden Treibstoffen, wenn man den Einspritzzeitpunkt in den Saughub verlegt. Nachteilig ist die damit verbundene Schmierölverdünnung, die während der langen Brennstoff-Vorlagerung eintreten kann. Für den Betrieb mit schwersiedenden Treibstoffen, wie Gasöl und Steinkohlenteeröl, bleibt die Einspritzung in den Verdichtungshub überlegen, vor allem mit Rücksicht auf etwaigen Treibstoffdurchschlag ins Schmieröl.

#### Zweck der Versuche:

Während zunächst ganz allgemein ein Überblick über das Verhalten der verschiedensten Treibstoffe im Hesselman-Motor gegeben wurde, war der Zweck der weiteren Versuche, Aufschluß

über das Klopfverhalten der Treibstoffe im Hesselman-Motor zu erhalten, ferner Vergleichsmessungen bei Einspritzbetrieb in den Saughub und bei reinem Vergaserbetrieb durchzuführen.

### Versuchsdurchführung:

#### Aufbau der Versuchsanlage.

Zur Verfügung stand der schon im Bericht Nr. 328 näher beschriebene Einzylinder-Hesselman-Motor, dessen wichtigste Abmessungen nochmals kurz erwähnt werden sollen:

Hub 136 mm  
Bohrung 105 mm  
Hubvolumen 1175 cm<sup>3</sup>  
Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 7,2$ .

Die Messung der abgegebenen effektiven Motorleistung erfolgte durch Pendeldynamo, die Feststellung von Treibstoffverbrauch und Motordrehzahl in üblicher Weise mit geeichtem Meßgefäß und Umdrehungszähler. Für die Luftmengenmessung war eine Luftpumpe eingebaut. Gemessen wurde ferner die Abgastemperatur und zeitweilig auch die Verbrennungstemperatur mit geeichten Chromnickel-Thermomikus-Thermoelementen. Kühlwassertemperatur und Öldruck wurden konstant gehalten. Die zur Auswertung der Versuchsergebnisse nötigen Daten, wie Barometerstand, Raumtemperatur, Temperatur der Ansaugluft, spez. Gewichte der Treibstoffe usw. wurden gleichzeitig aufgeschrieben. Wurden am Motor Änderungen getroffen, wie z.B. Anbau eines Vergasers usw., so wird dies an den entsprechenden Stellen des Berichtes besonders beschrieben.

Allgemeine Untersuchungen.

Einspritz- Die eigentlichen Treibstoff-Untersuchungen gehen einige  
ende. allgemeine Versuche voraus, wie Änderung von Einspritzende,  
Zündbeginn usw. In Schaubild 1 ist in Abhängigkeit vom Ein-  
druck  
spritzende  $p_{me}$  mittlere Effektivdruck, der Wärmeverbrauch  
und die Abgastemperatur aufgetragen. Die Messungen wurden mit  
Stanavo O.Z.87 durchgeführt; es handelt sich dabei um ein  
Fliegerbenzin-Gemisch mit Oktanzahl 87. Die Brennstoffpumpen-  
füllung und der Zündbeginn wurden nicht verändert. Zu erwähnen  
wäre noch, daß beim Hesselman-Motor das Einspritzende bei Pül-  
lungsänderung der Brennstoffpumpe unverändert bleibt; bei klei-  
neren Füllungen wird also lediglich die Einspritzdauer ver-  
kürzt, d.h. bei konstantem Einspritzende erfolgt der Einspritz-  
beginn später. Aus dem Schaubild ist ersichtlich, daß sich  
mittlerer Effektivdruck, Wärmeaufwand und Abgastemperatur nur  
unwesentlich ändern. Die Messungen wurden bei  $\lambda = 0,84$  durch-  
geführt.

Zünd- Im Schaubild 2 sind mittlerer Effektivdruck, Wärmeauf-  
beginn. wand und Abgastemperatur abhängig vom Zündbeginn der Magnet-  
zündung aufgetragen, und zwar für verschiedene Einspritz-  
ende. Es wurde also für einen bestimmten Einspritzzeitpunkt  
die Magnetzündung von  $5^{\circ}$  bis  $25^{\circ}$  v.o.T. verstellt. Die drei  
Einspritzzeitpunkte sind: Einspritzende  $45^{\circ}$  v.o.T.,  $37^{\circ}$  v.o.T.  
und  $29^{\circ}$  v.o.T. Man sieht, daß der Bestwert hinsichtlich mitt-  
leren Effektivdruckes und Wärmeaufwand sich für etwa  $15^{\circ}$  v.o.T.  
Zündbeginn ergibt, mit zunehmender Frühzündung ändern sich  
Effektivdruck und Wärmeaufwand wenig. Dagegen fällt bei zu-  
nehmender Spätzündung  $p_{me}$  rasch ab, und der Wärmeaufwand nimmt  
zu, desgleichen die Abgastemperatur.

**Einspritzdauer.** Im Schaubild Nr.3 sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt, die sich ergeben, wenn die Einspritzdauer geändert wird. Zu diesem Zweck wurde der normale 8 mm-Pumpenplunger durch einen von 9 mm ersetzt. Das Schaubild zeigt, daß bei verkürzter Einspritzdauer sich ungünstigere Werte ergeben. Wahrscheinlich erfolgt in diesem Augenblick die Treibstoff-einführung schon zu schnell und die Zeit für eine gute Verteilung des Treibstoffes auf die Verbrennungsluft ist zu kurz. An sich sind die Unterschiede zwischen 8 mm- und 9 mm-Plunger nicht erheblich, als Treibstoff wurde Stanavo O.Z.87 verwendet.

**Verdichtung.** Bekannt ist ja, daß mit zunehmender Verdichtung eine Leistungssteigerung verbunden ist und sich die Wärmeausbeute verbessert. Die Höhe der Verdichtung ist bestimmt durch das Klopfverhalten der Treibstoffe. So verträgt Gasöl im Hesselman-Motor nur eine Verdichtung von etwa 1:6, während bei Steinkohlenteeröl die Verdichtung über(etwa)8 beträgt. Die Versuche wurden durchgeführt bei einer Verdichtung von  $\epsilon = 5,7$ ,  $\epsilon = 7,2$  und  $\epsilon = 7,8$ . Als Versuchstreibstoff wurde wiederum das klopfeste Stanavo mit der Oktanzahl 87 verwendet. Im Schaubild 4 ist in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl  $\lambda$  für verschieden hohe Verdichtung mittlerer Effektivdruck, Wärmeaufwand und Abgastemperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, daß sich die Leistung bei Verminderung des Treibstoffverbrauches erheblich verbessert, wenn die Verdichtung erhöht wird. Die Verdichtungsänderung wurde durch Beilagenänderung am Zylinder bzw. durch Einbau eines

eines zweiten Hohlkolbens mit größerem Hohlraum erreicht.

**Kühlwasser-** Als weiterer allgemeiner Versuch wurde der Einfluß der Kühlwassertemperatur untersucht. Gefahren wurden die Versuche mit  $40^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$ . Im Schaubild 5 sind beide Versuchsreihen gegenübergestellt. Die Unterschiede sind ziemlich gering.

**Verbren-** Interessant sind die gleichzeitigen Messungen der Verbrennungstemp. brennungstemperatur und der Abgastemperatur. Den Verlauf beider Kurven in Abhängigkeit vom Luftüberschuß zeigt Schaubild 6. Beide Temperaturen wurden mit Chromnickel-Thermoelementen gemessen. Die Abgastemperatur wurde in der Auspuffleitung gleich hinter dem Auslaßkrümmer, die Verbrennungstemperatur im Verbrennungsraum, und zwar an der Zündkerze ermittelt. Zu diesem Zweck war die mittlere Elektrode durchbohrt worden; durch die Bohrung wurden die beiden Drähte geführt und vorn an der Elektrode verschweißt. Die Verbrennungstemperatur wurde für Stanavo, Methanol und Äthylalkohol bestimmt. Während die Maxima der Abgastemperatur etwa bei  $700^{\circ}\text{C}$  liegen, <sup>betragen</sup> ~~erreichen~~ die Höchstwerte der Verbrennungstemperatur bis  $950^{\circ}\text{C}$ . <sub>mittl.</sub> Wie schon gesagt, wurden diese Verbrennungstemperaturen direkt in Kerzennähe gemessen.

**Ansetzer-** Zum Abschluß der allgemeinen Untersuchungen am Hesselgrenze. man-Motor wurden noch die Ansetzergrenzen bei leicht- und schwersiedenden Treibstoffen festgestellt. Bekanntlich muß bei Fremdzündungsmotoren, als solcher ist ja der Hesselman-Motor anzusehen, das Treibstoff-Luftgemisch innerhalb der Explosionsgrenzen liegen, d.h. das Gemisch darf nicht zu brennstoffarm und nicht zu brennstoffreich sein. Gehen wir

von größten Brennstoffüberschuß aus, so ist dieser bestimmt durch die von der Treibstoffpumpe maximal eingespritzten Kraftstoffmengen. Festgestellt wurde, daß Aussetzer nicht auftreten, d.h. das Gemisch war noch nicht so brennstoffreich, daß die obere Explosionsgrenze erreicht wurde. Verkleinern wir dagegen die eingespritzte Treibstoffmenge inner mehr, ohne dabei das stündlich angesaugte Luftgewicht durch Drosselung zu verkleinern, so wird das Gemisch immer ärmer, die untere Explosionsgrenze wird erreicht, es treten Fehlzündungen, d.h. Aussetzer, auf. Dieser Versuch wurde mit Stanavo O.Z.87, mit B.V.-Benzol und Steinkohlenteeröl 808 durchgeführt. Die Aussetzergrenzen sind im Schaubild 7 zusammengestellt. Dieses zeigt, daß bei Stanavo O.Z.87 die Aussetzergrenze erst bei  $\lambda = 1,8$  liegt, während bei B.V.-Benzol und Steinkohlenteeröl die Aussetzer schon bei etwa  $\lambda = 1,5$  auftraten. Danach scheint bei dem Fliegerbenzin Stanavom die Gemischbildung am gleichmäßigsten zu sein.

Für die vorher angeführten Versuche wurde als Treibstoff Stanavo mit einer Oktanzahl 87 verwendet. Einspritzdüse und Zündkerse wurden nicht geändert. Abgesehen von den Sonderversuchen wurde auch der Pumpenplunger-Durchmesser und die Verdichtung unverändert gelassen.

#### Vergleich von leicht- und schwersiedenden Treibstoffen.

Damit kommen wir zu den eigentlichen Treibstoff-Versuchen. Gegenübergestellt wurden die leicht- und schwersiedenden Treibstoffe. Eine andere Einteilung ist die nach Oktanzahlen und Octenzahlen. Die Alkohole, Methyl- und Äthylalkohol, wollen wir besonders zusammenfassen, da diese infolge ihres geringen

Heizwertes Änderungen an der Treibstoffpumpe erforderten.

Zählen wir die leichtsiedenden Treibstoffe, geordnet nach ihren Oktanzahlen, kurz auf:

	$\gamma$	$L_{\text{Heiz}}$ $\frac{\text{kS}}{\text{kg}}$	$H_u$ kcal/kg	O.Z.
Eichbenzin A 4	0,74	14,8	10 333	40
Leynabenzin 5058	0,728	14,8	10 440	62
Laura 90/10	0,746	14,05	10 000	74
Stanavo O.Z.87	0,734	14,6	10 336	87
B.V.-Benzol + 10 % Alk.	0,861	12,6	9 242	105

Abgesehen von B.V.-Benzol, handelt es sich um Benzinge-mische, deren Oktanzahl von 40 bis 87 schwankt. Die Versuchsergebnisse sind in Schaubild 8 zusammengestellt. Die besten Verbräuche liegen im Mittel um 2400 kcal/PSch. bei  $\lambda = 1,2$ , der größte erreichbare Effektivdruck dürfte etwa bei  $\lambda = 0,8$  liegen und etwa 8,5  $\text{kg}/\text{cm}^2$  betragen. Diese Grenze ist bestimmt durch die größte Einspritzmenge der angebauten Treibstoffpumpe. Zum Vergleich sei angegeben, daß beim Otto-Motor der günstigste Verbrauch bei etwa 10 % Luftüberschuß, der höchsterreichbare Effektivdruck bei  $\lambda = 0,8$  liegt. Die gemessenen Wärmeverbräuche können sich noch um etwa 7 % verbessern, wenn wir die Leckölmengen berücksichtigen, da bei den niederviskosen Treibstoffen stets damit zu rechnen ist, daß ein geringer Prozentsatz des eingespritzten Treibstoffes als Lecköl am Pumpenplunger vorbeitrifft. Zu diesem Zweck wurden am Ende der Versuche nochmals Lecköl-Vergleichsmessungen zwischen hoch- und niederviskosen Treibstoffen durchgeführt. Die Messungen wur-

den am Ende der Versuche vorgenommen, um festzustellen, wie weit der Verschleiß des Pumpenplungers die Leckölmenge beeinflusst. Die Versuche ergaben, daß bei den niederviskosen Treibstoffen im Mittel etwa 7 % als Leckölmenge in Rechnung zu stellen sind. Anders ist es natürlich, falls der Plunger stark angegriffen ist, wie es z.B. beim Betrieb mit Steinkohlenteeröl eintreten kann. Dieses wurde bei den ersten Versuchen am Hesselman-Motor beobachtet, wo bei den Benzingerischen bis zu etwa 15 % Lecköl festgestellt wurden.

Daß bei einer Verdichtung von  $\epsilon = 7,2$  die Treibstoffe mit niedriger Oktanzahl klopften, war wohl zu erwarten. So klopfte Eichbenzin A 4 mit einer Oktanzahl von 40 über den ganzen Meßbereich, während Leuna 5058 mit einer Oktanzahl von etwa 62 erst bei hohem Brennstoffüberschuß ( $\lambda < 0,8$ ) klopfte. Auf diese Versuche werden wir später beim Vergleich mit dem Klopfverhalten bei Vergaserbetrieb noch näher eingehen.

Die Luftüberschuszahlen wurden auf Grund des theoretischen Luftbedarfes und der stündlich angesaugten Luftmenge von etwa 61 kg/h ermittelt.

Damit kommen wir zu den schwersiedenden Treibstoffen. Die untersuchten Treibstoffe haben die Cetanzahlen -10 bis +57 und sind nachstehend zusammengestellt:

	$\epsilon^*$	$L_{theor}$ kg/kg	$H_u$ kcal/kg	C.Z.
Gasöl 852	0,852	14,4	10 164	57
Leuna-Dieselöl 735	0,856	14,3	10 079	55
Steinkohlenmittelöl	0,967	13,0	9 273	+5
Steinkohlenteeröl 308	1,048	12,5	9 075	-10

Die Versuchsergebnisse sind in den beiden Schaubildern 9 und 10 zusammengefasst, die Messungen wurden bei zwei verschiedenen Einspritzdüsen durchgeführt, ohne daß besondere Unterschiede festgestellt wurden. Einspritzbeginn und Zündung wurden bei diesen Versuchen jedesmal auf Bestwert eingestellt. Bei den beiden untersuchten Düsen handelt es sich um solche, die speziell für hochsiedende Treibstoffe hergestellt waren. Der höchste Effektivdruck wurde im Bereich des Brennstoffüberschusses gemessen, während die günstigsten Verbräuche im Gebiet des Luftüberschusses fallen. Der höchste erreichte Effektivdruck liegt bei  $\lambda =$  etwa 0,8 und beträgt im Mittel etwa  $8 \text{ kg/cm}^2$ , die Verbräuche fallen für  $\lambda = 1,2$  etwa in den Bereich von 2200 kcal/PSch, sind also nicht wesentlich geringer als bei den leichtsiedenden Treibstoffen, zumal wenn man noch deren 7 % Leckverluste berücksichtigt.

Was das Klopfverhalten angeht, so klopften Gasöl und das ähnlich beschaffene Leuna-Dieselöl über den ganzen Meßbereich; die Cetenzahl dieser beiden Treibstoffe liegt bei 55 und 57, was sie als reine Dieseltreibstoffe kennzeichnet, d.h. als Treibstoffe mit hoher Zündwilligkeit im Selbstzündungsmotor. Da wir es aber beim Hesselman-Motor mit einem ausgesprochenen Fremdzündungsmotor zu tun haben, der wenig zündwillige, aber dafür klopfste Treibstoffe verlangt, so sind von den schwer-siedenden Treibstoffen die Steinkohlenteeröle und Steinkohlennittelöle mit ihrer geringen Zündwilligkeit weit eher geeignet, denn Zündwilligkeit und Klopfverhalten stehen bei den leichtsiedenden und schwer-siedenden Treibstoffen im umgekehr-

ten Verhältnis . Will man also für den Einspritzmotor mit Fremdzündung bei den schwersiedenden Treibstoffen den Begriff der Oktanzahl nicht verwenden, vielmehr die Cetenzahl beibehalten, so erfordert der Hesselman-Motor für klopffreien Betrieb bei leichtsiedenden Treibstoffen eine hohe Oktanzahl und bei schwersiedenden Treibstoffen eine niedrige Cetenzahl. Für den Einspritzmotor mit Fremdzündung kann also das Klopfverhalten in Oktan- und Cetenzahlen angegeben werden, je nachdem, ob man es mit leicht- oder schwersiedenden Treibstoffen zu tun hat.

Aufschlußreich ist noch die Gegenüberstellung der leicht- und schwersiedenden Treibstoffe in einem besonderen Schaubild 11 (aus Schaubild 8 und 9). Dieses zeigt in anschaulicher Weise den unterschiedlichen Verlauf der Leistungs-, Wärmeverbrauchs- und Abgastemperatur-Kurven. Die Leistungskurve verläuft bei den schwersiedenden Treibstoffen viel flacher als bei den leichtsiedenden, andererseits steigen bei den schwersiedenden Treibstoffen die Wärmeverbrauchskurven sehr rasch an. Die Ursache dürfte wohl im Folgenden liegen:

Bei den schwersiedenden Treibstoffen ist eine gute Gemischbildung , d.h. innige Vermischung mit der Verbrennungsluft weit schwieriger. Die geringe Leistungszunahme im Gebiet des Luftmangels wird mit sehr hohem Treibstoffüberschuß eben infolge der schlechten Gemischbildung erkauft. Bei den leichtsiedenden Treibstoffen haben wir eine viel bessere Gemischbildung, die durch die Verdampfung der leicht-

siedenden Bestandteile noch verbessert wird. Die Folge ist, daß mit zunehmendem Treibstoffüberschuß auch eine entsprechende Leistungssteigerung verbunden ist.

Auffallend ist noch das Verhalten der Wärmeverbrauchs-kurven im Gebiet des Luftüberschusses. Die günstigsten Wärme-verbräuche werden nämlich bei den schwersiedenden Treibstof-fen erreicht. Es scheint sich bei den leichtsiedenden Treib-stoffen die zu rasche Verdampfung nachteilig auf die Gemisch-bildung (Bildung von Brennstoffdampf Wolken ohne Beimischung von Verbrennungsluft) und Zündungseinleitung auszuwirken. Wir können also zusammenfassen:

Im Gebiet des Luftüberschusses sind die schwersiedenden Treibstoffe überlegen, im Gebiet des Luftmangels dagegen ge-ben die leichtsiedenden Treibstoffe günstigere Werte.

In einer besonderen Versuchsreihe wurden die Alkohole untersucht. Zur Verfügung standen Methylalkohol und Äthylal-kohol, als Vergleichstreibstoff wurde wieder Stanavo 0.2.87 gewählt. Die Gegenüberstellung der 3 Versuchstreibstoffe zeigt folgende Tabelle:

	$\rho$	$H_u$ kcal/kg	$L_{theor}$ kg/kg
Methylalkohol	0,795	4 650	6,45
Äthylalkohol	0,794	6 440	8,97
Stanavo 0.2.87	0,734	10 336	14,6

Infolge des geringen Heizwertes der Alkohole waren Ände-rungen an der Brennstoffpumpe erforderlich, um die Einspritz-menge annähernd zu verdoppeln. Es wurde der normale Pumpen-

kolben von 8 mm  $\phi$  durch einen von 9 mm  $\phi$  ersetzt. Ein größerer stand leider nicht zur Verfügung. Die Einspritzdüse wurde nicht geändert, da Vorversuche mit besonders mitgelieferten Alkohol-Düsen keine besseren Werte lieferten. Die Verdichtung wurde nicht erhöht, und es betrug der Verdichtungsgrad  $\epsilon = 7,2$ . Im Schaubild 12 sind die Versuchsergebnisse gegenübergestellt. Hinsichtlich Bestleistung bei geringstem Verbrauch gilt die Reihenfolge Methanol, Äthylalkohol und schließlich Stanavo O.Z.87. Maximal wurde bei Methanol ein  $P_{me}$  von etwa 9 kg/cm<sup>2</sup> erreicht, der günstigste Verbrauch liegt wieder im Gebiet des Luftüberschusses und beträgt etwa 2050 kcal/PSeh (bei Berücksichtigung der Leckverluste noch geringerer Verbrauch).

#### Erhöhung der Klopfestigkeit.

Damit können wir zu Versuchen, die Klopfestigkeit von schwer siedenden Treibstoffen durch Mischung mit klopfesten bzw. durch Blei-Zusätze künstlich zu erhöhen. Als Versuchstreibstoffe wurden Gasöl 852 und Petroleum gewählt. Beide klopften im Hesselman-Motor. Es wurden jetzt Mischungen im Verhältnis 1:1 einmal mit einem schwer siedenden klopfesten, das anderemal mit einem leicht siedenden klopfesten Treibstoff hergestellt. Als schwer siedender wurde Steinkohlenteeröl, als leicht siedender B.V.-Benzol gewählt. Bei Gasöl wurde ein weiterer Versuch mit Pb-Zusätzen durchgeführt. Im folgenden sind die Versuchstreibstoffe zusammengestellt:

	$\gamma$	$H_u$ kcal/kg	$L_{theor}$ kg/kg
Gasöl	0,851	10 164	14,4
50 Vol% Gasöl + 50 Vol% B.V.-Benzol	0,853	9 720	13,6
50 Vol% Gasöl + 50 Vol% Steinkohlenteeröl 808	0,956	9 550	13,4
Petroleum	0,806	10 225	14,5
50 Vol% Petroleum + 50 Vol% B.V.-Benzol	0,828	9 750	13,5
50 Vol% Petroleum + 50 Vol% Steinkohlenteeröl 808	0,934	9 580	13,4

Die Ergebnisse sind in den Schaubildern 13, 14 und 15 zusammengestellt. Während sich die Kurven Gasöl und Petroleum von ihren Mischungen mit Steinkohlenteeröl nur wenig unterscheiden, macht sich der Zusatz von B.V.-Benzol ziemlich bemerkbar. Bei beiden, bei Gasöl und Petroleum, läßt sich durch Mischung mit B.V.-Benzol eine Leistungssteigerung erzielen. Sehr klar und deutlich macht sich der Einfluß des leichtsiedenden B.V.-Benzols auf den Verlauf der Leistungs- und Wärmeverbrauchskurven bemerkbar, denn die Leistungskurven für Gasöl-B.V.-Benzol und Petroleum-B.V.-Benzol verlaufen steiler, die Wärmeverbrauchskurven dagegen flacher. Die gleiche Beobachtung, die wir bei den leichtsiedenden Treibstoffen allein machten, tritt also auch auf, wenn wir einem schwersiedenden einen leichtsiedenden beimischen. Zu erwähnen wäre noch, daß durch die Beimischung von B.V.-Benzol bzw. Steinkohlenteeröl, wie zu erwarten, die Klopfestigkeit weitgehend beeinflusst wurde, daß der Motor klopfrei arbeitete.

Im Schaubild 14 sind die Versuchswerte für Gasöl mit ver-

schiedenen Pb-Zusätzen dargestellt. Der höchste Prozentsatz betrug 0,2 % Pb, aber auch bei diesem verhältnismäßig hohen Zusatz war das Klopfen des Motors bei zunehmendem Brennstoffüberschuß nicht ganz zu beseitigen. Wie vor auszusehen, nahm die Leistung mit zunehmender Klopfestigkeit zu, ebenso verringerte sich der Wärmeverbrauch. Gleichzeitig scheinen sich die Auspufftemperaturen im Gebiet des Brennstoffüberschusses ( $\lambda < 1$ ) zu erhöhen.

Ähnlich wie man bei Benzin durch Bleizusätze die Klopfestigkeit erhöhen, d.h. die Oktanzahl verbessern kann, läßt sich also auch Gasöl, das im Fremdzündungs-Einspritzmotor bei zu hoher Verdichtung klopft, in seinem Klopfverhalten verbessern. Umgekehrt müßte sich die Zündwilligkeit des Gasöls, das ja einen reinen Dieseltreibstoff darstellt, durch Pb-Zusatz verschlechtern. Um das nachzuweisen, wurden 4 Gasölproben ohne und mit je 0,1 %, 0,2 % bzw. 0,3 % Pb auf ihre Zündwilligkeit hin untersucht, d.h. die Cetenzahlen bestimmt. Danach fällt die Cetenzahl mit erhöhtem Pb-Zusatz folgendermaßen ab:

Gasöl ohne Zusatz	etwa 50
Gasöl mit 0,1 % Pb	46,5
Gasöl mit 0,2 % Pb	42
Gasöl mit 0,3 % Pb	38

Da der Hesselman-Motor bei Gasöl mit 0,2 % Pb Zusatz nur bei hohem Brennstoffüberschuß  $\lambda < 0,825$  klopfte, müßte also die Cetenzahl für ganz klopfreien Betrieb unter etwa 40 liegen. Danach lassen sich also im Hesselman-Motor schwersiedende Treibstoffe mit niedrigen Cetenzahlen, wie z.B. Steinkohlenteeröl oder Steinkohlennittelöl, gut verwenden. Hinzu kommt, daß sie infolge ihrer hohen Klopfestigkeit eine erhöhte Ver-

dichtung zulassen, was wieder zur Leistungsteigerung und besseren Wärmeausbeute führt.

### Vergleichsmessungen bei Vergaser- und Einspritzbetrieb.

Zu Vergleichsmessungen von Einspritz- und Vergaserbetrieb wurde der Hesselman-Motor auch als Ottomotor umgebaut und untersucht. Die Treibstoff-Einspritzung wurde abgeschaltet und dafür ein Solex-Horizontak-Vergaser angebaut. Gefahren wurde dabei mit vollgeöffneter Drosselklappe; um nicht dauernd die Hauptdüse wechseln zu müssen, wurde der Vergaser mit einer verstellbaren Düse (Feinverstellung nach Art einer Mikrometerschraube) ausgerüstet. Zu Luftmengenmessungen wurde wieder die gleiche Luftuhr wie bei Einspritzbetrieb verwendet. Erhebliche Schwierigkeiten machte anfangs die Kerzenfrage. Die für Einspritzbetrieb normal verwendete Zündkerse DM 35 A 3 mit vorstehenden Elektroden (Bosch) war nicht brauchbar, da die Elektroden derartig heiß wurden, daß sie nach kurzer Laufzeit verschmorten. Nach verschiedenen Versuchen wurde schließlich eine Flugmotoren-Kerze von Bosch, Typ DM 200 # 1 mit einem Wärmewert von 200 eingebaut. Diese hat sich dann auch während der vorgenommenen Klopfversuche sehr gut bewährt. Als günstigster Lufttrichter für den Solex-Vergaser wurde ein solcher von 30 % ermittelt. Die Luftmengen-Messungen ergaben kaum merkliche Unterschiede gegenüber Einspritzbetrieb, sie änderten sich auch wenig mit der durch die Hauptdüse angesaugten Treibstoffmenge.

Die Versuche wurden bei vollgeöffneter Drosselklappe mit unverändertem Lufttrichter von 30 % durchgeführt. Es wurde lediglich die Hauptdüse, wie schon erwähnt, verstellt. Als

Treibstoff wurde zunächst wieder Stanavo mit einer Oktanzahl von 87 gewählt. Die Versuchsergebnisse sind im Schaubild 16, zusammen mit denen von Einspritzbetrieb dargestellt, es ist also gewissermaßen der Vergleich von Otto- und Hesselman-Motor. Die Werte bei Vergaserbetrieb sind sehr günstig hinsichtlich Leistung und Wärmeverbrauch. Die Vergleichsmessungen wurden bei der gleichen Verdichtung von  $\epsilon = 7,2$  durchgeführt. Um einen normalen Otto-Motor zu erhalten, wurde auch der tassenförmige Hohlkolben von Hesselman durch einen Kolben mit flachen Boden ersetzt. Die Steuerzeiten wurden nicht geändert.

Das Schaubild 16 zeigt, daß bei Betrieb mit Vergaser der gleiche Motor erheblich günstigere Werte liefert als bei Einspritzen in den Verdichtungshub. Die Ursache dürfte vielleicht darin zu suchen sein, daß bei Vergaserbetrieb die Gemischbildung doch günstiger ist und noch durch die künstliche Luftdrehbewegung, wie sie im Hesselman-Motor durch besondere Ausbildung des Ansaugkanals erzeugt wird, weitgehend gefördert wird. Die Erwartung, daß sich bei Vergaserbetrieb infolge der Drosselung im Vergaser eine empfindliche Verringerung des Ansaugluftgewichts zeigen würde, konnte, wie schon oben gesagt, nicht bestätigt werden. +)

Selbstverständlich können diese Ergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinert werden; sie gelten zunächst nur für den untersuchten Einzylinder-Versuchsmotor. Zum Einspritzbetrieb von Benzol ging man neben anderen Überlegungen auch von der Erwägung aus, die Gemischverteilung bei Mehrzylinder-Motoren durch Anbau besonderer Treibstoffpumpen für jeden ein-

+ ) Zum Vergleich sind auch noch die Versuchsergebnisse von Gasöl bei Einspritzbetrieb angeführt; auch diese sind ungünstiger als bei Vergaserbetrieb.

zelnen Zylinder zu verbessern, denn es ist ja bekannt, daß es bei Vergaserbetrieb oftmals sehr schwierig ist, bei Mehrzylindermotoren eine gleichmäßige Gemischverteilung bei allen Zylindern zu erreichen. Diese Vorteile bei Einspritzbetrieb gegenüber dem Vergaser treten danach erst bei Mehrzylinder-Motoren in Erscheinung.

Um diese Versuchsergebnisse richtig zu beurteilen, müssen wir beim Hesselman-Motor hinsichtlich der verwendeten Treibstoffe immer in leicht- und schwer siedende unterscheiden. Allgemein verbrennt der Hesselman-Motor beide unter annähernd gleichen Bedingungen. Bei leichtsiedenden Treibstoffen kann, aber er muß es nicht, der Vergaserbetrieb, wenn wir vom Mehrzylinder-Motor absehen, hinsichtlich Gemischbildung und Wärmeausnutzung überlegen sein. Ähnlich verhält es sich mit der Einspritzung von leichtsiedenden Treibstoffen in den Saughub, wie wir später noch sehen werden, denn auch die Saughubeinspritzung leichtsiedender Treibstoffe ist der der Verdichtungseinspritzung überlegen. Ganz anders wird das Bild, wenn es sich um schwer siedende Treibstoffe handelt. Abgesehen davon, daß bei diesen ein Vergaserbetrieb oder Einspritzbetrieb in den Saughub keine brauchbaren Resultate liefert, kommt die Gefahr der Schmierölverdünnung durch Brennstoffniederschlag als weiterer Nachteil hinzu. Dies wurde auch durch die Versuche an unserem Versuchsmotor bestätigt. Zusammenfassend werden wir am Schluß des Berichtes nochmals auf diese Fragen eingehen.

Damit wollen wir zur Frage der Klopfestigkeit bei Ver-

gaser- und Einspritzbetrieb am Hesselman-Motor übergehen. Wir schränken wieder ein, daß dies nur für unsere Versuchsmaschine richtig zu sein braucht und nicht ohne weiteres verallgemeinert werden kann.

Bei der Bestimmung des Klopfwertes für Vergaserbetrieb wurde so vorgegangen, daß Benzingerische verschiedener Oktanzahlen untersucht wurden, siehe folgende Zusammenstellung.

Treibstoff:	$k$	Oktanzahl
Benzin 825/5058	0,728	60
Benzin 859	0,732	69
50 Vol% Bi 859 + 50 Vol% Bi 862	0,725	72,5
Benzin 862	0,721	76

Die Oktanzahl 72,5 wurde durch Mischung von Bi 859 mit O.Z.69 und Bi 862 mit O.Z.76 in Verhältnis 1:1 hergestellt, der Wert für die Oktanzahl im Klopfmotor bestimmt. Im Schaubild 17 sind in Abhängigkeit vom Stundenverbrauch der mittlere Effektivdruck, spezifischer Verbrauch und Abgastemperatur zusammengestellt. Gleichzeitig sind noch die Klopfbereiche angegeben. Normalerweise tritt ja das stärkste Klopfen bei annähernd theoretischem Luftbedarf auf und klingt dann nach beiden Seiten nach dem Gebiet des Luftmangels bzw. Luftüberschusses ab. Wir erhalten also für die einzelnen Oktanzahlen verschiedenen weite Klopfbereiche. Je niedriger die Oktanzahl ist, umso größer wird der Klopfbereich. Tragen wir jetzt die ohne Klopfen erreichbaren  $p_{me}$  in einem besonderen Schaubild in Abhängigkeit von der Oktanzahl der untersuchten Treibstoffe auf, so ergibt

sich Schaubild 18. Man sieht, wie mit zunehmender Oktanzahl der mittlere Effektivdruck ansteigt und der Klopfbereich immer kleiner wird, bis er praktisch gleich Null ist. Für diesen Grenzfall wurde eine Oktanzahl von etwa 75 ermittelt. Hinzuzufügen wäre noch, daß die Klopfgrenzen gehörmäßig bestimmt wurden, da andere Meßmethoden, wie Indizieren, infolge Fehlens der entsprechenden Bohrungen im Zylinderkopf nicht möglich waren. Die Messung der Abgas- und Verbrennungstemperatur ergab ebenfalls keine einwandfreien Resultate über das Klopfverhalten.

Der Versuchemotor erfordert also für klopfreien Vergaserbetrieb einen Treibstoff von der Oktanzahl 75, für  $n = 1800$  und ohne Drosselung der Ansaugluft. Für Einspritzbetrieb wurde dagegen eine Oktanzahl von etwa 60 ermittelt. Eichbenzin A 4 mit einer Oktanzahl 40 klopfte über den ganzen Meßbereich. Benzingemisch 5058 mit Oktanzahl 60 klopfte nicht, eine Mischung aus Eichbenzin A 4 und Benzin 5058 mit einer Oktanzahl von etwa 49,5 klopfte nur schwach. Interessant ist noch, daß Gasöl mit einer Cetanzahl von etwa 55 erheblich stärker klopfte als z.B. das Eichbenzin A 4 mit einer Oktanzahl von 40.

#### Einspritzen in den Saughub beim Hesselman-Motor.

Hesselman ging bei der Schaffung des nach ihm benannten Motors vom Dieselmotor aus. Er wollte hochsiedende Treibstoffe, die normalerweise im Dieselmotor Verwendung finden, im Niederdruck-Motor verbrennen; er mußte also die Hochverdichtung durch zusätzliche Kerzenzündung ersetzen. Damit kam er zum Fremdzündungsmotor mit mittlerer Verdichtung und Einspritzung in den Verdrichtungshub. Andererseits haben Versuche mit

Einspritzung von leichtsiedenden Treibstoffen in den Saughub bei Otto-Motoren gute Ergebnisse gehabt. Aus diesen Überlegungen heraus wurden an unserem Einzylinder-Hesselman-Motor gleichfalls mit Einspritzung in den Saughub Versuche durchgeführt. Leider war es infolge des Pumpenantriebs nicht möglich, die Treibstoffeinspritzung stetig über den ganzen möglichen Bereich von Saug- und Verdichtungshub zu verstellen. Es wurden vielmehr folgende Verstellbereiche durchgemessen:

- |                   |         |                        |
|-------------------|---------|------------------------|
| 1.) Einspritzende | 75-115° | n.o.T. Saughub         |
| 2.) "             | 25- 60° | n.u.T. Verdichtungshub |
| 3.) "             | 49- 25° | v.o.T. Verdichtungshub |

Es wurde also die Zeit für die Vorlagerung des Treibstoffes immer mehr verkürzt, bis schließlich im Verdichtungshub von einer Treibstoffvorlagerung überhaupt nicht mehr gesprochen werden kann, denn der Treibstoff wurde sofort beim Einspritzen gezündet. Außerst nachteilig ist natürlich bei dem Einspritzen in den Saughub die Tatsache, daß der eingeführte, fein zerstäubte Treibstoff an den noch kalten Zylinderwänden während des Saughubes wieder kondensiert und so zum Brennstoffdurchschlag führt. Dieses trat dann auch tatsächlich in gefährlichem Maße ein; so mußte der Motor abgestellt werden, da das Schmieröl derartig verdünnt war, daß ein Weiterbetrieb den Motor gefährdete. Es musste deshalb das gesamte Öl abgelassen und erneuert werden. Diese Erscheinung wurde beim Einspritzbetrieb in den Verdichtungshub nicht beobachtet.

Schwierigkeiten ergaben sich bei den normal verwendeten Zündkerzen mit vorstehenden Elektroden. Diese wurden zu heiß, fingen an zu perlen und zu <sup>ver</sup>Schweißen. Als günstig erwies

sich die Bosch-Zündkerze DM 145 T 1 mit einem Wärmewert von 145. Auch die Einspritzdüse wurde sehr heiß und war blau angelauten, gleichfalls die im Düsenhalter befindlichen Kugelventile, die Druckfedern selbst waren ausgeglüht. Geprüft wurden folgende leichtsiedende Treibstoffe:

	$\gamma$	$H_u$ kcal/kg	$L_{theor}$ kg/kg	O.Z.
Stanavo O.Z.87	0,734	10 336	14,6	87
Dodekan	0,759	10 200	14,8	~100
B.V.-Benzol + 10 % ALK.	0,860	9 242	12,6	~105

Das hochsiedende Gasöl und Steinkohlenteeröl konnte nicht einwandfrei verbrannt werden, der Motor lief unruhig und setzte aus. Bei Mischung mit B.V.-Benzol zu gleichen Teilen lässt sich auch Gasöl und Steinkohlenteeröl verwenden. Beim Einspritzen 25°-60° n.u.T. ~~Saughub~~ <sup>Verdichtungshub</sup> machte auch Steinkohlenteeröl in gleicher Mischung mit B.V.-Benzol Schwierigkeiten. Es wurde deshalb bei diesem Einspritzpunkt nur Gasöl in Mischung mit B.V.-Benzol gefahren. Die leichtsiedenden Treibstoffe Stanavo O.Z.87, B.V.-Benzol und Dodekan gingen ohne weiteres auch bei dieser Einspritzstellung.

Die Versuchsergebnisse für Saughub-Einspritzung zeigen Schaubilder 19-24. Im Schaubild 19 und 21 ist die Änderung von mittlerem Effektivdruck, Wärmeverbrauch und Abgastemperatur dargestellt, wenn das Einspritzende von 75° bis 115° <sup>Saughub</sup> n.o.T./ bzw. 25° bis 60° n.u.T. des ~~Saughubes~~ <sup>Verdichtungshub</sup> geändert wird. Ziehen wir noch dazu das Schaubild 1: Änderung des Einspritzendes von 49° bis 25° v.o.T. des Verdichtungshubes heran, so lässt sich folgendes feststellen: Je später wir das Einspritzende

logen, umso mehr fällt  $p_{me}$ , steigt der Wärmeverbrauch und die Abgastemperatur.

Diese Abhängigkeit vom Einspritzende bei Saughub- und Verdichtungshub-Einspritzung wurde nochmals gesondert im Schaubild 23 zusammengestellt, und zwar für verschiedene Luftüberschusszahlen  $\lambda$ . Der Verlauf der Kurven ist allmählich fallend oder steigend, erst kurz vor o.T. des Verdichtungshubes fällt die Leistung sehr stark bzw. erhöht sich der Verbrauch sehr schnell, übrigens eine bekannte Tatsache. Das eben Gesagte gilt natürlich nur für leichtsiedende Treibstoffe. Wie schon gesagt, machten Gasöl und Steinkohlenteeröl bei Saughub-Einspritzung Schwierigkeiten, so daß nur Mischungen von leicht- und schwersiedenden untersucht werden konnten. Vgl. Schaubild 20 und 22. Geprüft wurden Gasöl und Steinkohlenteeröl in Mischung mit B.V.-Benzol im Verhältnis 1:1.

	$\gamma$	$H_u$ kcal/kg	$L_{theor}$ kg/kg
Gasöl + B.V.-Benzol 50:50	0,853	9 720	13,5
Steinkohlenteeröl + B.V.-Benzol 50:50	0,954	9 160	12,6

Man erkennt, daß bei den schwersiedenden Treibstoffen bei Saughub-Einspritzung, auch in Mischung mit leichtsiedenden, die Leistung geringer und der Wärmeverbrauch höher ist, ganz abgesehen davon, daß die schwersiedenden Treibstoffe ohne Beimischung überhaupt keinen einwandfreien Lauf ergeben.

In einem weiteren Schaubild 24 wurden für Stanavo O.Z.87 die Versuchsergebnisse zusammengestellt für verschiedene Einspritzpunkte, diesesmal in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl  $\lambda$ ; daraus ist wiederum ersichtlich, daß die besten Ergebnisse bei Saughub-Einspritzung, also bei möglichst weicher Vorlagerung des Treibstoffes, erreicht werden.

Auf Schaubild 25 ist der Vergleich zwischen Vergaserbetrieb und Einspritzung während des Saughubes gegeben. Hier zeigt sich, daß im Gebiet des praktischen Betriebes, das etwa bei  $\lambda = 0,9$  bis  $\lambda = 1,0$  liegt, Leistung und Verbrauch annähernd gleich sind. Im Luftüberschußgebiet ergibt sich eine Überlegenheit des Vergaserbetriebes, während im Gebiet des Luftmangels der Saughub-Einspritzbetrieb sich günstiger verhält. Bei Mehrzylinder-Motoren ist die Saughub-Einspritzung überlegen, da für jeden Zylinder gleich gute Gemischverteilung gewährleistet ist, was beim Vergasermotor nicht zu erreichen ist.

#### Gegenüberstellung mit Vergaser- und Dieselmotor.

1. Der Hesselman-Motor, der in seiner Wirkungsweise zu den Otto-Motoren zu zählen ist, eignet sich für den Betrieb mit leicht- und schwersiedenden Treibstoffen.

2. Die Höhe der Verdichtung wird bestimmt durch das Klopfverhalten, nicht durch die Zündwilligkeit der Treibstoffe. Der Hesselman-Motor kommt mit viel geringerer Klopfestigkeit aus als der Vergasermotor.

3. Der im Hesselman-Motor erreichbare mittlere Effektivdruck ist höher als beim Dieselmotor, da er nicht dessen hohen Luftüberschuß benötigt.

4. Der Wärmeverbrauch des Hesselman-Motors kommt praktisch an den des Vergasermotors heran, ist aber höher als der des hochverdichtenden Dieselmotors.

5. Bei leichtsiedenden Treibstoffen ist die Saughub-Einspritzung, d.h. möglichst lange Vorlagerung des Treibstoffes, der Verdichtungs-Einspritzung überlegen, für schwersiedende Treibstoffe eignet sich die Saughub-Einspritzung nicht; nachteilig ist ferner die damit verbundene Schmierölverdünnung. Hinzufügen wäre noch, daß das Hesselman-Verfahren durch die Verdichtungs-Einspritzung gekennzeichnet ist. Danach stellt also die Saughub-Einspritzung kein Merkmal des Hesselman-Motors dar, ist diese ja auch schon bei Otto-Flugmotoren oftmals als Ersatz für den Vergaser verwendet worden.

Eine übersichtliche Gegenüberstellung von Dieselmotor, Hesselman- und Otto-Motor ist auf Schaubild 26 beigelegt.

Anlagen: 26 Schaubilder.

*W. H. H. H.*  

---

*W. H. H. H.*

28753

