

1. Anwendung des Zweistoffverfahrens beim Dieselmotor

Von Prof. Dr.-Ing. P o t t h o f f

Aus dem Institut für Kraftfahrwesen der Technischen
Hochschule Hannover.

Dank der großzügigen Unterstützung der Arbeiten des Instituts für Kraftfahrwesen der Technischen Hochschule Hannover durch den Herrn Reichsverkehrsminister konnten schon im Jahre 1937 die Forschungsarbeiten auf dem Gebiete der Gemischbildung beim schnellaufenden Dieselmotor systematisch begonnen werden.

Die Hubraumleistungen sind beim Diesilverfahren noch erheblich kleiner als beim Otto-Verfahren. Das hängt nicht nur mit der niedrigeren Drehzahl allein zusammen, sondern vor allem mit der Gemischbildung, die noch keineswegs befriedigt. Die Zeiten der Gemischbildung sind beim Dieselmotor außerordentlich kurz. Beim Otto-Verfahren stehen zur Bildung des Gemisches 2 Takte - der Saug- und VerdichtungsHub - mehr zur Verfügung. Es lag deshalb nahe, ein Zweistoffverfahren zu erproben, das mit dem zweiten Kraftstoff nach dem Otto-Verfahren arbeitet. Es mußte also ein gasförmiger Kraftstoff als zweiter Verwendung finden.

Da das Luftmischungsverhältnis beim Dieselmotor noch stets größer als 1 ist, so war die Möglichkeit eines Gaszusatzes zum flüssigen Kraftstoff ohne weiteres gegeben. Es lag nahe, das Gas in möglichst großen Mengen, den flüssigen Kraftstoff dagegen in möglichst kleinen Mengen - bis zur Zündpille herab - zuzusetzen.

So entstand der Name Diesel-Otto-Verfahren, der jetzt besser durch die Bezeichnung Diesel-Gas-Verfahren ersetzt ist. Als zweiter Kraftstoff wurde bei den Versuchen, über die hier berichtet wird, Butan mit einem unteren Heizwert von $29\ 000\ \text{Kcal/m}^3$ und Stadtgas mit einem unteren Heizwert von $4\ 200\ \text{Kcal/m}^3$ verwendet. Als Motor stand der Vierzylinder-Magirus-Vorkammer-Dieselmotor Type V 88 R mit einem Hubraum von $3,0\ \text{ltr.}$, einer Nennleistung von $45\ \text{PS}_e$ bei einer Drehzahl von $2\ 200\ \text{U/min}$ und einem Verdichtungsverhältnis von $1 : 19,5$ - den die Firma Magirus dankenswerterweise dem Institut gestiftet hatte - zur Verfügung.

Die Versuchsanordnung bestand aus einer elektrischen Pendelgenerator-Bremse, einem Siemens-Schleifen- und einem Zeiß-Ikon-Kathodenstrahl-Oszillographen. Der Verbrennungsdruck und der Kraftstoffleitungsdruck wurden mit Piezo-Quarz-Indikatoren ermittelt. Gemessen wurden Leistung, Drehzahl, Zylinderhöchstdruck, Steilheit des Druckanstieges, Brennstoffleitungsdruck, Düsenadelbewegung, Abgas-, Kühlwassereintritts- und Austrittstemperaturen sowie Kraftstoffverbrauch. In den Diagrammen (Bilder 4 und 5) sind Kurbelwinkelmarken mit aufgenommen, und zwar bei 45° vor O.T., bei O.T. und 45° nach O.T. Die Diagramme selbst umfassen einen Kurbelwinkel von nur etwa 100° .

Bild 1 zeigt den Querschnitt durch den Zylinderkopf mit Piezo-Quarz-Druckelement "a", Ionisationsstrecke "b", Anschluß

des Druckelements für den Leitungsdruck "c", Leitungsentlüftung "d", Meßgerät für Düsenadelbewegung "e", Kraftstoffleitung "f" und Leitung zum Thermoelement für Messung der Abgastemperatur "g". Bild 2 zeigt die Anordnung zur Vorwärmung, Entspannung, Messung und Zuführung des Butans. Bild 3 gibt den Schaltplan für die Aufzeichnung des Druckverlaufs, der Düsenadelbewegung und der Kurbelwinkelmarken mit einem Kathodenstrahloszillographen wieder. Durch den Zusatz von Butan oder Stadtgas ließ sich die Gemischbildung tatsächlich so verbessern, daß das Luftmischungsverhältnis $\lambda = 1$ erreicht wurde. Bei starkem Gaszusatz herrscht bis zum Erreichen der Leistungsgrenze rauchfreie Verbrennung. Man kann dadurch eine fast restlose Ausnutzung des Sauerstoffs der Verbrennungsluft erzielen.

Die Diagramme (Bild 4 und 5) zeigen Druckverlauf, Düsenadelbewegung, Zündverzug und Kurbelwinkelmarken. Bild 4 ist bei $n = 1500$ U/min mit Gasöl allein aufgenommen; es ergibt sich ein $p_e = 6,57$ atü und ein $\eta_e = 28,2$ %. Bild 5 zeigt die gleichen Vorgänge ebenfalls bei $n = 1500$ U/min für Gasöl + Butan; es ergibt sich ein $p_e = 7,07$ atü und ein $\eta_e = 31,5$ %.

Der Verlauf der Abgastemperaturen bei Gaszusatz lag durchweg unter denen bei reinem Gasölbetrieb.

Bild 6 zeigt Leistung " N_e ", mittleren Druck " p_e " und Wärmeverbrauch " W " bei Gasölbetrieb für Leistungsgrenze - - - - - und Rauchgrenze ——— über der Drehzahl. Bild 7 zeigt das gleiche für den Betrieb mit Gasöl + Butan, ebenfalls für die beiden Grenzen und über der Drehzahl.

Bild 8 zeigt Leistung " N_e ", mittleren Druck " p_e ", spezifischen Wärmeverbrauch " W ", Ladungswärme " Q_d " und Abgastemperatur " t_a " für den Betrieb mit Gasöl - - - - - und mit Gasöl + Butan über der Drehzahl.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß

1. in Abhängigkeit von der Leistung ein Butanzusatz von 20 bis 30 % möglich ist. Dadurch ergibt sich
2. eine Verbesserung der Ladungsausnutzung,
3. eine Leistungssteigerung um bis zu 20 %,
4. eine Drehzahlsteigerung von $n = 2\ 200$ U/min auf $n = 2\ 500$ U/min ohne wesentlichen Abfall des Drehmoments,
5. eine Verschiebung der Rauchgrenze nach oben,
6. eine Abgastemperaturerniedrigung um bis zu 80° .
7. Weicherer Lauf bei geringem und mittlerem Butanzusatz, daher
8. ein weniger steiler Druckanstieg.
9. Die Leistungsgrenze bei Rauchfreiheit ergab fast restlose Ausnutzung des Sauerstoffs der Ladung.

10. Bei hoher Belastung machte sich der Butanzusatz im Wärmeverbrauch besonders günstig bemerkbar.
11. Der Gesamtwärmeverbrauch lag bei mittleren und höheren Belastungen bei etwa 2 000 Kcal/PS_h.
12. Der Zündverzug wurde kleiner. Vergl. Bild 4 und 5.
13. Der Wirkungsgrad stieg bis auf fast 32 %.

Bei der hohen Verdichtung 1 : 19,5 war die jeweilige Größe des möglichen Butanzusatzes von der Klopfgrenze abhängig. Es lag deshalb nahe, die Verdichtung zu verringern, um den Butananteil nach Möglichkeit steigern, den Gasölanteil aber verkleinern zu können. Vorversuche ergaben die Richtigkeit dieser Erwägung. Die Verdichtung durfte nur so weit verringert werden, daß noch ein sicheres Anspringen auch bei kaltem Motor möglich blieb.

Interessant war, daß bei Butanzusatz ein Betrieb mit Steinkohlenteeröl statt des Gasöles möglich war. Beim Umschalten von reinem Gasöl- auf reinen Teerölbetrieb blieb der Motor nach wenigen Zündungen stehen. Dagegen war beim Umschalten von Betrieb mit Gasöl + Butan auf Steinkohlenteeröl + Butan ein wesentlicher Unterschied im Betriebsverhalten nicht bemerkbar. Auch die erreichte Leistung lag höher als bei reinem Gasölbetrieb. Um die Einspritzpumpe zu schonen, wurden nur einige kurze Versuche mit Steinkohlenteeröl + Butan gefahren.

Auf Grund der gesammelten Erfahrungen wurde als erster ein Lastkraftwagen mit 6-Zylinder-Büssing-Vorkammermotor mit 12,7 l Hubraum und einer Drehzahl von $n = 1500 \text{ U/min}$ auf Generatorgas von einem Heizwert $H_u = \sim 1100 \text{ Kcal/m}^3$ aus einem Wiscovergaser umgestellt. Die vorhandene Vorkammer (Bild 9) wurde belassen, nur der Boden herausgebohrt (Bild 10). Die Glühkerze wurde durch einen Blindstopfen ersetzt. Die Verdichtung wurde auf 1 : 13,5 herabgesetzt und der Einspritzpunkt der Pumpe auf etwa 40° vor O.T. vorverstellt. Die Luft- und Gaszuführung ergibt sich aus Bild 11. Es wurden mit dem umgebauten Wagen Züge bis zu 26,5 t Gesamtgewicht gefahren. Die Leistung des Motors ging um 15 bis 20 % herab, genügte aber bei der herabgesetzten Fahrgeschwindigkeit in allen Fällen. Auf starken Steigungen mußte zeitweise mit dem nächst kleineren Gang gefahren werden. Die Beschleunigung in der Ebene war ausreichend. Der Verbrauch an Zündöl betrug auf gemischter Strecke bei Anhängerbetrieb etwa 28 % des normalen Gasölverbrauches bei reinem Dieselbetrieb, ohne Anhänger etwa 25 %. Bei Fahrten auf der Reichsautobahn betrug der Zündölverbrauch nur etwa 17 %. Der Wagen läuft seit Anfang Juni im Regelbetriebe der Reichsbahndirektion Hannover ohne jede Beanstandung. Bisher wurden etwa 3000 km zurückgelegt. Als zweites Fahrzeug wurde ein Omnibus mit dem gleichen Dieselvorkammermotor der Hannoverschen Straßenbahn auf Flüssiggas (Eichgas) umgestellt. Die Vorkammer wurde hier nach Bild 12 abgeändert, die Verdichtung auf 1 : 12,5 vermindert und die Luft- und Gaszufuhr nach Bild 13 ausgeführt. Die Leistung des Motors konnte auf normaler Höhe gehalten werden, nur befriedigte hierbei die Laufruhe nicht. Im Hinblick auf diese wurde die Leistung um etwa 20 % herabgesetzt; Klopfen trat dann nicht mehr auf. Der Verbrauch an Zündöl betrug auf der Landstrecke 28 %, auf der Stadtstrecke bei planmäßiger

Omnibusfahrt 38 %. Die Beschleunigung war trotz verminderter Motorleistung ausreichend. Der Wagen läuft seit Anfang Juli 1940 im normalen Omnibusdienst der Straßenbahn Hannover.

An einem 4-Zylinder-Büssing-Vorkammermotor mit 4,9 l Hubraum, einer Drehzahl von 2000 U/min und einer Regelleistung von 60 PS wurden auf dem Prüfstande des Instituts Leistungen bei verminderter Verdichtung und abgeänderter Vorkammer, sowie Verbrauchsmengen unter Verwendung von Eich- und Flüssiggas gemessen. Hierbei konnte bei Verwendung von Eichgas die genannte Zahl von 20 % Minderleistung mit der elektrischen Pendel-Generator-Bremse - ohne jedes Klopfen auch bei der Beschleunigung - einwandfrei nachgeprüft werden. Die Versuche an diesem ortsfesten Motor werden fortgesetzt, um die vorläufigen Ergebnisse noch zu verbessern im Hinblick auf die noch primitiven Regelorgane der Erstausführung, auf die bestmöglichen Düsen und die Gemischbildungsvorgänge.

Als drittes Fahrzeug befindet sich ein Magirus-Lastkraftwagen mit Deutz-Vorkammermotor und als viertes, ein Vomag-Lastkraftwagen mit Wirbelkammermotor (beide für Holzgas) in Umstellung. Bei allen Motorumstellungen ist besonderes Augenmerk darauf gerichtet worden, daß vollbetriebsfähige Wagen mit ausreichender Leistungsfähigkeit den Betrieben zur Verfügung gestellt wurden. Beim Umbau der Motoren wurde so wenig wie irgend möglich geändert und die Abänderungen mit allereinfachsten Mitteln ausgeführt. Es muß, entsprechend der jeweiligen Kraftstofflage, jederzeit in wenigen Stunden der alte Zustand des Motors herbeigeführt werden können, sodaß dann normaler Dieselbetrieb wieder möglich ist. Auch muß gefordert werden, daß der Wagen jederzeit ohne geringste Umstellung seine Fahrt im reinen Dieselbetrieb beenden kann, wenn Generatorschäden auftreten, oder sich Flüssiggasmangel zeigt.

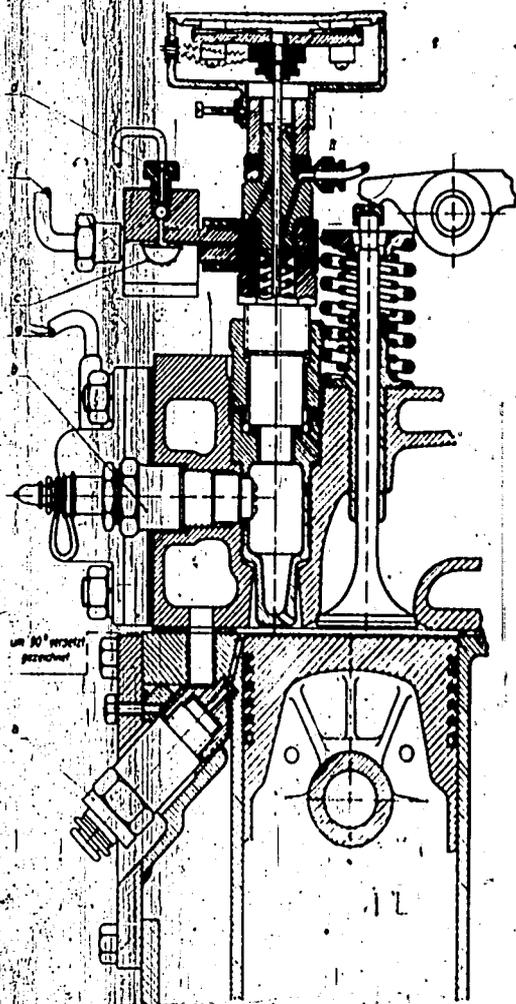


Bild 1

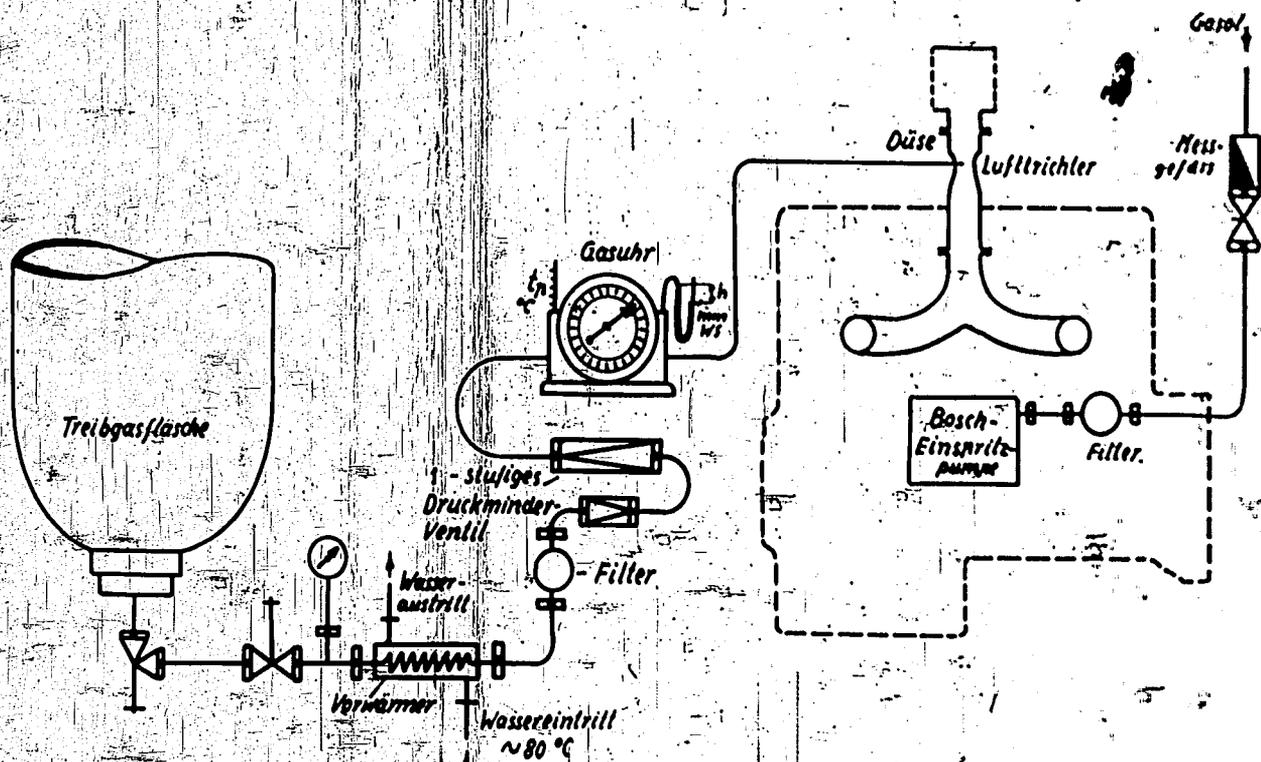


Bild 2. Rohrleitungsplan eines für den Betrieb mit Treibgaszusatz eingerichteten 4-Zylinder-45 PS-Magirus-Dieselmotors.

6

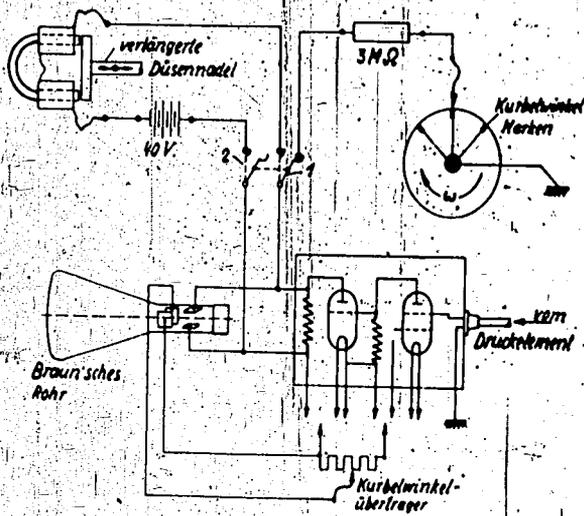


Bild 3. Indizieren eines Magirus-Vorkammer-Dieselmotors: Schaltung zum Aufzeichnen des Verbrennungsdruckverlaufes, der Düsenadelbewegung (ds/dt) und von Kurbelwinkel-Marken mittels Braun'scher Röhre.

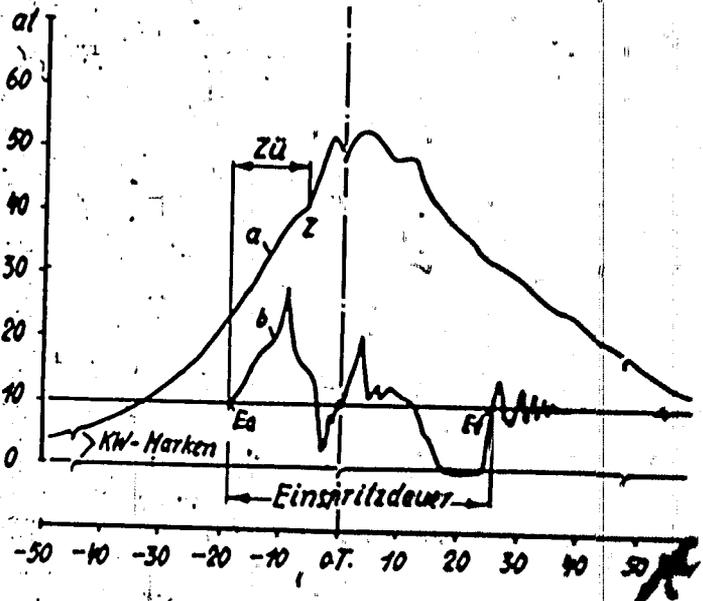


Bild 4

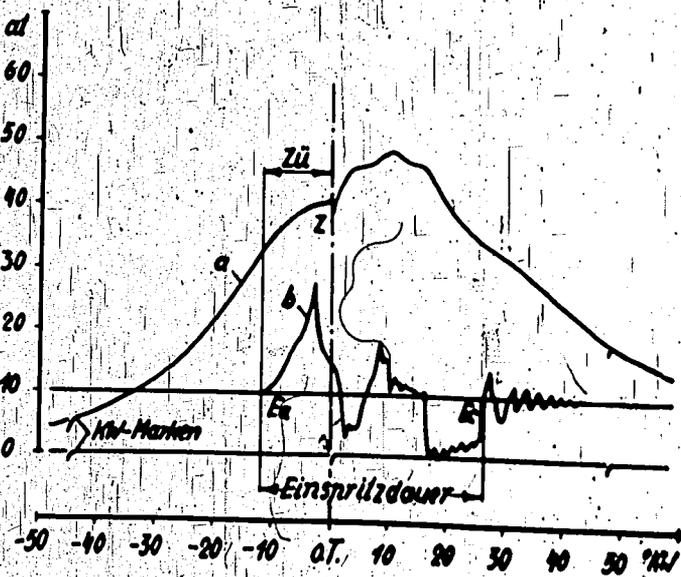


Bild 5

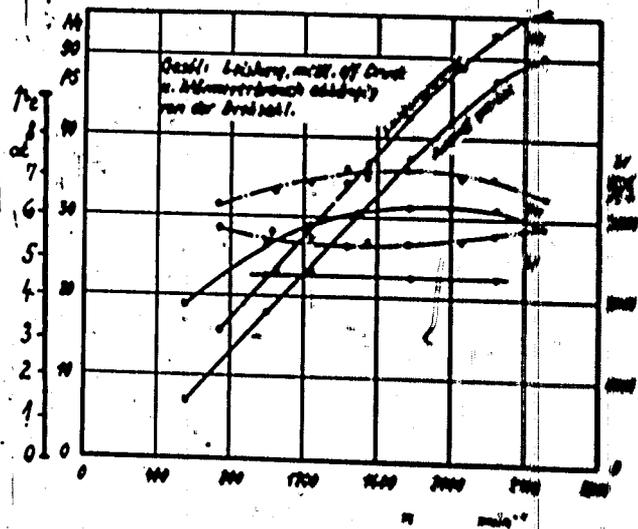


Bild 6

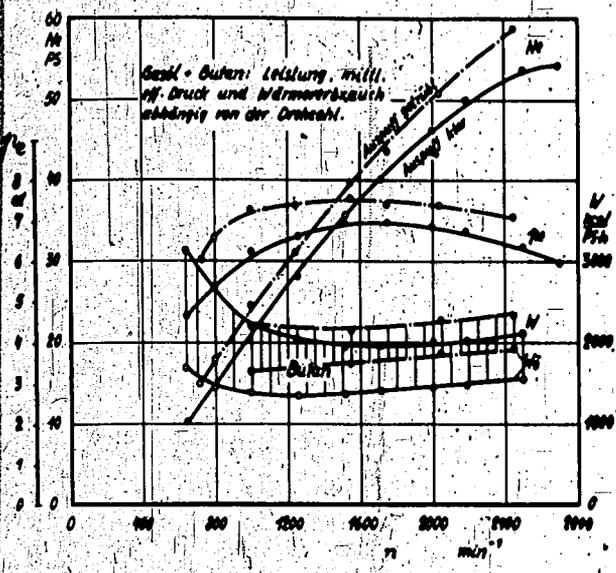


Bild 7

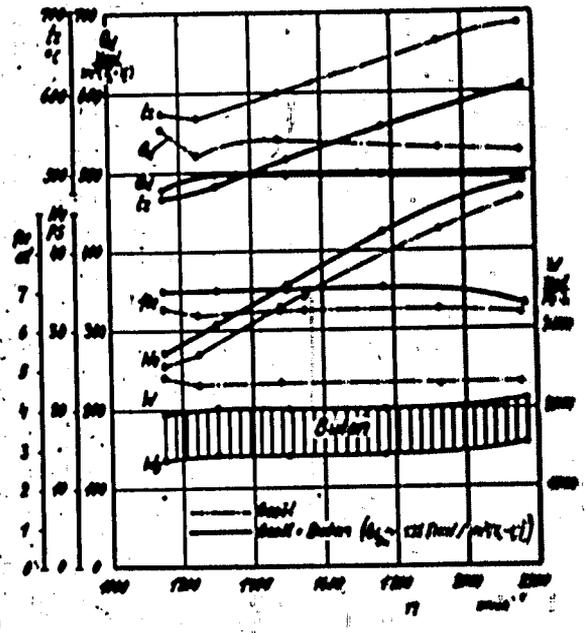


Bild 8. Versuche an der Rauchgrenze mit Gasöl und Gasöl + Butan: Leistung, mittl: effektiver Druck, spez. Wärmeverbrauch, Wärmedichte und Abgas-temperatur abhängig von der Drehzahl.

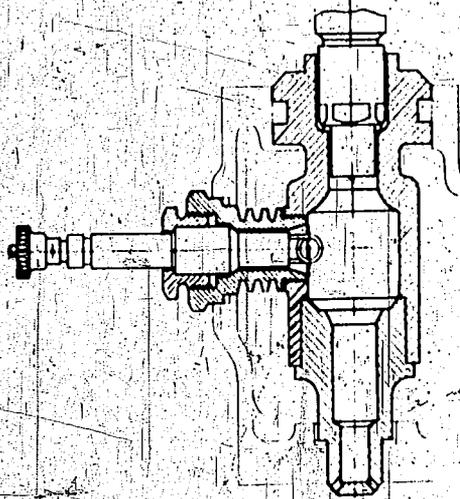


Bild 9

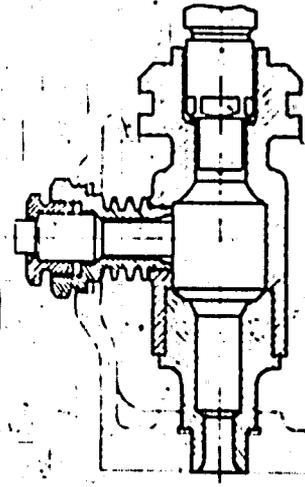


Bild 10

8

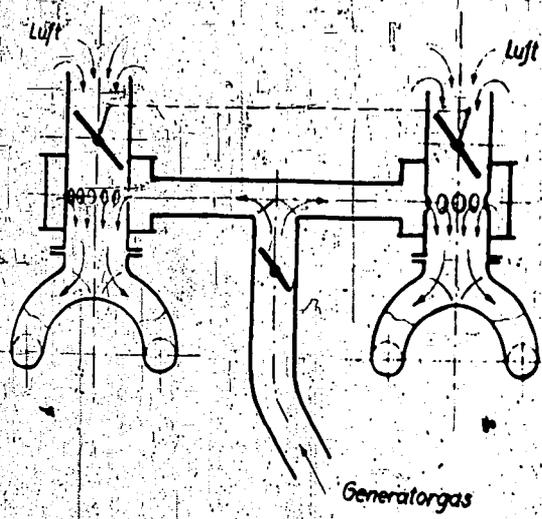


Bild 11

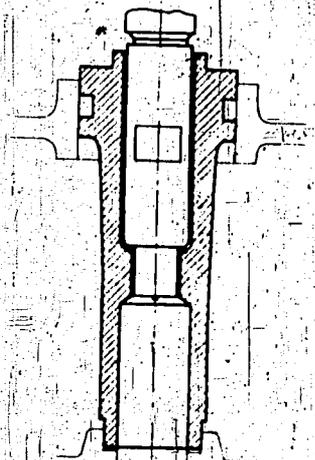


Bild 12

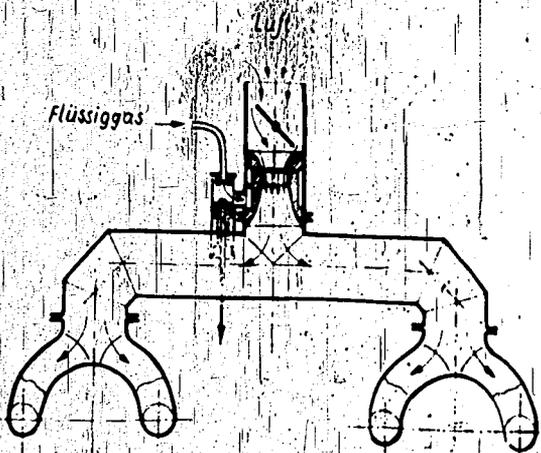


Bild 13