

Die Entwicklung eines Benzineinspritzmotors
für Saugrohreinspritzung

von M.Hayashi, T.Asano, A.Takamatsu und H.Akabani

Firma Daihatsu Kogyo K.K.

Kurzgefaßte Inhaltsangabe

Die Firma Daihatsu Kogyo K.K. hat einen Benzineinspritzmotor entwickelt, der nach dem Einkolben-Zweidüsen-Einspritzsystem arbeitet. Dieses System unterscheidet sich grundsätzlich von dem Einspritzsystem, das in den Kraftfahrzeugen der Firma Daimler Benz 220 SE und 230 SL angewandt ist und stellt eine eigene Entwicklung der Firma Daihatsu dar.

Aufgrund reichhaltiger Versuchsergebnisse, wie sie im Laufe der Entwicklung dieses Einspritzsystems an einer Reihe von Versuchsmotoren gesammelt wurden, werden in der Arbeit die grundlegenden Probleme der Benzineinspritzung besprochen. Bei dem bisher gebräuchlichen System der Einzeleinspritzung in jeden Zylinder stellten der Spritzbeginn, die Spritzdauer und die Lage der Einspritzdüse keine allzu schwierigen Probleme dar; in der Arbeit wird deshalb geklärt, in welchem Bereich sich die dort gesammelten Erfahrungen auch auf den Fall der Einkolben-Zweidüsen-Einspritzung anwenden lassen. Darüberhinaus hat man gleichzeitig die Frage geklärt, inwieweit man, nachdem man in diesem Bereiche zufriedenstellende Ergebnisse erzielt hat, auch hinsichtlich der Leistung und hinsichtlich der Stabilität des Mechanismus im Vergleich mit der Einzelzylindereinspritzung ausreichende Ergebnisse erhält.

1. Vorwort

Als erster Benzineinspritzmotor bei uns hier in Japan ist im April des Jahres 1967 der Daihatsu-Berliner 1000 GT-Einspritzmotor auf den Markt gekommen; das Einspritzsystem dieses Motors ist von den bisher in anderen Ländern hergestellten Benzineinspritzmotoren etwas verschieden, es han-

delt sich hier nämlich um einen Vierzylindermotor, der mit einer Pumpe und zwei Düsen ausgerüstet ist.

Die Geschichte der mit einem Funkenzündmechanismus ausgerüsteten Benzineinspritzmotoren ist in Wirklichkeit schon alt. Es sind schon viele Einspritzsysteme und viele Einspritzpumpen entwickelt und untersucht worden und diese Systeme sind dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechend ausgeführt und angepaßt worden, alle waren jedoch sehr teuer.

Bei der Firma Daihatsu hat man schon seit dem Jahre 1963 an einem Benzineinspritzmotor gearbeitet und alle möglichen Einspritzsysteme eingehend untersucht mit dem Ziel, ohne dabei irgendwie an Leistung des Benzineinspritzmotors einzubüßen, einen billigen Motor mit einem möglichst einfachen Mechanismus zu bauen. In der vorliegenden Arbeit soll nun über einen Teil der mit dem von uns untersuchten Einspritzsystem erhaltenen Ergebnissen berichtet werden.

2. Der Aufbau des Einspritzmotors

2.1 Das Saugrohreinspritzsystem

Die Benzineinspritzsysteme lassen sich im großen in 2 Arten einteilen, nämlich in die Saugrohreinspritzung (einschließlich der Schlitzeinspritzung) und in die Verbrennungskammereinspritzung; bei der Saugrohreinspritzung kann man eine kontinuierliche Einspritzung und eine periodische Einspritzung und außerdem eine Sammeleinspritzung und eine Einspritzung in jeden einzelnen Zylinder unterscheiden. In der vorliegenden Arbeit soll nun über die periodische Saugrohreinspritzung berichtet werden.

Als repräsentative Beispiele für die periodische Saugrohr-

Tafel 1

Die Kombination von Pumpenelement, Düse, Venturi usw. im Falle eines Viertakt-Vierzylinder-Reihenmotors (Saugrohrinspritzung)

Motortyp	Zahl der Pumpenelem.	Zahl der Düsen	Zahl der Venturi	Förderhäufg. Motordrehzahl	Zahl d. Ansg.Öfn.	Eingebaut in das Kraftfahrzeug
A	1	1	1	2/1	2 oder 4	
B	1	2	1 oder 2	1/1	2	
C	1	4	1 oder 2, 4	1/1 oder 1/2	4	wie bei DB 220 ST
D	2	4	1 oder 2, 4	1/2	4	wie bei DB 220 ST
E	4	4	1 oder 2, 4	1/2	4	wie bei DB 230 ST

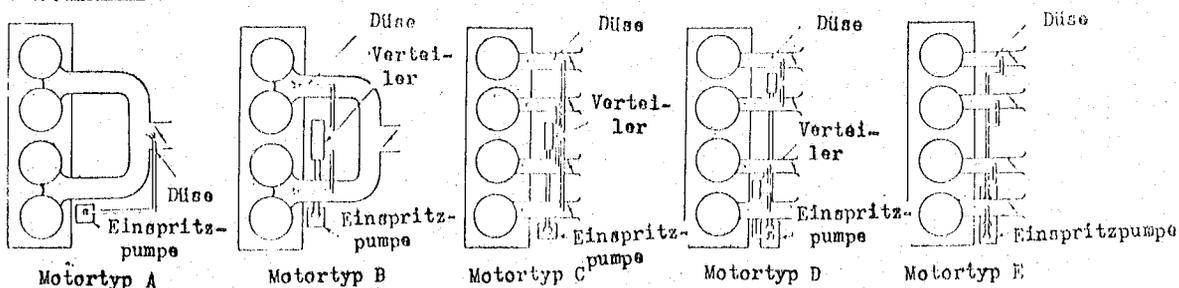


Abb. 1

Tafel 2

Die Daten des Versuchsmotors

Bezeichnung des Motortyps:	Fe
Art des Motors:	Benzinmotor
Kühlsystem:	Wasserkühlung
Zahl und Anordnung der Zylinder:	Vierzylinder-Reihenmotor
Arbeitszyklus:	Viertaktmotor
Form der Verbrennungskammer:	Keilform
Ventilanordnung:	oben liegende Ventile
Durchmesser und Hub mm:	68 x 66
gesamte Auspuffmenge l:	0.958
Zündfolge:	1-3-4-2

Tafel 3

Die Hauptdaten der Einspritzpumpe

Kolbendurchmesser:	7.5 mm
Nockenhub:	7 mm
Einspritzdruck:	15 Atg
maximale Drehzahl:	7000 U/Min.
Gewicht der Pumpe:	3 kg
Mengenregelung:	pneumatisch

einspritzung werden zwar häufig die DAIMLER BENZ - Fahrzeuge 220 SE und 230 SL angeführt, bei einer Bosch-Kolbenpumpe jedoch sind noch viele andere Arten von Kombinationen zwischen Düse und Pumpenelement möglich. Die Tafel 1 zeigt für einen Viertakt-Vierzylinder-Reihenmotor 5 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. In der Abb.1 ist jede einzelne dieser 5 Kombinationen zeichnerisch dargestellt.

Der Motortyp A: Hier ist unmittelbar hinter dem Venturi eine Düse angebracht, die Kraftstoffansaughäufigkeit ist gleich der doppelten Motordrehzahl, und es genügt, die Drehzahl der Einspritzpumpe bzw. das Nockenprofil entsprechend anzupassen. Da sich jedoch der Kolben bei jeder Umdrehung des Motors zweimal auf- und abbewegt, so ergeben sich bei schnell laufenden Motoren Schwierigkeiten, und eine gleichmäßige Verteilung des Gasgemisches auf die einzelnen Zylinder, die ja das kennzeichnende Merkmal eines Einspritzmotors darstellt, läßt sich nur schwer erreichen. Man hat jedoch die Möglichkeit, 2 oder 4 Ansaugöffnungen anzuwenden, so daß hinsichtlich des Preises diese Ausführung die billigste von allen 5 Arten ist.

Der Motortyp B: Bei diesem Motor sind jeweils 2 Zylinder mit einer Ansaugöffnung ausgestattet, und für jede Ansaugöffnung ist eine Düse vorhanden. In diesem Falle ist die Kraftstoffausspritzhäufigkeit gleich der Motordrehzahl (wenn man beispielsweise das Nockenprofil der Einspritzpumpe eiförmig gestaltet, so daß man bei einer Umdrehung der Nockenwelle eine zweimalige Kraftstoffausspritzung erhält, dann bekommt man für die Nockenwelle die Hälfte der Motordrehzahl.) In diesem Falle muß jedoch auf der Strecke

von der Einspritzpumpe bis zu den beiden Düsen ein "distributor" (ein Kraftstoffverteiler) eingesetzt werden, der für eine gleiche Verteilung sorgt. Bei diesem Motortyp sind jedoch, wie nachher noch dargelegt werden soll, der Kraftstoffeinspritzbeginn und die Kraftstoffeinspritzperiode Faktoren von großer Wichtigkeit.

Der Motortyp C: Bei diesem Motortyp haben wir für jeden Zylinder eine für sich getrennte Ansaugöffnung, und für jeden Zylinder ist jeweils eine Düse vorhanden. Die Kraftstoffausspritzhäufigkeit ist gleich der Motordrehzahl (wie beispielsweise beim 220 SE), oder gleich der Hälfte der Motordrehzahl. Zwischen der Kraftstoffpumpe und den 4 Düsen muß ein Verteiler eingeschaltet werden, der für gleiche Verteilung sorgt. Dieser Einspritzmotortyp ist bei dem DAIMLER BENZ-220 SE auf einen Motor mit 4 Zylindern pro Pumpenelement angewandt worden. In diesem Falle wird die Kraftstoffverteilung von kleinen Motorbelastungen bis zum Leerlauf problematisch.

Der Motortyp D: Bei diesem Motortyp hat jeder einzelne Zylinder für sich getrennt seine Ansaugöffnung, und genau wie auch beim Motortyp C ist für jeden einzelnen Zylinder eine Düse vorgesehen. Zum Unterschied vom Motortyp C jedoch werden hier 2 Pumpenelemente verwendet, von denen jedes mit der halben Motordrehzahl arbeitet. Zwischen den beiden Pumpenelementen besteht eine Phasendifferenz von 180° , und jedes von ihnen liefert bei einer Umdrehung den Kraftstoffanteil für 2 Zylinder, der dann jeweils durch einen Verteiler auf die beiden Zylinder in gleichen Mengen verteilt wird. Dieser Motortyp ist auf den DAIMLER BENZ - 220 SE als Motor mit 2 Zylindern pro Pumpenelement ange-

wandt. Da die Einspritzpumpe mit der halben Motordrehzahl angetrieben werden kann, so ist dieser Motortyp besonders günstig für schnell laufende Motoren.

Der Motortyp E: Bei diesem Motortyp hat jeder einzelne Zylinder für sich getrennt sein Ansaugsystem und sein Einspritzsystem, der Einspritzmechanismus ist ganz genau der gleiche wie bei der Einspritzung in die Verbrennungskammer, nur daß hier ein Wärmeschutz und eine Druckbeständigkeit für die Düse nicht so unbedingt erforderlich sind. Dieser Motortyp ist bei dem DAIMLER BENZ-230 SL angewandt worden, er stellt von den aufgezählten Typen der Benzineinspritzung den teuersten dar.

Wir haben nun versucht, durch entsprechende Kombination der Einspritzpumpelemente, der Düsen und der Verteiler, 5 verschiedene Arten von Einspritzsystemen aufzuzeigen; der Motortyp A kommt dem Vergasermotor am nächsten, auch im Hinblick auf die Drehzahl ist dieses Einspritzsystem für Kraftfahrzeuge am ungünstigsten. Die Motortypen C, D und E unterscheiden sich lediglich durch die Anzahl ihrer Einspritzpumpelemente. Wenn wir den Faktor der Kraftstoffverteilung berücksichtigen, dann können wir diese Type als im Grunde genommen gleiche Einspritzsysteme betrachten. Wir wollen uns deshalb auf die Besprechung der Typen B und D beschränken.

2.2 Der für die Versuche verwendete Motor

Der für die Versuche verwendete Motor ist auf der Basis des wassergekühlten Viertakt-Vierzylinder-Reihenmotors FE, der in den "spider" der Firma Daihatsu Kogyo eingebaut ist, ausgeführt worden. Die wichtigsten Betriebsdaten dieses Motors sind in der Tafel 2 zusammengestellt.

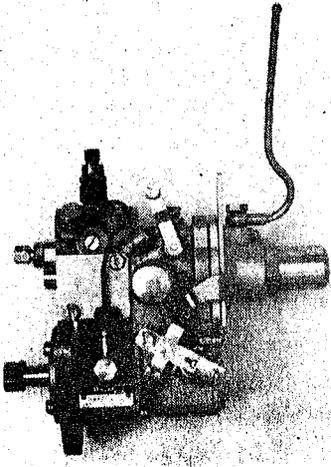


Abb. 2 Die Einspritzpumpe



Abb. 3 Die Einspritzdüsen

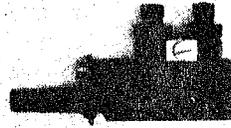


Abb. 4 Der Verteiler
(für den U 3-Motor)

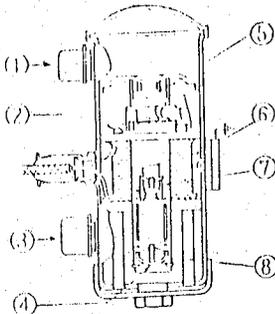


Abb. 5 Elektromagnetische Pumpe
1 - Druckförderöffnung, 2 - Schalter, 3 - Ansaugöffnung, 4 - Ansaugventil, 5 - Kolben, 6 - Spule, 7 - Druckförderventil, 8 - Filter.

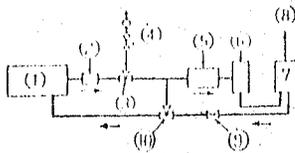


Abb. 6 Das Kraftstoffsystem
1 - Kraftstofftank, 2 - 1. Filter, 3 - Dreiwegehahn, 4 - Büretten, 5 - elektromagnetische Pumpe, 6 - 2. Filter, 7 - Einspritzpumpe, 8 - zu den Düsen, 9 - Druckregelventil, 10 - Dreiwegehahn

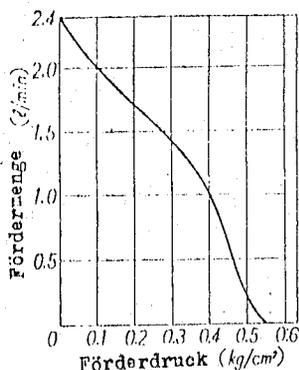


Abb. 7
Die Leistungskennlinie der elektromagnetischen Pumpe

2.3 Die Einspritzpumpe

Die für die Versuche verwendete Einspritzpumpe war eine Kolbenpumpe der Bosch-Bauart. In der Tafel 3 sind die wichtigsten Daten dieser Pumpe aufgeführt, die Abb.2 zeigt ein Foto einer Einkolben-Einspritzpumpe.

2.4 Die Einspritzdüse

Die Abb.3 zeigt die äußere Ansicht der Einspritzdüse. Es handelt sich dabei um ein Nadelventil der nach außen öffnenden "poppet"-Bauart, der Ventilöffnungsdruck beträgt 15 kg/cm^2 , und der Spritzwinkel ist ungefähr 45° .

2.5 Der Verteiler

Die Abb.4 zeigt den für den Motortyp B verwendeten Verteiler. Im Falle des Motortyps C besitzt dieser Verteiler 4 Auslaßöffnungen, während im Falle des Motortyps D 2 Verteiler der Bauart des Motortyps B verwendet werden.

2.6 Die elektromagnetische Pumpe

Die Abb.5 zeigt eine elektromagnetische Pumpe, die in ihrer Konstruktion genau die gleiche ist, wie die im allgemeinen für Kraftfahrzeuge verwendeten elektromagnetischen Pumpen. Wie später noch dargelegt werden wird, ist der Schließdruck auf 0.55 kg/cm^2 ganz erheblich gesteigert worden.

3. Die Versuchseinrichtung

3.1 Das Kraftstoffeinspritzsystem

Das für die Versuche verwendete Kraftstoffeinspritzsystem bestand aus einer Einspritzpumpe, einer elektromagnetischen Pumpe, 2 Filtern und einem Kraftstoffdruckregelventil. In der Abb.6 ist dieses System schematisch dargestellt.

Von dem Kraftstofftank 1 wird das Benzin über ein erstes

Filter 2 (50 mesh) durch eine elektromagnetische Pumpe 5 unter Druck zu einem zweiten Filter 6 (150 mesh) gefördert. Nach dem Passieren des 2. Filters wird das Benzin durch die Einspritzpumpe 7 seiner Menge nach bemessen und der Zeit nach geregelt, unter Druck gefördert und gelangt so in die Düse. Dabei vollendet das überschüssige Benzin seinen Zirkulationskreislauf, indem es über ein Druckregelventil 9 in den Kraftstofftank 1 zurückkehrt. Die Büretten 4 und die Dreiwegehähne 3 und 4 sind zum Zwecke der Messung des Benzinverbrauches vorgesehen. Bei der Mengenzumessung (Mengenmessung?) wird der Dreiwegehahn 3 nach der Kraftstofftankseite hin geschlossen und nach der Bürettenseite hin geöffnet, gleichzeitig wird der Dreiwegehahn 10 nach der Kraftstofftankseite hin geschlossen und nach der Ansaugseite der elektromagnetischen Pumpe hin geöffnet. Die Abb. 7 zeigt für die bei unseren Versuchen verwendete elektromagnetische Pumpe die Beziehung zwischen dem Förderdruck und der Fördermenge.

3.2 Die Steuerung der Kraftstoffeinspritzmenge und der angesaugten Luftmenge

Für die Regelung der Kraftstoffeinspritzmenge hatten wir es so eingerichtet, daß wir die Regelstange der Einspritzpumpe durch eine Hebelübersetzung unmittelbar vom Bedienungsstand aus von Hand betätigen konnten, und die angesaugte Luftmenge wurde nach dem gleichen Verfahren vom Bedienungsstand aus durch Betätigung einer Drosselklappe (butterfly valve) geregelt. Dadurch hatten wir die Möglichkeit, die Leistung bei irgend einem beliebigen Luftkraftstoffverhältnis bis zum Vollastbetrieb herauszubekommen. Bei Motoren mit 2 und mehr Ansaugventilen wurde eine Aus-

gleichleitung vorgesehen und wir haben besonders darauf geachtet, daß wir bei niedrigen Öffnungsgraden der Drosselklappe eine gleichmäßige Verteilung der angesaugten Luftmenge bekamen.

Bei den Motoren, bei welchen die eingespritzte Kraftstoffmenge aufgeteilt zur Verwendung kommt, wird zwischen die Kraftstoffeinspritzpumpe und die Düsen der in der Abb.4 dargestellte Verteiler eingeschaltet, durch den eine solche Regelung erreicht wird, daß durch die einzelnen Düsen die gleichen Benzinmengen eingespritzt werden können.

4. Die Motorleistung

Die wichtigsten für die Motorleistung unmittelbar ausschlaggebenden Faktoren sind: Der Spritzbeginn, die Lage der Düse, die Spritzdauer (Spritzperiode?), die Form der Ansaugleitung, das Kompressionsverhältnis und die Zündwinkelverstellung. Im folgenden sollen diese Faktoren einzeln betrachtet werden.

4.1 Der Spritzbeginn

Bei den Motortypen C, D und E, bei denen jeder einzelne Zylinder für sich getrennt seine Ansaugöffnung und seine Düse besitzt, wird die Düse so angebracht, daß die vordere Spitze des Spritznebels in die Nähe des Ansaugventiles kommt; in diesem Falle hat der Spritzbeginn nahezu überhaupt keinen Einfluß auf die Leistung des Motors bei vollständig geöffneter Drosselklappe (vergleiche die Abb.11). Sowohl dann, wenn der notwendige Kraftstoff zweimal aufgeteilt und eingespritzt wird, wie im Falle des Mercedes Benz 220 SE, wie auch dann, wenn der notwendige Kraftstoff auf einmal eingespritzt wird, wie im Falle des Mercedes Benz 230 SL, ändert sich die Motorleistung bei vollständig

geöffneter Drosselklappe nahezu überhaupt nicht. Im Falle des Motortyps B jedoch haben wir nur halb so viele Ansaugöffnungen und Düsen, wie bei den Motortypen D, C und E, der Spritzbeginn ist deshalb hier ein Faktor, der für die Verteilung des Gasgemisches von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Die Abb.8 zeigt für einen Viertakt-Vierzylinder-Reihenmotor mit der Explosionsfolge 1-3-4-2 die Kolbenhübe, den Spritzbeginn und die Spritzdauer für den Fall der Anwendung des Einspritzverfahrens B. Wie bereits oben dargelegt wurde, ist bei dem Motortyp B die Häufigkeit der Benzineinspritzung gleich der Motordrehzahl und bei jeder Motorumdrehung wird das Benzin als Gasluftgemisch in die Verbrennungskammer hineingesaugt. Bei einem Einspritzsystem, welches so geregelt ist, daß das Benzin während des Ansaughubes des ersten Zylinders eingespritzt wird, erfolgt bei der nächstfolgenden Umdrehung die Einspritzung während des Explosions-Auspuffhubes des ersten Zylinders (diese Periode fällt mit dem Auspuffhub des 2.Zylinders zusammen). Dieses Benzin bildet ein fettes (wörtlich: konzentriertes) Gasgemisch und durch den im Anschluß daran erfolgenden Ansaughub des Zylinders Nr.2 wird dieses Gasgemisch in die Verbrennungskammer hineingesaugt. Bei den Zylindern Nr.3 und Nr.4 verhält es sich gerade umgekehrt. Da also bei diesem Verfahren die dem Ansaughub des Zylinders Nr.1 entsprechende Einspritzperiode nach rückwärts verschoben wird, und da wir deshalb in dem Zylinder Nr.1 keine vollständige Ansaugung haben und da für den Zylinder Nr.2 Benzin in der Ansaugöffnung zurückbleibt, so wird die Verteilung des Gasgemisches ungleichmäßig.

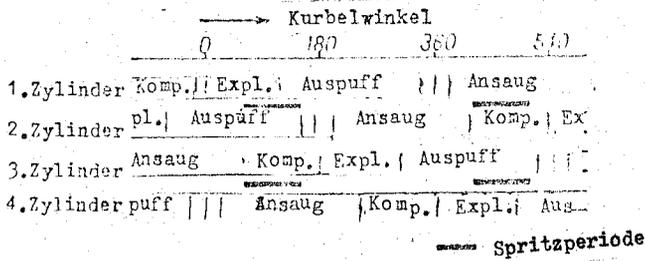


Abb. 8 Schematische Darstellung der Einspritzperioden und der Kolbenhübe bei einem Viertakt-Vierzylinder-Reihenmotor mit der Explosionsfolge 1-3-4-2 (Einspritzsystem des Motortyps B)

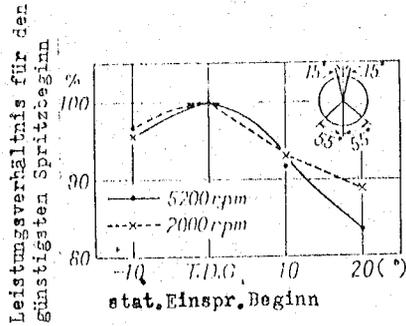


Abb. 9 Der Zusammenhang zwischen Spritzbeginn und Motorleistung. Spritzwinkel 45° , vorderes Düsenende im Zylinderkopf 35 mm, Zündzeitpunkt 10° (C.A.)/500 U/Min., Einspritzsystem B, Durchmesser der Verteileröffnung 0.3 mm

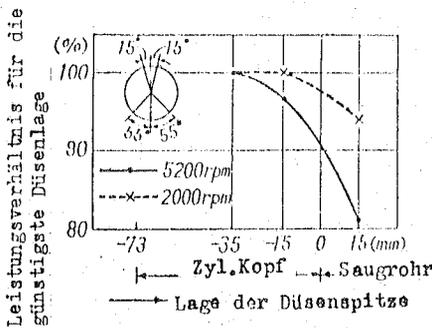


Abb. 10 Der Einfluß der Lage des vorderen Düsenendes auf die Leistung des Motors. Düsen-spritznebelwinkel 45° , statischer Einspritzbeginn 0 (nach der oberen Totpunktlage), Zündzeitpunkt 10° (Kurbelwinkel)/500 U/Min.



Abb. 11 Die günstigste Lage der Düse

Die Abb.9 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Spritzbeginn und der Motorleistung bei vollständig geöffneter Drosselklappe als Leistungsverhältnis des günstigsten Wertes bei einem Einspritzsystem mit einer verhältnismäßig langen Einspritzperiode. Dabei hat sich ergeben, daß es am günstigsten ist, wenn beim Spritzbeginn des Zylinders Nr.1, wenn der Kolben oben ist, der statische Einspritzbeginn erfolgt. Wenn die Einspritzung später erfolgt, dann wird die Verteilung des Gasgemisches ungleichmäßig, und auf der Seite der hohen Drehzahlen, wo die Einspritzperiode lang ist, haben wir ein Absinken der Motorleistung.

4.2 Die Lage der Düse

Bei den Motortypen D, C und E ist es, um die Verdampfung des Benzines zu beschleunigen, am günstigsten, wenn man die Spitze der Düse möglichst nahe an das Ansaugventil heranbringt. Beim Motortyp B muß das von der Ansaugluftströmung getragene eingespritzte Benzin auf 2 Zylinder verteilt werden, man kann es also nicht allzu nahe an das Ansaugventil heranbringen. In der Abb.10 sehen wir den Zusammenhang zwischen der Lage der Düsen Spitze und der Motorleistung, die Abb.11 zeigt die günstigste Lage der Düse.

Wenn sich die Düsen Spitze innerhalb des Zylinderkopfes befindet, dann kann man kaum von einem Einfluß auf die Motorleistung sprechen (innerhalb von 3%), wenn sich jedoch die Düse auf der Seite der Ansaugleitung befindet, dann ist der Einfluß ihrer Lage groß. Außerdem dürfte die Tatsache, daß der Einfluß der Lage der Düse umso stärker ist, je höher die Drehzahl ansteigt, daher rühren, daß auf der Seite der Ansaugleitung von den Rohrwandungen her viel weniger

Wärme aufgenommen werden kann als im Zylinderkopf, und daß deshalb bei den Zylindern Nr.1 und Nr.4 das Benzin nicht ausreichend vergast und an den Wandungen der Ansaugleitung haften bleibt, wodurch natürlich die Verteilung gestört wird. Wenn man mit der Lage der Düse noch weiter vom Zylinderkopf weggeht, dann bekommt man bei hohen Drehzahlen einen unstabilen Lauf. Wenn man andererseits mit der Düse näher an das Ansaugventil herangeht, dann ergeben sich hieraus ganz erhebliche konstruktive Schwierigkeiten, so daß man schon aus diesem Grunde zunächst nicht weiter gegangen ist, außerdem ergibt sich aus der Abb.11 ganz klar, daß, wenn man allzu nahe herangeht, die Verteilung schlechter wird.

4.3 Die dynamische Einspritzperiode

Wie wir bereits in dem Abschnitt über den Spritzbeginn dargelegt haben, wird bei dem Motortyp D die Leistung des Motors nicht unmittelbar von der Einspritzdauer beeinflusst, während beim Motortyp B die Einspritzperiode unbedingt durch ein "valve timing" der Ansaugluft unter Ausschluß des wirkungslosen (?) Winkels sichergestellt sein muß. Um bei den Motortypen C und D eine gleichmäßige Kraftstoffverteilung zu bekommen, hat man in den Verteiler Kanalöffnungen (orifices) eingesetzt, durch deren Drosselwirkung eine Verteilung von hoher Genauigkeit erreicht wird. Bei diesem Motortyp wird also weithin die Verteilung des Gasgemisches der Verteilung des Einspritzsystemes verdankt. Wenn man den Durchmesser der Kanalöffnungen (orifices) klein nimmt, dann hat dies zwar eine gute Wirkung auf die Gleichverteilung des Kraftstoffes, andererseits wird aber dadurch auch die Einspritzperiode verlängert.

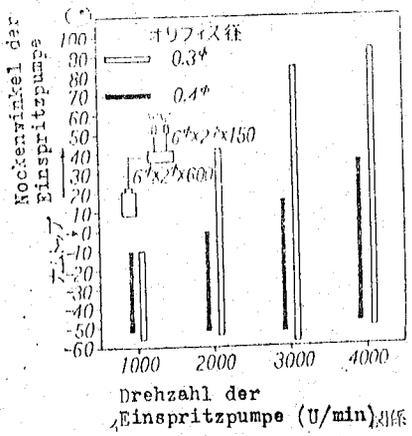


Abb.12 Der Zusammenhang zwischen der dynamischen Spritzperiode und der Drehzahl der Einspritzpumpe bei vollständig geöffneter Drosselklappe

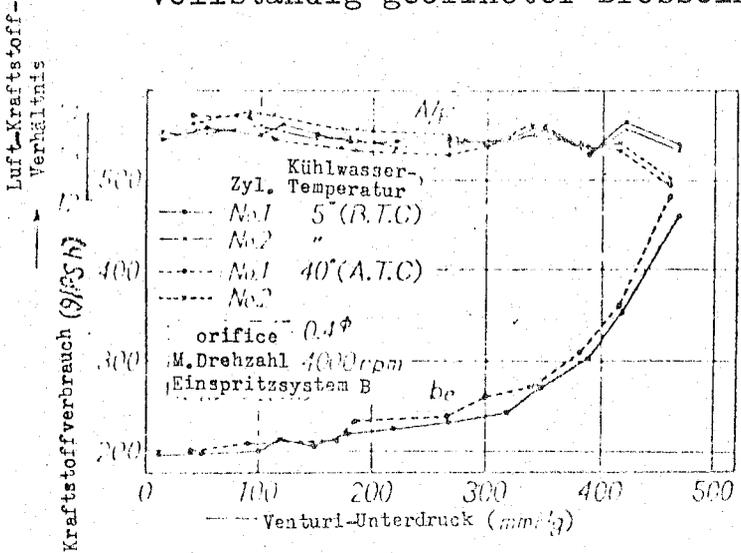


Abb.13 Der Einfluß des statischen Spritzbeginns auf das Luftkraftstoffverhältnis der einzelnen Zylinder

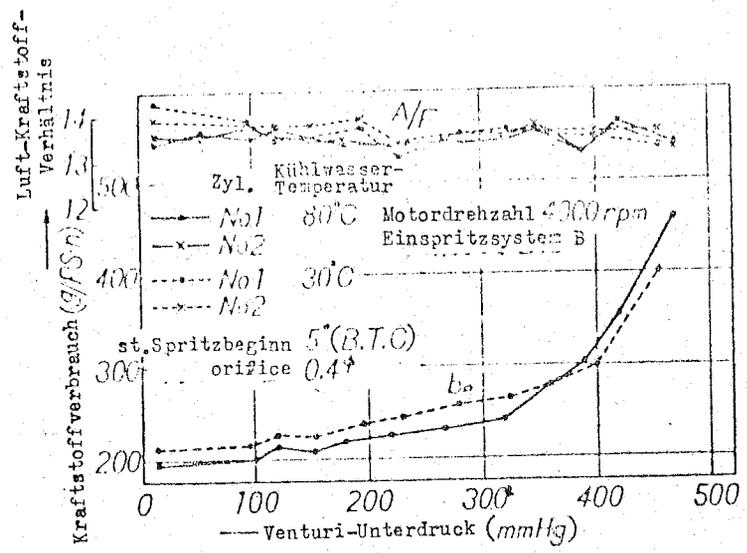


Abb.14 Der Einfluß der Kühlwassertemperatur auf das Luft-Kraftstoffverhältnis der einzelnen Zylinder

Die Abb.12 zeigt einen Vergleich der Einspritzperioden bei der Einspritzmenge bei vollständig geöffneter Drosselklappe bei Kanalöffnungsdurchmessern von 0.3 mm und 0.4 mm. Wenn der Motor sehr schnell läuft, dann wird die Einspritzperiode bei einer Kanalöffnung von 0.3 mm Durchmesser außerordentlich lang, und wenn man den Kanalöffnungsdurchmesser mit 0.4 mm wählt, dann kann man die Einspritzperiodenlänge auf ungefähr 60% herunterdrücken. Wenn man den Kanalöffnungsdurchmesser (orifice-Durchmesser) noch größer nimmt, dann wird die Einspritzdauer zwar weiterhin kürzer, im Hinblick auf die Gleichverteilung jedoch scheint der genannte Durchmesser doch die Grenze darzustellen.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung der Einspritzdauer haben wir uns sodann auf den Motortyp B konzentriert und die Lage der Düse, den Spritzbeginn und die Kraftstoffverteilung eingehend untersucht. Dabei hat sich ergeben, daß beim Motortyp B die Lage der Düse, die Einspritzdauer, und der Spritzbeginn auf das engste miteinander zusammenhängen, und es hat sich ganz klar herausgestellt, daß hier ein günstigster Bereich vorhanden sein muß. In der Abb.13 haben wir ein Beispiel, welches deutlich zeigt, daß auch bei Teil lastbetrieb dieser Zusammenhang immer zustande kommt. Wir haben bei diesen Versuchen eine Kanalöffnung (orifice) von 0.4 mm Durchmesser verwendet und die Einspritzperiode kürzer gemacht; die Abbildung zeigt die Werte, der Entnahme der Luftmenge bei Unterdruck im Venturi, für welche man bei der Kraftstoffströmungsmenge während der einzelnen Teillastbetriebe die maximale Leistung erhielt.

In der Abbildung sind mit vollausgezogenen Linien die mit dem Lauter-Luftkraftstoffverhältnismesser bei der Messung

der Schwankung des Luftkraftstoffverhältnisses in den Zylindern Nr.1 und Nr.2 für den Fall eines Spritzbeginnes bei 5° vor der oberen Totpunktlage erzielten Ergebnisse dargestellt. In der gleichen Abbildung sind die für einen Spritzbeginn bei 40° nach der oberen Totpunktlage erhaltenen Ergebnisse gestrichelt eingezeichnet. Wie bereits oben erwähnt, ist es bei einem Kanalöffnungsdurchmesser (orifice) von 0.3 mm *möglich*, in die Nähe der oberen Kolbenlage zu gehen; wenn man später einspritzt, dann sinkt die Leistung, bei einem Kanalöffnungsdurchmesser von 0.4 mm jedoch kann die Spritzdauer bei den hohen Drehzahlen um ungefähr (auf ungefähr?) 60% verkürzt werden, und deshalb bekommt man selbst dann, wenn man den Spritzbeginn auf 40° nach der oberen Totpunktlage und auf 45° nach der oberen Totpunktlage nach hinten verschiebt, kaum eine Schwankung des Luftkraftstoffverhältnisses zwischen den beiden Zylindern. Bei 40° nach der oberen Totpunktlage jedoch ist das Luftkraftstoffverhältnis im 2.Zylinder magerer als im 1.Zylinder; es ist anzunehmen, daß dies daher rührt, daß ein Teil des eingespritzten fetten Gemisches bereits beim Ansaughub in den 2.Zylinder ausgeströmt ist. Zum Zwecke des Vergleiches haben wir für jeden einzelnen Fall den spezifischen Kraftstoffverbrauch angegeben, in beiden Fällen werden Werte angegeben, durch welche der Mindestkraftstoffverbrauch 200 gi/PS.Stunde geteilt wird. Die Abb. 14 zeigt die Ergebnisse, die wir bei der Untersuchung des Einflusses der Kühlwassertemperatur erhalten haben. Die vollausgezogenen Linien beziehen sich auf eine Wassertemperatur von 80°C , während die gestrichelten Linien den Fall der Kühlwassertemperatur von 30°C betreffen; es wird dabei das Luftkraftstoffverhältnis für die Zylinder 1 und 2 an-

gegeben. Wenn man den Spritzbeginn auf 5° vor der oberen Totpunktlage gelegt hat, dann ist nahezu überhaupt kein Einfluß des Unterschiedes der Kühlwassertemperatur zu bemerken. Der in der Abb.13 angenommene Einfluß der Wassertemperatur ist geringer als der Einfluß einer Zurückverlegung der Spritzperiode um 45° (Kurbelwinkel).

4.4 Die Form der Ansaugleitung

Zum Unterschied von den Vergasermotoren wählt man bei den Benzineinspritzmotoren die Form der Ansaugleitung verhältnismäßig beliebig nach gutdünken, und man ist deshalb häufig der Ansicht, daß man durch entsprechende Wahl der Form der Ansaugleitung die Motorleistung in nennenswertem Maße verbessern könne; wenn man sich andererseits jedoch die Form des Motorraumes und die Befestigung des für die Kraftstoffregulierung verwendeten Mechanismus in der Praxis überlegt, dann wird man wohl kaum eine nennenswerte Verbesserung von einer Änderung der Form der Ansaugleitung her erwarten. Im folgenden sollen für die repräsentativen Ansaugsysteme die erhaltenen Versuchsergebnisse mitgeteilt werden.

Die strichpunktierte Linie der Abb.15 stellt ein Beispiel dar, bei dem wir die Leistung bei vollständig geöffneter Drosselklappe in Abhängigkeit von der repräsentativen Form der Ansaugleitung beim Motortyp B zeigen. Dadurch daß wir die für den Motor passenden Venturidurchmesser und Rohrlängen gewählt haben, konnten wir den maximalen Nettowert des mittleren effektiven Druckes auf 10.8 kg/cm^2 steigern, die von der Form der Ansaugleitung her bedingte Verringerung der Leistung bei den hohen Drehzahlen ist jedoch ganz erheblich. Wenn wir diesen Motor auf den Motortyp D, wel-

cher für jeden einzelnen Zylinder getrennt seine Ansaugleitung besitzt, umändern, dann erhalten wir, wie dies in der Abbildung durch eine gestrichelte Linie angegeben ist, den maximalen Nettowert des mittleren effektiven Druckes mit 10.5 kg/cm^2 , d.h. also ungefähr um 0.3 kg/cm^2 niedriger, wir haben jedoch keine so starke Verringerung der Leistung auf der Seite der hohen Drehzahlen. Umgekehrt jedoch haben wir auf der Seite der niedrigen Drehzahlen eine ganz deutliche Abnahme. Wenn bei diesem Ansaugsystem in der Absicht, einen Leistungsrückgewinn auf der Seite der niedrigen Drehzahlen zu erzielen, ein Luftreservoir anbringt, dann erzielt man, wie dies aus der voll ausgezogenen Kurve der gleichen Abbildung zu ersehen ist, eine Zunahme auf der Seite der niedrigen Drehzahlen, während umgekehrt auf der Seite der hohen Drehzahlen eine Abnahme der Leistung zu erkennen ist. Beim Luftkraftstoffverhältnis und bei der Zündzeitpunktverstellung ist im Vergleich mit den Vergasermotoren nahezu überhaupt keine Änderung festzustellen.

4.5 Die erforderliche Einspritzmenge

Wenn man die günstigste Einspritzmenge eines Benzineinspritzmotors bei irgend einer beliebigen Venturiöffnung feststellen will, dann genügt es, die Benzineinspritzmenge einzustellen und die Breite (Weite?) zu bestimmen, bei welcher der Motor seine maximale Leistung abgibt, da jedoch in der Praxis die Feineinstellung der Kraftstoffeinspritzmenge ein Problem darstellt, so haben wir unsere Versuche nach folgendem Verfahren durchgeführt:

Zunächst haben wir die Drehzahl des Motors auf ungefähr 500 U/Min. festgelegt, sodann haben wir den Zwischenraum

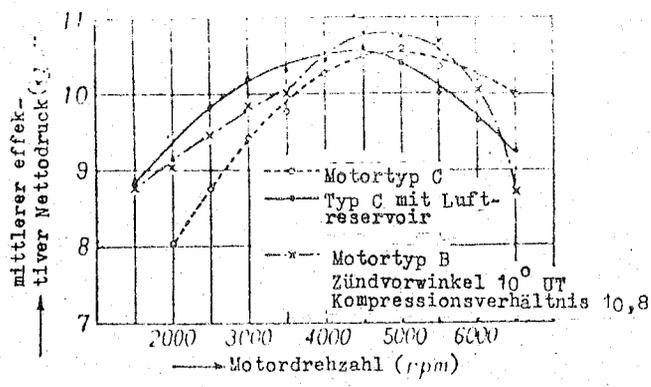


Abb. 15 Der Einfluß eines Luftbehälters auf die Leistung bei vollständig geöffneter Drosselklappe

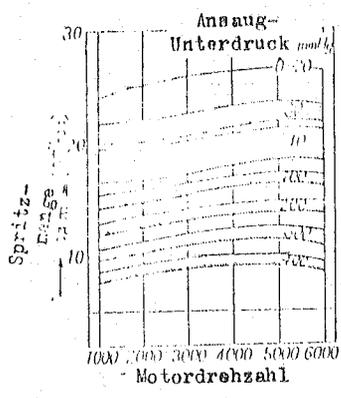
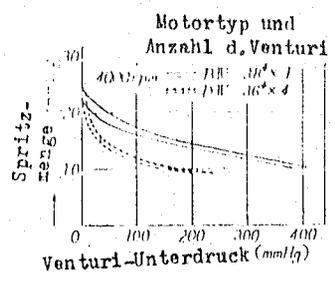


Abb. 16 Die günstigste Einspritzcharakteristik

Abb. 17 Die Charakteristik der erforderlichen Einspritzmenge (Motortyp B)

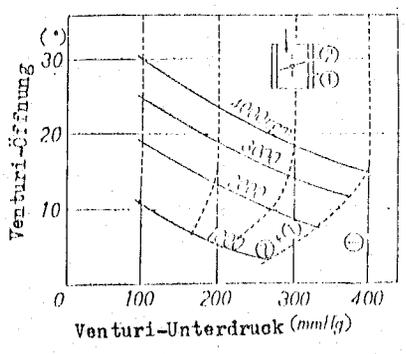


Abb. 18 Die Wirkung einer Venturi-Unterdruckkorrektur-einrichtung

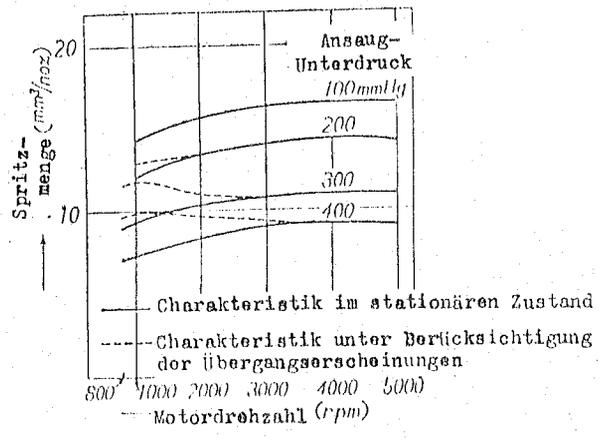


Abb. 19 Der Zusammenhang zwischen der Einspritzpumpencharakteristik und der Drehzahl bei Berücksichtigung der Übergangserscheinungen

von der Kraftstoffeinspritzmenge bei vollständig geöffneter Drosselklappe bis zu der Kraftstoffeinspritzmenge bei Lastlosem Betrieb in 10-15 Teile eingeteilt und dann jeweils die Breite der Luftmenge, bei welcher der Motor seine maximale Leistung abgab, bestimmt (nach einem Steuerverfahren haben wir den Unterdruck bzw. den Winkel abgegriffen). Bei der Einstellung des Zündzeitpunktes genügte es zwar, den Unterdruck des Vakuumvorverstellers für sich allein zu nehmen und durch eine Vakuumpumpe herauszuziehen (?), wenn man jedoch die 3 selbständigen Faktoren, nämlich die Einspritzmenge, die Luftmenge und den Zündzeitpunkt hat, dann erhält man Werte, welche zu groß sind und es gibt viele Fälle, bei denen überhaupt keine Steuerung möglich ist. Wenn man die Sache jedoch von der anderen Seite her ansieht, dann kann man die Vakuumvorverstellung auf verhältnismäßig einfache Weise bestimmen, indem man eine Anzahl (5-6) von Verteilern mit verschiedenen Unterdruckcharakteristiken herstellt und miteinander vergleicht, da ja, wenn man den Fall der vollständig geöffneten Drosselklappe ausschließt, die erforderliche Einspritzmenge als ein unabhängiger Faktor der Luftmenge betrachtet werden kann.

Die Abb.16 zeigt die Breite des Kraftstoffverbrauches, welche man bei einer ganz bestimmten Luftmenge unter fortwährender Aufrechterhaltung des niedrigsten Kraftstoffverbrauches erhalten hat. Die voll ausgezogenen Kurven beziehen sich auf den Motortyp B und die gestrichelten Kurven auf den Motortyp D, die Kurven sind jeweils für 1 Venturi und für 4 Venturi aufgezeichnet worden. Da sich der Unterdruck im Venturi je nach der die Venturiquerschnittsfläche durchströmenden Luftmenge ändert, so ist natürlich der Unter-

druck im Falle von 4 Venturi mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit kleiner.

Die Abb.17 zeigt am Beispiel des Motortyps B unter Zugrundelegung des Venturiunterdruckes als Parameter die Bereiche des niedrigsten Kraftstoffverbrauches, die man für die verschiedenen Drehzahlen erhalten hat. Im Falle einer pneumatischen Regelung haben wir stationär betrachtet den günstigsten Zustand des Motors, wenn die Einspritzmenge bei den einzelnen Unterdruckwerten in diese Bereiche fällt, d.h. also wir erhalten so die Kurven des niedrigsten Kraftstoffverbrauches. Wie jedoch später noch erklärt werden wird, reicht dies allein für einen Kraftfahrzeugmotor noch nicht aus, da hierbei die Übergangserscheinungen des Motors nicht berücksichtigt sind.

5. Die Korrekturen für den Fall der Verwendung des Motors als Kraftfahrzeugmotor

5.1 Die Übergangserscheinungen

Ein Benzineinspritzmotor unterscheidet sich von einem Vergasermotor grundlegend dadurch, daß er keinen Beschleunigungspumpenmechanismus besitzt. Demzufolge ist es außerordentlich schwierig, ausschließlich bei einem im stationären Zustand erhaltenen günstigsten Gemischverhältnis den Übergangserscheinungen zu folgen und ein ausreichendes Gemischverhältnis aufrechtzuerhalten, man braucht also unter allen Umständen irgendwelche Korrektoreinrichtungen. Insbesondere im Falle der pneumatischen Regelung treten, da die Einspritzmenge nach dem Venturiunterdruck geregelt wird, bei den Übergangserscheinungen von den niedrigen Drosselklappenöffnungen mit hohem Unterdruck her, schwierige Probleme auf.

17α

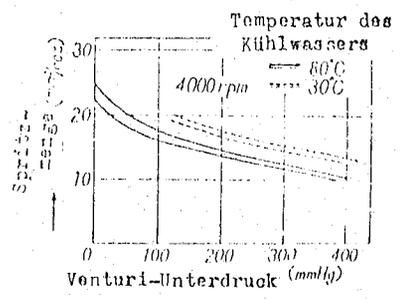


Abb.20 Die Änderung der erforderlichen Charakteristik in Abhängigkeit von der Wassertemperatur-differenz (Motortyp B)

Die Abb.18 zeigt die Meßergebnisse, die man für den Fall der Anwendung einer Korrekturereinrichtung erhalten hat. Diese Korrekturereinrichtung stellt einen Mechanismus dar, welcher gleich beim Beginn der Übergangerscheinung, d.h. also bei den niedrigen Drehzahlen und bei niedriger Last des Motors diesem das notwendige fette Gasgemisch zuführt. In der Strömung vor dem Venturi wird bei vollständig geschlossener Venturidrosselklappe ein Hilfskanal vorgesehen (in der Abb.18 mit ② bezeichnet); dadurch daß man mit einer dem Abgreifen des Unterdruckes in der Strömung nach der Drosselklappe dienenden Öffnung 1 einen Kurzschluß hergestellt hat, erreicht man, daß der abgegriffene Unterdruck korrigiert wird; die strichpunktiierten Linien in dieser Abbildung zeigen den Unterdruck in einem Venturi ohne Hilfskanal, während die gestrichelten Linien den Unterdruck in einem Venturi mit Hilfskanal zeigen. Die jeweiligen Werte des Unterdruckes sind für die verschiedenen Drehzahlen des Motors als Parameter und für die verschiedenen Venturiöffnungsgrade aufgezeichnet worden. Diese Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß diese Einrichtung bei hohem Unterdruck und niedrigen Drehzahlen, als sogenannte Langsamlauf-Leichtlastkorrektur äußerst zweckmäßig und praktisch ist. Die Lage des Hilfskanales 2 entspricht dem Öffnungsgrad des Venturi, je mehr sie in der Richtung der Strömung vor der Drosselklappe verschoben wird, umso kleiner ist der Unterdruck, bis zu welchem sie noch einen Einfluß ausübt.

Die Abb.19 zeigt die Änderung der Einspritzmengencharakteristik für den Fall der Anwendung eines Hilfskanales und für den Fall ohne Hilfskanal. Wir sehen aus dieser Abbil-

dung, daß für eine und dieselbe Luftmenge die Einspritzmenge bei niedriger Drehzahl und geringer Belastung des Motors außerordentlich hoch ist, und daß in der Anfangsperiode der Übergangserscheinung die Korrektur des erforderlichen Kraftstoffes ganz erheblich ist. Für den Leerlauf ist es wünschenswert, eigens einen Leerlaufluftkanal vorzusehen und den Korrekturkanal ② zu schließen.

5.2 Die Kühlwassertemperatur usw.

Auch die Korrekturvorrichtung, welche sich auf die Kühlwassertemperatur, den Luftdruck und die Lufttemperatur beziehen, sind, wenn es sich um einen Motor für Kraftfahrzeuge handelt, außerordentlich wichtige Faktoren. Die Abb. 20 zeigt die günstigsten Einspritzmengen bei den Kühlwassertemperaturen 30°C und 80°C für den Motortyp B. Aus dieser Abbildung ersehen wir, daß man für ein und denselben Venturiunterdruck die Kraftstoffeinspritzmenge um ungefähr 30% steigern muß, um den niedrigsten Kraftstoffverbrauch zu bekommen. Auch mit Bezug auf die Lufttemperatur und den Luftdruck ist eine Korrektur unbedingt erforderlich, da jedoch bei den am meisten vorkommenden Betriebsbedingungen sowohl die Lufttemperatur, wie auch der Luftdruck in einem solchen Bereiche bleiben, daß eine eventuell notwendige Korrektur bei weitem viel kleiner wäre als etwa die Korrektur der Wassertemperatur, so genügt es vollständig, eine Einrichtung vorzusehen, mit Hilfe deren man die Wassertemperatur von Hand korrigieren kann.

6. Schlußwort

Von 5 verschiedenen Einspritzmotorentypen haben wir 2 repräsentative Einspritzsysteme herausgegriffen und für diese

den Einfluß verschiedener grundlegender Faktoren auf die Motorleistung zu klären versucht.

Da man im Falle eines Benzineinspritzmotors im Gegensatz zu dem Vergasermotor bei der Verteilung des Kraftstoffes auf die einzelnen Zylinder und bei der Einstellung der erforderlichen Charakteristik ausschließlich das Kraftstoffeinspritzsystem herausgreifen und auf verhältnismäßig einfache Weise regulieren kann, so ist es leicht, über den gesamten Betriebsbereich des Motors die richtige Charakteristik zu bekommen. Außerdem ist der Gedanke für die Kraftstoffabspernung, für die Wassertemperatur und anderes Korrekturen anzubringen, außerordentlich zweckmäßig auch im Sinne einer Auspuffgasreinigung, die ja schon seit langem das Tagesgespräch bildet. Im Vergleich mit dem Vergasermotor jedoch ist der Mechanismus der Benzineinspritzung reichlich kompliziert und zudem immer noch sehr teuer. Es werden also in absehbarer Zukunft Erfindungen, die sich auf ein einfaches Einspritzsystem beziehen, notwendig sein insbesondere müßte man sich überlegen, wie man die Korrekturvorrichtungen, welche leicht hohe Kosten verursachen können, vereinfachen kann.

Zum Schluß unserer Arbeit wollen wir nicht versäumen, allen Herren, die uns dabei unterstützt haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

Literaturhinweise

- 1) C.H.Fischer: Carburation Spark-Ignition Engines: Fuel Injection Systems, Chapman & Hall.
- 2) Göschel: Die Daimler-Benz-Benzineinspritzung, MTZ, Jahrg.20, Heft. 1. Januar 1959
- 3) Takeshi Oka: Diese Zeitschrift, Bd.2, Hefte v. März, April u. Mai 1963, "Eine experimentelle Untersuchung der Benzineinspritzung in einen Viertakt-Mehrzylindermotor", (die umfangreiche Forschungsarbeit ist im jap.Original beim Übersetzer vorhanden).