

Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung — Weiterentwicklung der Jetronic

Von Hermann Scholl

Robert Bosch GmbH, Technisches Zentrum Autoelektrik, Schwieberdingen bei Stuttgart

Die elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung von Bosch wird seit 1967 im VW 1600 eingebaut. Inzwischen wurde die Anlage in einigen wesentlichen Punkten weiterentwickelt und für eine Reihe von Vier-, Sechs- und Achtzylinder-Motoren hoher spezifischer Leistung ausgelegt. Die Steuerung wurde im Hinblick auf die Abgasentgiftung weiter verfeinert, und sie ermöglicht es, die von 1970 an in den USA geltenden verschärften Abgasbestimmungen einzuhalten.

The Bosch electronically controlled fuel injection system has been fitted to the VW 1600 since 1967. In the meantime, the system has been further developed in certain aspects and has been adapted to a number of 4-, 6- and 8-cylinder engines of high specific power. The system has also been further refined in respect of exhaust emissions, so that the more onerous conditions which will be imposed in the USA from 1970 onwards can be met.

L'injection d'essence à commande électronique développée par la Société Robert Bosch équipe la voiture VW 1600 depuis 1967. Entre temps, l'équipement a été amélioré sur certains points essentiels et prévu pour être monté sur toute une gamme de moteurs à 4, 6 et 8 cylindres de puissance spécifique élevée. La commande et le réglage ont été encore raffinés en ce qui concerne la pollution de l'air par les gaz d'échappement. Il est maintenant possible de répondre aux conditions plus sévères qui seront applicables pour les gaz d'échappement aux Etats Unis à partir de 1970.

1. Einleitung

Die Kraftstoffeinspritzung bei Ottomotoren bietet eine Reihe von Vorteilen, welche sich insbesondere durch höhere Hubraumleistung, geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch und geringeren Gehalt der Abgase an unverbrannten Bestandteilen auswirken [1 bis 6]. Diese Vorteile hängen nur zum kleineren Teil unmittelbar mit dem Einspritzen des Kraftstoffes zusammen. Wesentlicher ist der Umstand, daß eine Einspritzanlage dem Motorkonstrukteur zusätzliche Möglichkeiten und Freiheitsgrade bietet. Sie gestattet eine optimale konstruktive Gestaltung der Ansaugwege des Motors. Weiterhin erlaubt sie, eine Vielzahl von Steuergrößen zu berücksichtigen, die zu einer idealen Anpassung der

Kraftstoffmenge an die vielfältigen Betriebszustände des Motors erforderlich sind. Die elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung [6 bis 13] bietet hinsichtlich der Steuerungsmöglichkeiten besondere Vorteile, da die Elektronik eine beliebig große Anzahl von Steuergrößen an beliebigen Stellen des Fahrzeuges über entsprechende Meßwertaufnehmer erfassen und nach einem beliebigen Programm miteinander verknüpfen kann.

Die von Bosch entwickelte Jetronic-Anlage [6; 12; 13], die in enger Zusammenarbeit mit dem Volkswagenwerk 1967 beim VW 1600 zum Serieneinsatz gebracht wurde, ist eine elektronisch gesteuerte Benzineinspritzanlage, welche in großen Stückzahlen hergestellt wird und die sich in der Praxis sehr gut bewährt hat. Der mit Jetronic ausgerüstete VW 1600 erfüllt die 1968 in den USA in Kraft getretenen Abgasbestimmungen. In der Zwischenzeit wurde die Einspritzanlage nach verschiedenen Richtungen hin weiterentwickelt und verbessert. Sie wurde an eine Reihe von Vierzylinder- und Sechszylinder-Motoren hoher spezifischer Leistung angepaßt. Durch Verfeinerung der Steuerungsmethoden wurde die Emission unverbrannter Abgasbestandteile weiter verringert und das Fahrverhalten verbessert.

2. Prinzip der neuen Jetronic-Anlage

Die Jetronic-Anlage wurde bereits ausführlich beschrieben [12; 13]. Die neue Anlage wird jedoch der Vollständigkeit halber als Ganzes erläutert, wobei die mit der Weiterentwicklung zusammenhängenden Merkmale besonders hervorgehoben werden. Das Prinzip der neuen Anlage ist in *Bild 1* dargestellt.

2.1. Kraftstoffkreislauf

Eine elektrisch angetriebene Kraftstoffpumpe fördert den Kraftstoff und erzeugt den Einspritzdruck. Der Kraftstoff wird aus dem Tank durch ein Filter angesaugt und in die Druckleitung gepreßt. Das Filter kann auch in der Druckleitung angeordnet werden, sofern die Saugseite der Pumpe durch ein kleines Vorfilter vor grobem Schmutz geschützt wird. Am Ende der Druckleitung hält ein Überströmdruckregler hoher Regelgenauigkeit den Kraftstoffdruck unabhängig von der geförderten und abgespritzten Kraftstoffmenge auf 2,0 atü konstant.

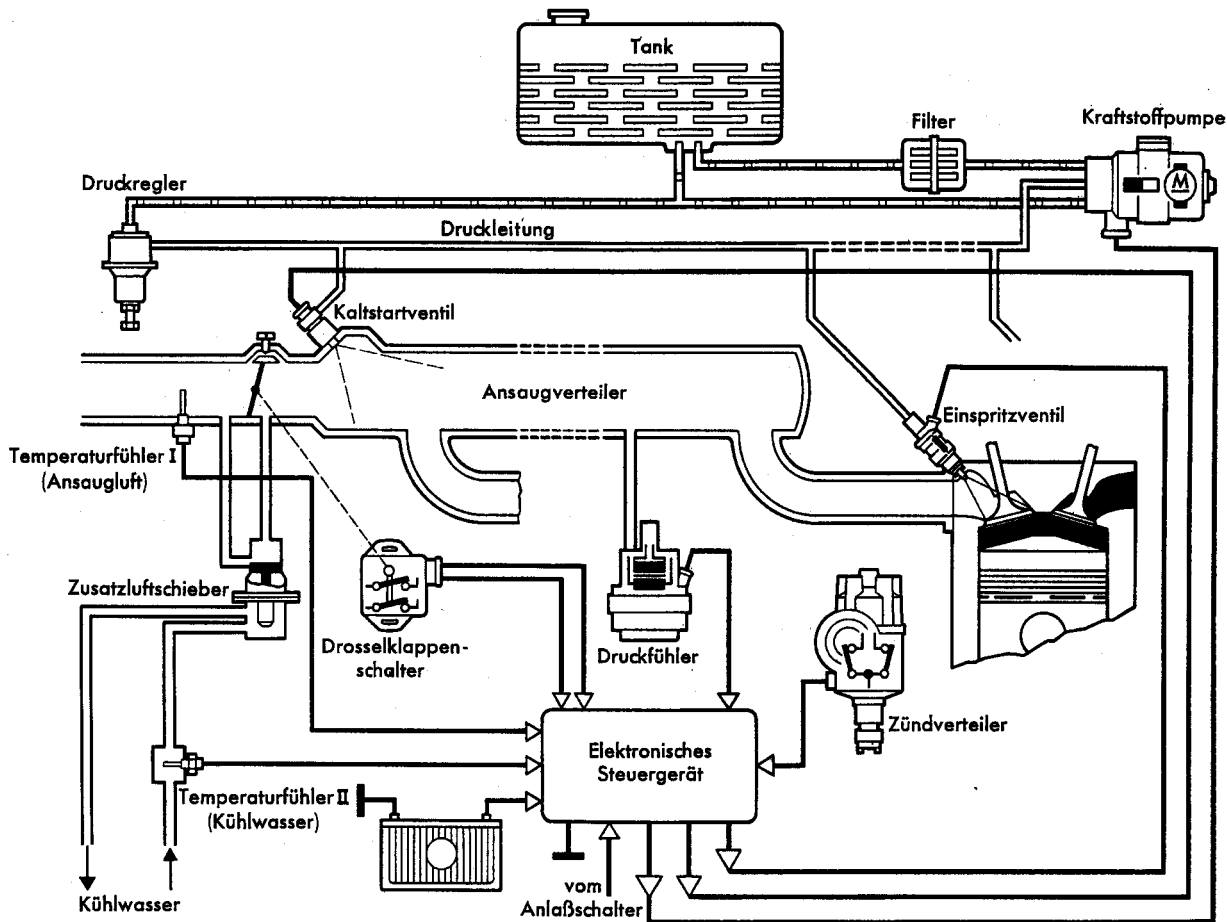


Bild 1: Prinzip der elektronisch gesteuerten Einspritzanlage.

Die Pumpe fördert 20 bis 40 l/h mehr Kraftstoff als der Motor maximal benötigt. Der überschüssige Kraftstoff fließt vom Druckregler durch eine zweite Leitung in den Tank zurück. Eine dritte Leitung führt direkt von der Pumpe zum Tankrücklauf; sie dient der Entlüftung der Pumpe beim Heißstart. Von der Druckleitung führen Abzweigleitungen zu den einzelnen Einspritzventilen.

2.2. Ansaugsystem

Die Ansaugluft gelangt vom Luftfilter (in Bild 1 nicht dargestellt) an einer Drosselklappe großen Durchmessers vorbei in den Ansaugverteiler, von welchem zu jedem Zylinder ein eigenes Saugrohr führt. Form und Volumen des Ansaugvertailers sowie Länge und Durchmesser der Saugrohre haben einen wesentlichen Einfluß auf den Verlauf des Motordrehmoments über der Drehzahl.

Jedem Zylinder ist ein elektromagnetisch betätigtes Einspritzventil zugeordnet. Die Einspritzventile werden je nach Bauart des Motors in das Ansaugrohr oder in den Zylinderkopf eingebaut. Der Kraftstoffstrahl ist auf den Teller des Einlaßventiles gerichtet. Ein Benetzen der Wand des Ansaugkanals durch den Kraftstoffstrahl wird weitgehend vermieden. Zur Wärme- und Geräuschisolation sowie zum Abdichten des Ansaugkanals nach außen werden die Einspritzventile in Gummiringen befestigt.

Um gutes Fahrverhalten und geringe Abgasemission zu erreichen, müssen die Einspritzventile möglichst nahe an den Einlaßventilen angebracht sein. Dies hat jedoch zur Folge, daß der Kraftstoff beim Kaltstart keine ausreichende Gelegenheit zum Vermischen mit der Verbrennungsluft und zum Verdampfen hat, da der Weg bis zum Zylinder sehr kurz ist. Bei Temperaturen unterhalb -25°C ergeben sich deshalb unter Umständen Startschwierigkeiten. Um bei den neuen Jetronic-Anlagen einen einwandfreien Kaltstart bis ungefähr -30°C zu erreichen, wurde ein besonders gut zerstäubendes Magnetventil entwickelt, das beim Kaltstart unmittelbar hinter der Drosselklappe zusätzlichen Kraftstoff in den Ansaugverteiler spritzt. Dadurch wird der zusätzliche Kraftstoff beim Start sehr gut vernebelt und mit der Luft vermischt, und die leicht flüchtigen Anteile verdampfen auf dem Weg über die Ansaugrohre bis zum Zylinder.

2.3. Steuerung der Kraftstoffmenge durch Saugrohrdruck und Drehzahl

In jeden Zylinder wird je Arbeitszyklus einmal Kraftstoff eingespritzt. Zur Verringerung des Aufwandes für die elektronische Steuerung werden jedoch die Einspritzventile in Gruppen zusammengefaßt. Bei Vierzylinder-Motoren sind jeweils zwei, bei Sechszylinder-Motoren jeweils drei Ventile elek-

trisch parallel geschaltet und spritzen somit gleichzeitig, wobei die Ventile innerhalb einer Gruppe zu Zylindern gehören, die in der Zündfolge hintereinander liegen.

Die Einspritzventile werden durch Stromimpulse geöffnet, welche das elektronische Steuergerät liefert. Der Einspritztakt für die beiden Ventilgruppen wird durch zwei im Zündverteiler eingebaute Steuerkontakte bestimmt, die um 180° gegeneinander versetzt jeweils einmal pro Nockenwellenumdrehung geschlossen werden. Diese sogenannte Impulsauslösung markiert den Beginn der Stromimpulse. Die je Arbeitszyklus abgespritzte Kraftstoffmenge wird durch die Dauer der Stromimpulse bestimmt, welche das elektronische Steuergerät aus den Betriebsgrößen des Motors errechnet. Die Betriebsgrößen werden an geeigneten Stellen des Motors durch Meßfühler aufgenommen und dem Steuergerät in Form elektrischer Größen zugeleitet.

Da die Kraftstoffmenge im Takt des Motors zugemessen wird, muß sie der je Hub angesaugten Luftmenge angepaßt werden. Diese ist in erster Näherung dem absoluten Luftdruck im Ansaugrohr proportional und hängt nur in geringem Maße von der Motordrehzahl ab. Es bietet sich daher an, die Einspritzmenge durch den absoluten Saugrohrdruck mit Korrektur durch die Motordrehzahl zu steuern [13], wie dies bei der Jetronic verwirklicht wurde.

In Bild 2 ist das Kennfeld für den Kraftstoffbedarf eines Sechszylinder-Motors je Arbeitshub dargestellt, das auf dem Motorprüfstand ermittelt wurde. Über der Motordrehzahl n wurde mit dem absoluten Saugrohrdruck p_s als Parameter die Dauer t_1 der Stromimpulse aufgetragen, die der erforderlichen Einspritzmenge je Hub proportional ist. Bei Vollast stellt sich kein konstanter, sondern ein mit steigender Motordrehzahl abnehmender Saugrohrdruck ein, wie es die Bezifferung der Vollastkurve zeigt.

Ein Schnitt durch die Kurvenschar bei konstanter Drehzahl läßt erkennen, wie der Kraftstoffbedarf vom Saugrohrdruck abhängt; z. B. muß bei 2000 U/min die Impulsdauer t_1 zwischen 2,4 ms bei 300 Torr und 6,0 ms bei 700 Torr und 7,3 ms bei Vollast variiert werden. Die Saugrohrdrucksteuerung im elektronischen Steuergerät bildet diese Abhängigkeit mit großer Genauigkeit nach, und ihr ist eine Drehzahlsteuerung überlagert, die entsprechend dem Kurvenverlauf die Impulsdauer zwischen 1000 und 5000 U/min verlängert und oberhalb von 5000 U/min wieder verringert.

Der absolute Saugrohrdruck steuert die Impulsdauer über den Druckfühler, dessen Induktivität über evakuierte Membrandosen durch den Saugrohrdruck verändert wird. Die Induktivität bildet zusammen mit einer monostabilen Kippstufe des Steuergerätes den Hauptsteuerkreis. Die Kippstufe

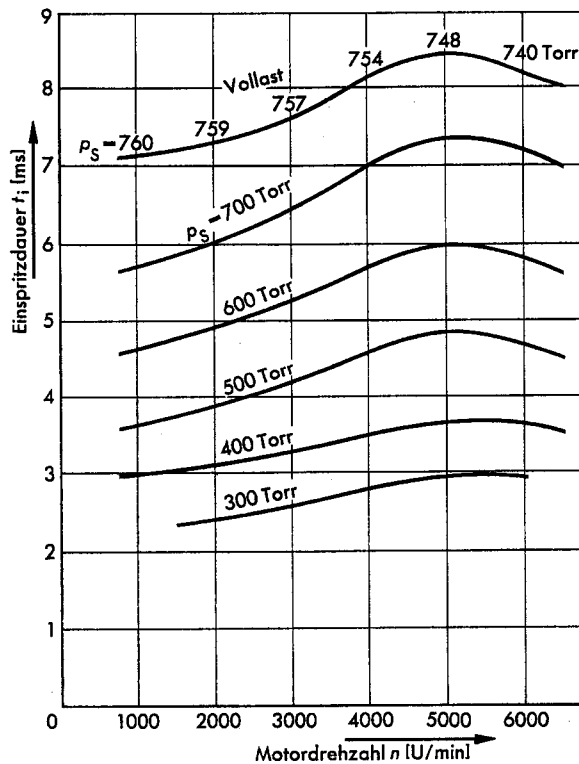


Bild 2: Mengenkennefeld eines Sechszylinder-Motors. Einspritzdauer t_1 in Funktion von Drehzahl n und absolutem Saugrohrdruck p_s .

wird zweimal je Nockenwellenumdrehung durch die vom Zündverteiler erzeugten Auslöseimpulse in die Stellung „ein“ gebracht. Damit wird gleichzeitig für eine der beiden Ventilgruppen der Strom eingeschaltet. Die monostabile Kippstufe schaltet nach einer bestimmten Zeit, die im wesentlichen von der Induktivität der Druckfühlerspule abhängt, selbsttätig wieder in Stellung „aus“, wodurch der Ventilstrom wieder abgeschaltet wird.

Für die Motordrehzahl ist keine eigene Eingabe in das Steuergerät erforderlich, da sie innerhalb der Steuerelektronik in Form des zeitlichen Abstandes der aufeinanderfolgenden Auslöseimpulse des Zündverteilers bereits vorliegt. Für den Drehzahleinfluß wird aus dem Impulsabstand eine von der Drehzahl abhängige Steuerspannung gebildet. Diese Steuerspannung beeinflusst die Einschaltdauer der monostabilen Kippstufe entsprechend dem vom Kennfeld geforderten Verlauf.

2.4. Kaltstart- und Warmlaufautomatik

Beim Kaltstart und in der anschließenden Warmlaufphase benötigt der Motor ein stark angereichertes Gemisch. Während des eigentlichen Startvorganges wird diese Anreicherung im wesentlichen durch das Kaltstartventil bewirkt, welches je nach Motorgröße eine Kraftstoffmenge von 100 bis 200 cm^3/min abspritzt, solange der Anlaßschalter betätigt wird. Ein Temperaturschalter mit einem Schalterpunkt — je nach Motortyp — zwischen 0 und $+15^\circ\text{C}$ bewirkt, daß das Kaltstartventil nur

bei Kühlwassertemperaturen unterhalb der Schalttemperatur betätigt wird. Als Thermoschalter steht wahlweise eine elektronische oder eine mechanische Ausführung zur Verfügung. Der elektronische Thermoschalter ist Teil des elektronischen Steuergerätes und wird durch den Kühlwasser-Temperaturfühler angesteuert. Der mechanische Bimetall-Thermoschalter, welcher eine zusätzliche Einbaustelle am Motor benötigt, ist elektrisch direkt in die zum Kaltstartventil führende Steuerleitung eingeschaltet.

Bei Motoren, die bei reichem Startgemisch zu einem Benetzen der Zündkerzen neigen, ist es vorteilhaft, den Thermoschalter durch einen Thermostzeitschalter zu ersetzen, der ebenfalls als elektronischer oder als mechanischer Schalter ausgeführt wird. Er bewirkt eine zeitliche Begrenzung der Einschaltdauer des Kaltstartventils. Der Schalter ist so dimensioniert, daß die Einschaltdauer bei einer Kühlwassertemperatur von -20°C je nach Motortyp zwischen 5 und 20 s beträgt, mit steigender Kühlwassertemperatur abnimmt und bei $+20^{\circ}\text{C}$ bis $+40^{\circ}\text{C}$ den Wert Null erreicht.

Der sich an den Kaltstart anschließende Betrieb des Motors bis zum Erreichen des betriebswarmen Zustandes wird als Warmlaufphase bezeichnet. Während dieses Betriebszustandes benötigt der Motor eine beträchtliche Warmlaufenreicherung. Unmittelbar nach einem Start bei -20°C muß je nach Motortyp zwei- bis dreimal soviel Kraftstoff wie im betriebswarmen Zustand eingespritzt werden. Die Anreicherung wird während der Warmlaufphase mit steigender Motortemperatur stetig abgeregelt und verschwindet bei Erreichen der Betriebstemperatur. Die Warmlaufmenge wird auch während des Anlassens eingespritzt. Bei tiefen Temperaturen kommt sie zu der vom Kaltstartventil abgespritzten Menge noch hinzu. Oberhalb der Schalttemperatur des Thermoschalters wirkt sie während des Anlassens als Startanreicherung.

Die Anreicherung wird über Temperaturfühler gesteuert, die die Einschaltdauer der monostabilen Kippstufe temperaturabhängig vergrößern. Die Temperatur muß am Motor an einer Stelle abgefühlt werden, welche die für die Kraftstoffaufbereitung und die Verbrennungsvorgänge maßgeblichen Temperaturen möglichst gut repräsentiert. Bei der in *Bild 1* dargestellten Einspritzanlage eines wassergekühlten Motors wird die Warmlaufenreicherung durch den im Kühlwasser angebrachten Temperaturfühler gesteuert. Bei luftgekühlten Motoren erfolgt die Steuerung durch einen Fühler am Zylinderkopf.

Beim Kaltstart und beim anschließenden Warmlauf wird neben einem reicheren Kraftstoff-Luft-Gemisch auch eine größere Luftmenge im Leerlauf benötigt. Die zusätzliche Luftmenge ist einmal er-

forderlich, um die Leerlaufdrehzahl zu erhöhen, damit ein einwandfreier Rundlauf erreicht wird. Außerdem muß der noch kalte Motor im Leerlauf zur Überwindung der stark erhöhten Reibung eine wesentlich höhere Leistung erzeugen. Die Zusatzluft wird durch ein die Drosselklappe umgehendes Bypassventil, den sogenannten Zusatzluftschieber, gesteuert. Dieser besteht aus einem Ventil, dessen Öffnungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Motortemperatur oder der Temperatur einer elektrischen Heizwendel über eine Bimetallspirale oder ein Dehnstoffelement verändert wird.

2.5. Zusätzliche Steuerungen und Korrekturen

Für den Teillastbetrieb des Motors wird der Kraftstoff so bemessen, daß der spezifische Kraftstoffverbrauch und der Anteil unverbrannter Abgasbestandteile möglichst nieder sind. Bei Vollast dagegen wird die Kraftstoffmenge nach dem Gesichtspunkt maximaler Motorleistung festgelegt. Wie aus *Bild 2* hervorgeht, steigt daher die Impulsdauer zwischen der 700-Torr-Kurve und der Vollastkurve, bezogen auf die Saugrohrdruckzunahme, stärker an als bei Teillast. Diese vom Kennfeld geforderte starke Zunahme der Einspritzmenge bei Vollast wird als Vollastanreicherung bezeichnet. Sie könnte grundsätzlich durch eine entsprechend steil verlaufende Abhängigkeit der Induktivität des Druckfühlers vom Saugrohrdruck zwischen 700 Torr und 760 Torr erreicht werden. Dieses Verfahren hätte jedoch den Nachteil, daß beim Betrieb des Fahrzeuges in großen Höhen, in denen der atmosphärische Druck Werte über 700 Torr gar nicht erreicht, keine Vollastanreicherung wirksam würde.

Dieser Nachteil wird vermieden, wenn die Vollastanreicherung nicht vom absoluten Saugrohrdruck, sondern vom Saugrohrunterdruck, d. h. vom Differenzdruck zwischen Saugrohrdruck und Atmosphärendruck, gesteuert wird. Bei der bisherigen Jetronic-Anlage wird die Anreicherung durch einen Druckschalter gesteuert, auf den der Unterdruck im Saugrohr einwirkt. Fällt der Unterdruck im Ansaugrohr beim Öffnen der Drosselklappe unter etwa 50 Torr, so wird ein Kontakt im Druckschalter geschlossen, wodurch die Einschaltdauer der monostabilen Kippstufe im Steuergerät vergrößert wird. Bei der neuen Jetronic-Anlage ist diese Funktion im Druckfühler mit enthalten (Abschnitt 3.3.), ohne den oben genannten Nachteil aufzuweisen.

Das Gewicht der vom Motor je Hub angesaugten Luftmenge, der die entsprechende Kraftstoffmenge zugeordnet werden soll, hängt nicht nur vom Saugrohrdruck und von der Motordrehzahl, sondern auch von der Temperatur der Ansaugluft ab. Bei niedrigen Außentemperaturen ist das angesaugte Luftgewicht höher, so daß das Kraftstoff-Luft-Gemisch hierbei magerer wird, falls die Steuerung die Lufttemperatur nicht berücksichtigt. Ab-

gasentgiftete Motoren, die bereits bei einer Temperatur von $+20^{\circ}\text{C}$ eine verhältnismäßig magere Gemischeinstellung haben, zeigen unter Umständen bei Außentemperaturen zwischen 0 und -20°C bereits Aussetzer im Teillastbereich. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wird in das Saugrohr oder in das Luftfilter ein Temperaturfühler eingebaut (*Bild 1*), der mit abnehmender Lufttemperatur eine Zunahme der Einspritzmenge um 1 bis 3 Prozent je 10°C bewirkt.

Um Kraftstoff zu sparen und um die Emission unverbrannter Abgasbestandteile bei einem vorgegebenen Fahrzyklus zu verringern, wird im Schiebetransfer die Kraftstoffzufuhr vollständig abgesperrt. Das Steuergerät liefert in diesem Betriebszustand, welcher durch einen Schalter an der Drosselklappe signalisiert wird, keine Stromimpulse an die Einspritzventile. Damit der Motor jedoch beim Auskuppeln nicht stehen bleibt, wird die Absperrung bei Motordrehzahlen zwischen 1000 und 1500 U/min wieder aufgehoben. Der hierfür erforderliche Drehzahlschalter ist elektronisch ausgeführt und im Steuergerät enthalten.

Um die Vorteile der Kraftstoffabspernung in einem weiten Bereich auszunützen, ist es wünschenswert, die Schaltdrehzahl möglichst tief zu legen. Dem würde bei nicht betriebswarmem Motor entgegenstehen, daß der Motor unter Umständen stehen bleibt. Bei den neuen Jetronic-Anlagen wird diese Schwierigkeit dadurch überwunden, daß die Schaltdrehzahl von der Temperatur des Kühlwassers abhängt. Sie liegt bei Kühlwassertemperaturen unter 0°C bei etwa 1500 U/min und verschiebt sich mit zunehmender Kühlwassertemperatur auf etwa 1000 U/min.

Bei den neuen Jetronic-Anlagen dient der Drosselklappenschalter zusätzlich als Signalgeber für eine von der Drosselklappenbewegung gesteuerte Beschleunigungsanreicherung. Zu diesem Zweck sind die neuen Drosselklappenschalter mit einem zusätzlichen Kontaktsatz ausgerüstet, der beim Öffnen der Drosselklappe eine Folge von Spannungsimpulsen an das Steuergerät liefert. Diese Spannungsimpulse bewirken das Einspritzen zusätzlicher Kraftstoffmengen während des Öffnens der Drosselklappe. Die Zusatzmengen sind sehr gering und wirken sich auf den Kraftstoffverbrauch kaum aus.

Im Gegensatz zum Vergaser ist für eine Einspritzanlage eine Beschleunigungsanreicherung nicht unbedingt erforderlich. Sie bringt jedoch eine Reihe von Vorteilen mit sich. Zum einen überbrückt sie die zwar sehr kleine, aber doch vorhandene Ansprechverzögerung des pneumatisch angesteuerten Druckfühlers, so daß der Motor jeder Gaspedalbewegung völlig verzögerungsfrei folgt. Weiterhin ermöglicht die Beschleunigungsanreicherung eine noch magere Gemischeinstellung im Teillast-

bereich ohne die Gefahr von Zündaussetzern beim Beschleunigen, wodurch eine weitere Absenkung der Kohlenwasserstoffemission erzielt wird. Schließlich kommt man bei einer Einspritzanlage mit Beschleunigungsanreicherung mit einer geringeren Gemischanreicherung bei kaltem Motor aus, wodurch die Emission unverbrannter Abgasbestandteile und die Gefahr eines Verrußens der Zündkerzen herabgesetzt werden.

Die Anzugs- und die Abfallzeit des elektromagnetischen Einspritzventiles hängen von der Betriebsspannung ab. Mit zunehmender Betriebsspannung nimmt die Anzugszeit ab und die Abfallzeit zu, so daß bei gleicher Dauer des Stromimpulses das Einspritzventil länger geöffnet ist und somit eine größere Kraftstoffmenge abspritzt. Da eine Stabilisierung der Versorgungsspannung sehr aufwendig wäre, wird der Einfluß der Spannung auf die Einspritzmenge durch eine gegenläufige Abhängigkeit der Impulsdauer von der Spannung im elektronischen Steuergerät kompensiert.

Die Kraftstoffpumpe wird nicht über den Zündschalter, sondern durch die Pumpensteuerung im elektronischen Steuergerät eingeschaltet. Die Pumpensteuerung verhindert einen Betrieb der Pumpe bei eingeschalteter Zündung, solange der Motor steht. Dadurch wird im Falle eines infolge von Verunreinigungen nicht ganz dicht schließenden Einspritzventils ein Eindringen von Kraftstoff in den betreffenden Zylinder vermieden.

3. Aufbau und Wirkungsweise der einzelnen Aggregate

Die Aggregate der bisherigen Jetronic-Anlage wurden bereits ausführlich beschrieben [12]. Im folgenden wird auf die bei den neuen Jetronic-Anlagen unverändert übernommenen Aggregate nur kurz eingegangen, während Änderungen an einigen Aggregaten und neu hinzugekommene Aggregate ausführlicher erläutert werden. Die *Bilder 3* und *4* zeigen die Aggregate einer typischen Sechszylinder-Anlage.

3.1. Elektronisches Steuergerät

Das elektronische Steuergerät ist in der konventionellen Technik gedruckter Schaltungen aufgebaut. Es enthält je nach Ausführung 250 bis 300 Bauelemente, davon etwa 30 Transistoren und 40 Dioden. Die Hauptleiterplatte umfaßt diejenigen Schaltungsteile, welche vom jeweiligen Motortyp unabhängig sind und die sich allenfalls durch verschiedene Abgleichwiderstände unterscheiden. Eine kleine Zusatzplatte enthält die auf den Motor speziell zugeschnittenen Schaltkreise.

Bild 3 zeigt das Steuergerät mit abgenommenem Deckel, geschnittener Zusatzplatte und teilweise geschnittenen Kühlrippen. Die beiden Leistungstransistoren der Endstufen und eine Leistungsdiode

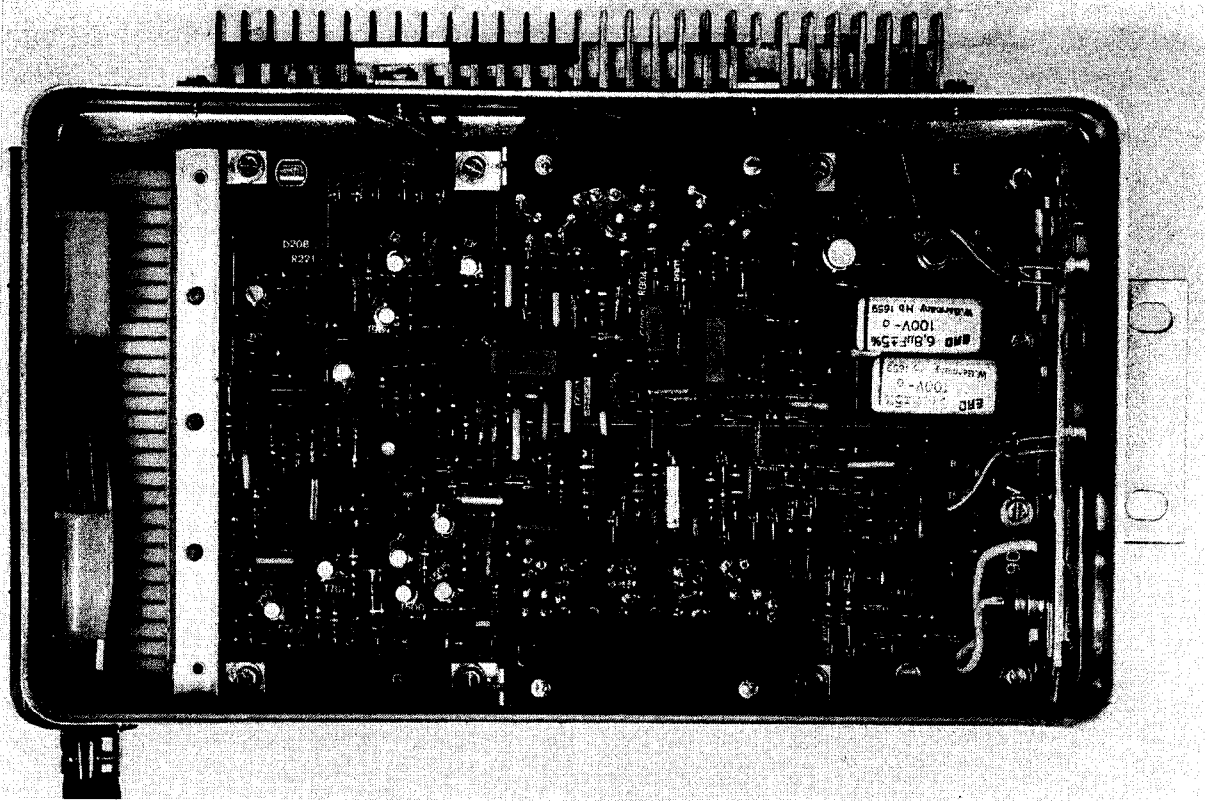


Bild 3: Elektronisches Steuergerät.
Ansicht bei abgehobenem Deckel, geschnittener Zusatzplatte und teilweise geschnittenem Kühlkörper.

sind auf einem vertikal angeordneten Kühlwinkel montiert. Der teilweise geschnittene Kühlkörper enthält Hochleistungswiderstände, die mit den Einspritzventilen in Reihe geschaltet sind, um einen schnelleren Stromanstieg zu erzielen. Der Kabel-

baum, der das Steuergerät mit den übrigen elektrischen Aggregaten verbindet, endet in einem 25poligen Vielfachstecker, der auf ein mit der Leiterplatte fest verbundenes Gegenstück gesteckt wird. Nach Lösen einer Zugentlastungsschelle kann ein Kunst-

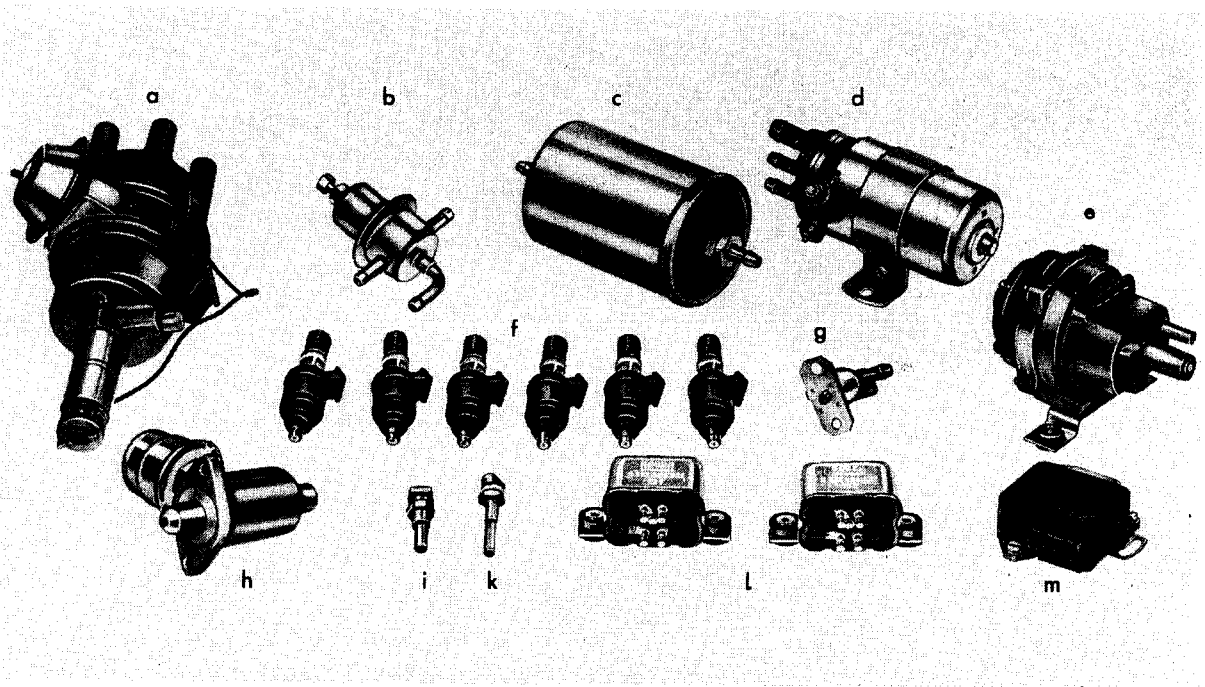


Bild 4: Aggregate der elektronischen Einspritzanlage.

a = Zündverteiler mit Impulsauslösung; b = Druckregler; c = Benzinfilter; d = Kraftstoffpumpe; e = Druckfühler; f = Einspritzventile; g = Kaltstartventil; h = Zusatzluftschieber; i = Temperaturfühler II (Kühlwasser); k = Temperaturfühler I (Ansaugluft); l = Relais für Stromversorgung und Kraftstoffpumpe; m = Drosselklappenschalter.

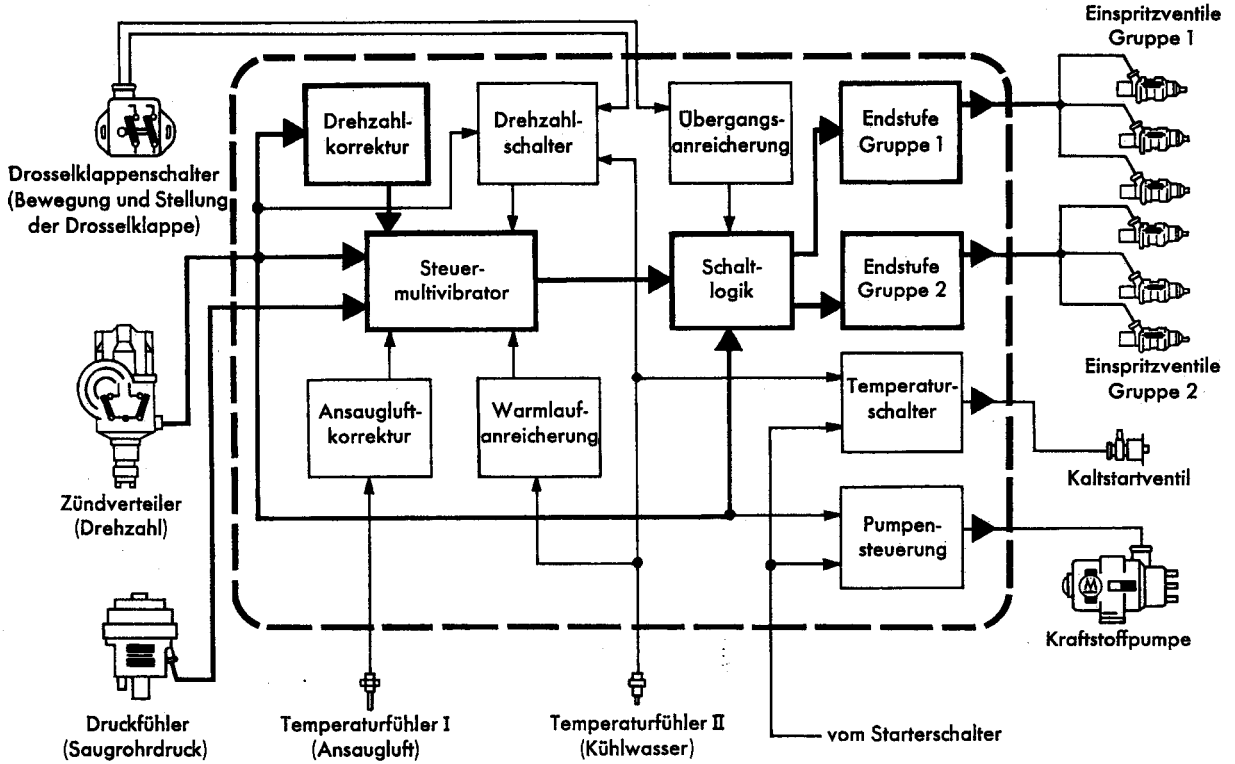


Bild 5: Blockschaltbild der elektronischen Steuerung.

stoffschieber, der eine Seitenwand des Steuergerätes bildet, abgezogen werden.

Bild 5 zeigt das Blockschaltbild des Steuergerätes und die mit ihm verbundenen elektromechanischen Aggregate. Die Schaltungsteile der Hauptsteuerung und deren Verbindungen sind verstärkt gezeichnet. Die Auslöseimpulse der im Zündverteiler angeordneten Auslösekontakte gelangen zum Steuermultivibrator und bringen diesen in Stellung „ein“. Sie gelangen weiterhin zur Drehzahlkorrektur, welche ihrerseits die Einschaltdauer des Steuermultivibrators beeinflusst. Schließlich steuern die Auslöseimpulse noch die Schaltlogik an, eine bistabile Stufe, welche die vom Steuermultivibrator erzeugten Steuerimpulse entweder zur einen oder zur anderen Endstufe weiterleitet, wodurch jeweils im Wechsel die Ventilgruppen 1 und 2 erregt werden. Die Dauer der vom Steuermultivibrator erzeugten Impulse hängt im wesentlichen von der Induktivität des Druckfühlers ab; weiterhin wird sie vom Temperaturfühler I über ein Widerstandsnetzwerk beeinflusst, um die Temperatur der Ansaugluft zu berücksichtigen.

Der Drehzahl-schalter zur Kraftstoffabspernung erhält die Drehzahlinformation von der Impulsauslösung im Zündverteiler. Die Leerlaufstellung der Drosselklappe wird durch den Leerlaufkontakt des Drosselklappenschalters signalisiert. Die Temperaturabhängigkeit der Schaltdrehzahl wird durch den Temperaturfühler II (Kühlwasser) gesteuert. Der Drehzahl-schalter unterdrückt die vom Steuermultivibrator erzeugten Impulse bei geschlossener

Drosselklappe, sofern die Motordrehzahl oberhalb der Schaltdrehzahl liegt.

Der zweite Kontaktsatz im Drosselklappenschalter liefert beim Öffnen der Drosselklappe Auslöseimpulse an die Übergangs-anreicherung, welche Steuerimpulse von 2 bis 3 ms Dauer erzeugt. Diese zusätzlichen Steuerimpulse gelangen über die Schaltlogik je nach Stellung dieser bistabilen Schaltstufe über eine der beiden Endstufen auf eine der beiden Ventilgruppen.

Die Pumpensteuerung schaltet die Kraftstoffpumpe ein, wenn entweder während des Anlassens vom Starterschalter ein Signal kommt oder wenn die Motordrehzahl oberhalb einer Grenzdrehzahl von 100 bis 300 U/min liegt. Die Drehzahlinformation wird durch eine Integrierschaltung aus den Auslöseimpulsen des Zündvertailers gewonnen.

Das Kaltstartventil wird erregt, wenn beim Anlassen ein Signal vom Starterschalter vorliegt und wenn gleichzeitig die Temperatur des Kühlwassers unterhalb der Schalttemperatur des Temperaturschalters liegt. Der Temperaturschalter kann durch einen Thermozeitschalter ersetzt werden. Dieser besteht aus einem elektronischen Zeitglied, das zu Beginn des Startvorgangs durch das Signal vom Starterschalter in Stellung „ein“ gebracht wird und dessen Einschaltdauer durch den Temperaturfühler II gesteuert wird.

Der Temperaturfühler II (Kühlwasser) bewirkt über die Warmlaufenanreicherung, ein Widerstands- und Diodennetzwerk, eine temperaturabhängige Ver-

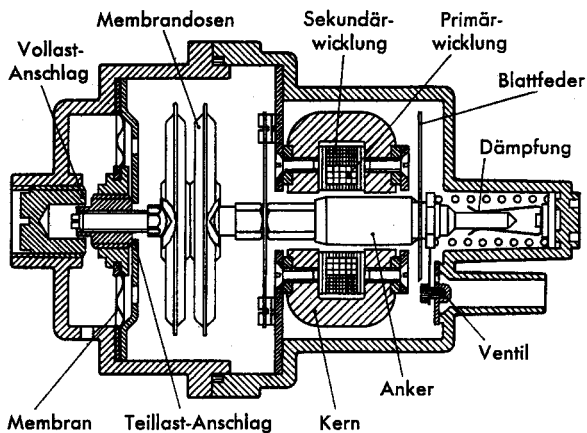


Bild 6: Druckfühler mit Vollast-Anreicherung.

größerung der Dauer der Impulse des Steuermultivibrators.

3.2. Impulsauslösung im Zündverteiler

Die Impulsauslösung besteht aus zwei Kontakten, welche im unteren Teil des Zündverteilergehäuses eingebaut sind. Die Kontakte werden durch einen einhöckerigen Nocken auf der Verteilerwelle pro Nockenwellenumdrehung je einmal betätigt. Material und Strombelastung der Kontakte sind so gewählt, daß ein wartungsfreier Betrieb über die gesamte Lebensdauer des Zündverteilers gewährleistet ist. Die Bauhöhe des Zündverteilers wird durch die Impulsauslösung um nur etwa 5 bis 10 mm vergrößert.

3.3. Druckfühler

Der in *Bild 6* schematisch dargestellte Druckfühler enthält evakuierte Membrandosen, welche den Anker einer Spule verschieben, wodurch die Induktivität der als Transformator geschalteten Spule verändert wird. Die Spule dient als zeitbestimmendes Glied des monostabilen Steuermultivibrators im elektronischen Steuergerät, das die Dauer der Stromimpulse bestimmt. Der Saugrohrdruck wird somit kontaktlos, ohne den Umweg über ein Trägerfrequenz-System, unmittelbar in die entsprechende Impulsdauer umgewandelt. Das Meßsystem ist in einem dichten Druckgußgehäuse eingebaut, das über eine Schlauchleitung mit dem Ansaugrohr des Motors verbunden ist. Der Druckfühler der neuen Jetronic-Anlage enthält eine zusätzliche Metallmembran, welche das (im Bild) linke Lager der Membrandosen abhängig vom Unterdruck verschiebt.

Die Spule wird von einem Eisenkreis in Form eines Doppel-U umschlossen, der zwei Bohrungen für den verschiebbaren Anker aufweist. Der Anker ist in zwei Blattfedern reibungsfrei gelagert. Sein magnetisch wirksamer Teil besteht aus einem Zylinder, der an einem Ende mit einem kleinen Konus versehen ist. Der eine Luftspalt des Eisenkreises

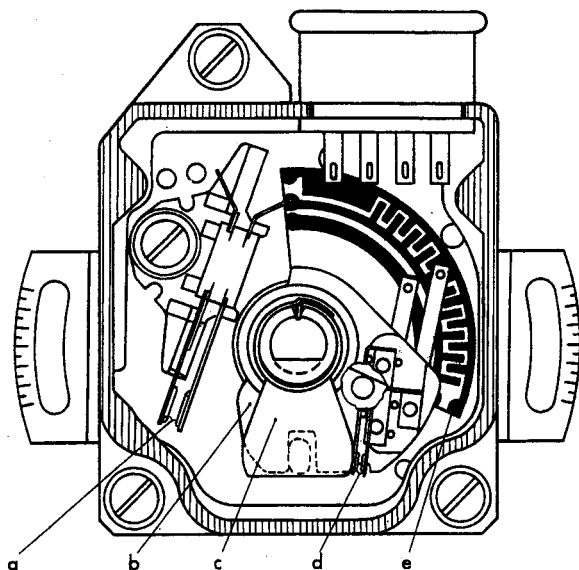


Bild 7: Drosselklappenschalter.

a = Leerlaufkontakte; b = Kontaktträgerplatte; c = Hebel; d = Schleppschalterkontakte; e = Kontaktplatte.

(rechts im Bild) ist konstant; der andere ändert sich, wenn der Anker mit seinem Konus mehr oder weniger weit in die linke Bohrung des Kernes eintaucht.

Die Kammer, welche durch die Metallmembran und den Gehäuseboden gebildet wird, ist durch eine Bohrung mit der Atmosphäre verbunden; im übrigen Druckfühlergehäuse herrscht der Saugrohrdruck des Motors. Im Teillastbereich liegt die Membran infolge des hohen Unterdruckes unter Überwindung der Vorspannung der Schraubenfeder (rechts im Bild) am Teillastanschlag an. Mit zunehmender Last, d. h. mit zunehmendem Absolutdruck im Saugrohr, werden die Membrandosen zusammengedrückt, der Steuerkonus des Ankers taucht weiter in den Kern ein, wodurch die Induktivität vergrößert, die Impulsdauer verlängert und damit die Einspritzmenge erhöht wird. Beim Übergang zur Vollast, wenn der Unterdruck kleiner als 100 Torr wird, überwiegt die Vorspannung der Schraubenfeder, die Membran bewegt sich nach links und liegt bei etwa 50 Torr am Vollastanschlag an. Diese Bewegung wird der Längenänderung der Membrandosen überlagert und bewirkt eine zusätzliche Verstellung des Ankers in Richtung einer Vergrößerung der Impulsdauer.

Um eine Schwingungsanregung des Meßsystems durch den pulsierenden Druck im Ansaugrohr des Motors zu verhindern, ist am Anschlußstutzen für den Druckschlauch eine Drosselbohrung kleinen Querschnitts zur Dämpfung angebracht. Damit trotzdem der Motor beim raschen Öffnen der Drosselklappe schnell anspricht, wird bei raschem Ansteigen des Saugrohrdruckes ein Ventil großen Querschnittes selbsttätig geöffnet.

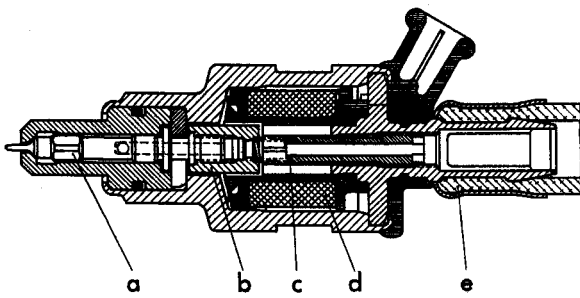


Bild 8: Einspritzventil.

a = Düsennadel; b = Magnetanker; c = Schraubenfeder; d = Magnetwicklung; e = Kraftstoffzuleitung.

3.4. Drosselklappenschalter

Bild 7 zeigt den Drosselklappenschalter in der Draufsicht bei geschnittenem Deckel. Die den Leerlaufschalter bildenden Kontakte a werden durch den mit der Drosselklappenwelle starr verbundenen Hebel c bei geschlossener Drosselklappe betätigt. Die Platte b ist zur Nabe des Hebels c konzentrisch angeordnet. Eine Wellfeder zwischen der Platte und dem Gehäuseboden sorgt für eine definierte Reibung gegenüber dem Gehäuse. Beim Öffnen der Drosselklappe (im Bild entgegen dem Uhrzeigersinn) wird die Platte b durch die Reibung zunächst festgehalten, der Hebel c bewegt sich gegen den Kontaktsatz d des Schleppschalters und schließt diesen. Nach einem kleinen Überlaufweg für den Kontaktsatz nimmt ein gestrichelt gezeichneter Mitnehmer des Hebels c die Platte b mit. Dadurch gleiten die beiden mit der Platte b fest verbundenen Schleifer auf der Kontaktplatte e. Bei geschlossenem Kontaktsatz d werden die Zähne der beiden Kontaktkämme im Wechsel elektrisch mit der durchgehenden Schleifbahn verbunden. Das Umschalten von einem Kamm zum anderen hat gegenüber einem einfachen Ein- und Ausschalten den Vorteil, daß bei unsicherer Kontaktgabe oder einem Prellen der Kontakte keine zusätzlichen Anreicherungsimpulse im Steuergerät ausgelöst werden.

3.5. Temperaturfühler

Die Temperaturfühler bestehen aus stark temperaturabhängigen Widerständen (NTC-Widerstände), die in hohle Gewindebolzen mit Kunststoff eingespritzt sind. Bild 4 zeigt zwei verschiedene Ausführungen von Temperaturfühlern.

3.6. Einspritzventil

Das Einspritzventil ist in Bild 8 im Schnitt dargestellt. Es besteht im wesentlichen aus einem Ventilkörper und der Düsennadel mit aufgesetztem Magnetanker. Der Ventilkörper enthält rechts die Magnetwicklung und links die Führung für die Düsennadel. Ist die Magnetwicklung stromlos, so wird die Düsennadel durch eine Schraubenfeder auf ihren Dichtsitz gedrückt, der sich am linken Ende des Ventils befindet. Wird der Magnet erregt, so

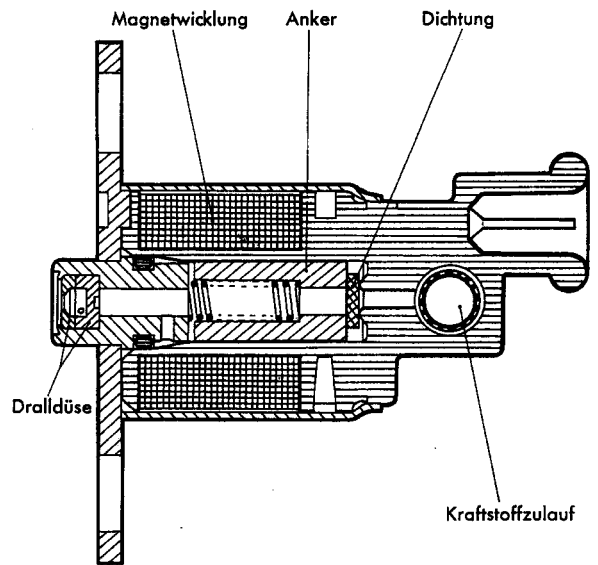


Bild 9: Kaltstartventil.

wird die Düsennadel um etwa 0,15 mm von ihrem Sitz abgehoben, und der Kraftstoff kann durch einen kalibrierten Ringspalt austreten. Das vordere Ende der Düsennadel enthält zur Zerstäubung des Kraftstoffes einen Spritzzapfen mit Anschliff. Anzugs- und Abfallzeit des Ventils liegen bei etwa 1 ms.

3.7. Kaltstartventil

An das Kaltstartventil werden keine hohen Anforderungen hinsichtlich der Anzugs- und Abfallzeit gestellt. Dafür wird auf eine extrem feine Zerstäubung des Kraftstoffes größter Wert gelegt. Es wurde daher ein für diese Zwecke besonders geeignetes Magnetventil entwickelt, das in Bild 9 im Schnitt dargestellt ist. Der bewegliche Anker des Magnetkreises wird im Ruhezustand durch die Schraubenfeder mit der Dichtung gegen den Ventilsitz gedrückt und sperrt diesen ab. Bei angezogenem Anker wird der Ventilsitz freigegeben. Der Kraftstoff strömt seitlich an dem angeflachten Anker vorbei und gelangt durch eine Quer- und eine Längsbohrung des als Düsenhalter ausgebildeten Teils des Magnetkreises zur Dralldüse. In der Dralldüse wird der Kraftstoff durch zwei tangentielle Einlaufbohrungen in Rotation versetzt und verläßt die Düse fein zerstäubt auf dem Mantel eines Kegels von etwa $\pm 45^\circ$.

3.8. Zusatzluftschieber

Der Zusatzluftschieber beim VW 1600 ist als Drehschieber ausgeführt, der durch eine Bimetallspirale betätigt wird, die mit dem Motoröl im Kurbelgehäuse in Verbindung steht. Für wassergekühlte Motoren wurde ein neuer Zusatzluftschieber entwickelt, welcher in Bild 10 im Schnitt dargestellt ist. Ein wachgefülltes Ausdehnungselement verschiebt mit steigender Kühlwassertemperatur einen Steuerkolben in einer Laufbüchse gegen eine starke Rückstellfeder. Das Steuerfenster am Lufteintritt

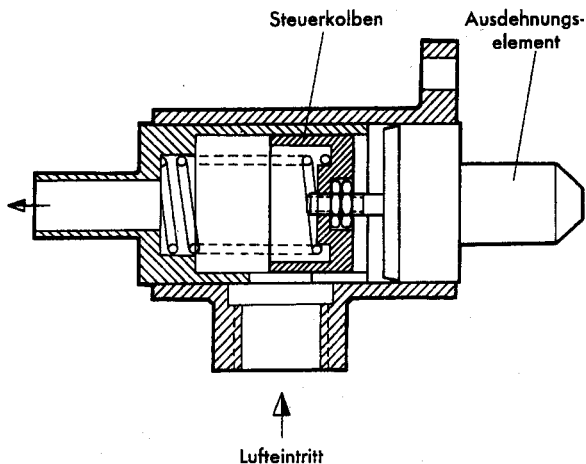


Bild 10: Zusatzluftschieber.

wird mit steigender Temperatur verkleinert und ist bei 60 bis 70°C Kühlwassertemperatur ganz geschlossen. Durch eine entsprechende Form des Steuerfensters wird der Öffnungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Temperatur so gewählt, daß sich bei jeder Starttemperatur die gewünschte Leerlaufdrehzahl einstellt.

Der Zusatzluftschieber kann an den Zylinderkopf oder an den Wasseraustrittsstutzen des Kühlwasserkreislaufes angeflanscht werden, wobei das Ausdehnungselement vom Kühlwasser umströmt wird. Bei Anbauschwierigkeiten am Motor besteht die Möglichkeit, den Zusatzluftschieber mit einem getrennten Gehäuse zusammenzubauen, das über Schlauchleitungen mit dem Kühlwasserkreislauf in Verbindung steht.

3.9. Kraftstoffpumpe

Als Kraftstoffpumpe wird eine Rollenzellenpumpe verwendet, die durch einen permanenterregten Elektromotor angetrieben wird. Je nach Kraftstoffbedarf des Verbrennungsmotors stehen Pumpen mit Förderleistungen von 60 l/h, 90 l/h und 120 l/h zur Verfügung. Die elektrisch aufgenommene Leistung liegt abhängig von der Förderleistung zwischen 30 und 50 Watt.

Die eigentliche Pumpe besteht aus einem zylindrischen Hohlraum, in dem eine rotierende Läuferscheibe exzentrisch angebracht ist. Die Läuferscheibe enthält an ihrem Umfang fünf taschenförmige Aussparungen, in denen sich jeweils eine Metallrolle befindet. Die Rollen werden bei der Rotation der Läuferscheibe durch die Zentrifugalkraft nach außen gepreßt und wirken als umlaufende Dichtung. Eine Pumpwirkung kommt dadurch zustande, daß durch die umlaufenden Dichtrollen am Kraftstoffeintritt ein sich periodisch vergrößerndes und am Kraftstoffaustritt ein sich periodisch verkleinerndes Volumen entsteht.

Bei einer ersten Ausführung der Kraftstoffpumpe waren Elektromotor und Pumpe getrennte Aggregate, die durch eine elastische Kupplung mitein-

ander verbunden waren. Inzwischen wurde eine neue Ausführung entwickelt und in die Produktion aufgenommen, bei welcher die Läuferscheibe der Pumpe auf der Welle des Elektromotors sitzt. Die Pumpe ist gegen den Elektromotor nicht abgedichtet, der Elektromotor ist mit Kraftstoff gefüllt. Die neue Pumpe (Bild 4) ist wesentlich kürzer und besteht aus wenigen Teilen.

3.10. Druckregler

Der Druckregler besteht aus einem zweiteiligen Metallgehäuse, in das eine Membran eingebördelt ist. Der Kraftstoff tritt durch einen oder mehrere radiale Stutzen ein und drückt auf die Membran, die auf der Gegenseite mit einer vorgespannten Schraubenfeder belastet ist. Die Membran gibt beim Überschreiten des eingestellten Druckes die Öffnung zu einem axial angeordneten Überströmkanal frei. Der Kraftstoffdruck wird durch Verstellen der Vorspannung der Schraubenfeder eingestellt.

3.11. Kraftstofffilter

Das Filter enthält einen Papiereinsatz mit einer mittleren Porengröße von 20 μm . Es ist für eine Laufzeit von etwa 20000 km ausgelegt und wird als Ganzes ausgewechselt. Je nach Förderleistung der Pumpe stehen verschiedene Größen zur Verfügung. Für einen Einbau auf der Saugseite der Pumpe wird ein Filter mit Kunststoffgehäuse verwendet. Bei druckseitigem Einbau besteht das Gehäuse aus Aluminium.

4. Entwicklungstendenzen

4.1. Weiterentwicklung der Jetronic-Anlagen

Mit der vorstehend beschriebenen Einspritzanlage wurde ein technischer Stand erreicht, der hinsichtlich der von der Motorenseite her bestehenden Anforderungen kaum noch Wünsche offen läßt. Die Anlage erfaßt und verarbeitet alle wesentlichen in Frage kommenden Einflußgrößen, welche die vielfältigen Betriebszustände eines Motors kennzeichnen, und sie könnte gegebenenfalls noch weitere Einflußgrößen berücksichtigen. Bei der Weiterentwicklung muß daher vorzugsweise die Verbesserung und Vereinfachung der Einspritzanlage und weniger die Änderung des Zusammenspiels zwischen Motor und Einspritzsystem angestrebt werden.

Beim elektronischen Steuergerät als dem vom Umfang und von der Kostenseite her wichtigsten Aggregat der Einspritzanlage zeichnet sich ab, daß durch Einführung integrierter Schaltkreise eine Reihe bedeutender Vorteile erzielt werden kann. Neben einer merklichen Verringerung der Kosten, einer geringeren Baugröße und geringerer Eigenenerwärmung ist mit einer noch höheren Zuverlässigkeit zu rechnen.

Die Jetronic-Anlage wurde als Baukastensystem konzipiert. Sie besteht aus einer Reihe von Aggre-

gaten, deren Einbau am Motor bzw. im Fahrzeug größtenteils frei gewählt werden kann. Daraus folgt, daß die Aggregate in ihrer Formgebung weitgehend unabhängig vom jeweiligen Anwendungsfall sind oder mindestens sein könnten. Nachdem nunmehr bereits eine größere Anzahl von Motortypen mit Jetronic-Anlagen ausgerüstet wurde, liegen umfangreiche Erfahrungen vor, die nach entsprechender Auswertung zu Aggregaten führen werden, welche möglichst universell verwendbar sind. Diese universell verwendbaren Aggregate werden dann bei der sich bereits abzeichnenden Verwendung der Jetronic-Anlagen bei einer Vielzahl von Motortypen zu wirtschaftlichen Stückzahlen führen, die sich auf die Kosten der Anlagen günstig auswirken werden.

4.2. Benzineinspritzung und Abgasentgiftung

Die elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung ist ein wesentliches Hilfsmittel bei der Reduzierung der Konzentration unverbrannter Abgasbestandteile. Mit den neuen Jetronic-Anlagen ist es in der Regel ohne Schwierigkeiten möglich, die von 1970 an in den USA geltenden verschärften Abgasbestimmungen [14] einzuhalten. Bei dem Versuch, die Abgasemission im Hinblick auf die in den USA geplanten noch schärferen Bestimmungen weiter zu senken, stellt man fest, daß für den Grad der Entgiftung vom Motor her gewisse Grenzen gesetzt sind, welche durch die Benzineinspritzung nicht beeinflußt werden können. Nach den vorliegenden Erfahrungen ist es im allgemeinen mit Jetronic-Anlagen kein Problem, die vom Gesetzgeber geforderten Grenzwerte für die Emission von Kohlenmonoxid (CO) einzuhalten. Dagegen ist es nicht in jedem Fall ohne weiteres möglich, die Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe (HC) genügend weit zu senken.

Zur Veranschaulichung der Problematik ist in *Bild 11* der prinzipielle Verlauf der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), der Stickoxide (NO_x) und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) über dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis bzw. der Luftzahl λ dargestellt. Die Kurven gelten für einen stationären Betriebspunkt im Teillastbereich. Für einen bestimmten Motor kann den Skalen für Luft-Kraftstoff-Verhältnis bzw. Luftzahl λ eine dritte gegenläufige Skala mit der Einspritzmenge pro Hub oder der Impulsdauer zugeordnet werden. Die Einspritzanlage erlaubt bei der Wahl der Gemischanpassung eine Variation längs der Abszisse.

Die CO-Konzentration nimmt zunächst mit zunehmender Luftzahl ab, erreicht oberhalb von $\lambda = 1$, dem stöchiometrischen Verhältnis, bereits einen sehr niedrigen Wert, der im allgemeinen unter 0,25% liegt, und behält diesen Wert mit weiter ansteigender Luftzahl bei. Die Konzentration unverbrannter Kohlenwasserstoffe weist ein schmales

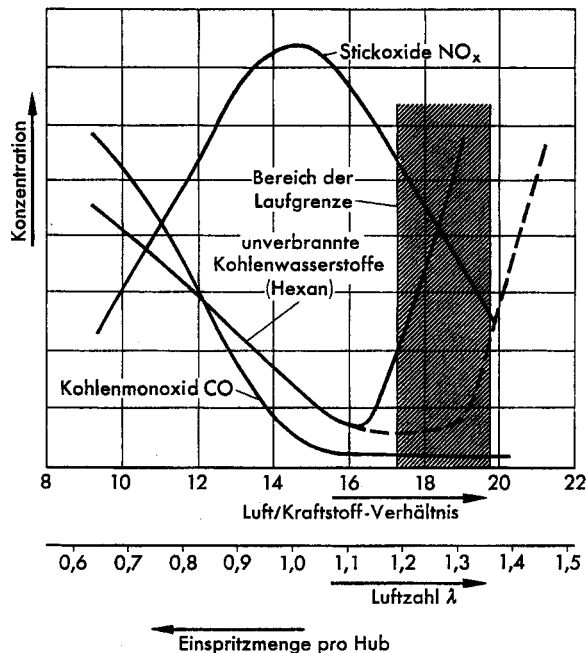


Bild 11: Prinzipieller Verlauf der Konzentration von CO, NO_x und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe über dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis bzw. der Luftzahl λ .

Minimum im Bereich zwischen $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 1,2$ auf und steigt bei einer weiteren Abmagerung des Gemisches wieder steil an, wobei die ausgezogene Linie in *Bild 11* einen Durchschnittswert für europäische Motoren darstellt. Messungen an einigen großvolumigen amerikanischen Achtzylindermotoren ergaben Wiederanstiege bei wesentlich höheren Luftzahlen (gestrichelte Linie). Der steile Wiederanstieg hängt mit beginnenden Verbrennungsaussetzern zusammen, die durch das bereits zu magere Kraftstoff-Luft-Gemisch hervorgerufen werden. Die Verbrennungsaussetzer haben einen unruhigen Lauf des Motors zur Folge und bestimmen die sogenannte Laufgrenze. Diese liegt wie der Anstieg der Kohlenwasserstoffkonzentration abhängig vom Motortyp bei unterschiedlichen Luftzahlen und hängt offensichtlich von einer Reihe konstruktiver Merkmale des Motors ab.

Die Kraftstoffmenge wird in der Regel so festgelegt, daß der Motor im Kohlenwasserstoff-Minimum betrieben wird, sofern noch ein ausreichender Sicherheitsabstand zur Laufgrenze hin eingehalten werden kann. Eine geringere als die im Minimum auftretende HC-Konzentration kann jedoch durch Variation der Kenngrößen der Einspritzanlage nicht erreicht werden. Der Minimalwert wird durch die Parameter des Motors bestimmt. Wichtige Einflußgrößen sind die Brennraumform, das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen im Kompressionsraum, die Höhe des Verdichtungsverhältnisses, die Steuerzeiten der Nockenwelle, die Ausbildung der Kolbenringe, die Art der Kurbelgehäuseentlüftung und die

Vorzündung. Im Hinblick auf eine weitere Verringerung der maximal zulässigen HC-Konzentration im Abgas ist es daher erforderlich, auch bei Anwendung der Benzineinspritzung gewisse Änderungen an den Motoren vorzunehmen, um das Niveau des HC-Minimums weiter zu senken.

Ein weiteres, noch schwerer wiegendes Problem entsteht durch die im Staate Kalifornien von 1971 angeforderte Beschränkung der Stickoxidkonzentration im Abgas. Diese weist bei stationärem Betrieb des Motors den in *Bild 11* im Prinzip dargestellten Verlauf über der Luftzahl λ auf. Einspritzmotoren werden im Teillastbereich in der Regel in der Nähe der Luftzahl $\lambda = 1,1$ betrieben.

Bei dieser Luftzahl erreicht die Konzentration der Stickoxide annähernd ihr Maximum. Eine wirksame Senkung der Konzentration kann durch einen

extrem mageren Betrieb des Motors erreicht werden, sofern die Laufgrenze noch nicht überschritten wird. Erste Versuche an Motortypen mit hierfür günstigen Laufgrenzen bei extrem magerem Kraftstoff-Luft-Gemisch haben beträchtliche Reduzierungen der Stickoxidkonzentration ergeben.

Der hier aufgezeigte Weg einer Senkung der Stickoxidkonzentration durch extrem magere Anpassung des Kraftstoff-Luft-Gemisches setzt voraus, daß die Motoren mit dem Ziel weiterentwickelt werden, ihre Laufgrenze in Richtung zum mageren Gemisch zu verschieben. Weiterhin sind eine extrem gleichmäßige Kraftstoff- und Luftverteilung auf die einzelnen Zylinder sowie eine sehr präzise Kraftstoffzumessung erforderlich. Die letztgenannten Voraussetzungen sind mit Einspritzanlagen ohne allzu große Schwierigkeiten zu erfüllen.

Literatur

- [1] O. Eberle: Bosch-Einspritzrüstung für Viertakt-Ottomotoren mit Mengenteiler-Saugrohreinspritzung. MTZ 20 (1959), S. 331.
- [2] H. Scherenberg: Erfolg der Benzineinspritzung bei Daimler-Benz. MTZ 22 (1961), S. 241.
- [3] U. Anders: Entwicklungsprobleme der Benzineinspritzung von Personenwagenmotoren. ATZ 63 (1961), S. 315.
- [4] H. Grözinger: Die Benzineinspritzung des 230-SL-Motors von Daimler-Benz. ATZ 65 (1963), S. 166.
- [5] R. Schenk: Kraftstoffeinspritzung beim Peugeot 404. ATZ 65 (1963), S. 169.
- [6] H. Knapp, E.-U. Joachim u. G. Baumann: Beeinflussung der Kraftfahrzeugabgase durch Benzineinspritzung. Bosch Techn. Ber. 1 (1965), S. 206, u. MTZ 26 (1965), S. 353.
- [7] A. H. Winkler and R. W. Sutton: Electrojector — Bendix Electronic Fuel Injection System. SAE-Transactions 65 (1957), S. 758.
- [8] R. Brüning: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung für Verbrennungsmotoren. Funk-Technik 18 (1963), S. 862.
- [9] Electronically Controlled Petrol Injection. Automobile Engineer 56 (1966), S. 461.
- [10] J. Zeysn u. K. Müller: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung. I. Aufbau der elektronisch gesteuerten Benzineinspritzung. MTZ 28 (1967), S. 10.
- [11] —: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung. II. Versuchsergebnisse an einem Sechszylinder-Einspritzmotor. MTZ 28 (1967), S. 13.
- [12] G. Baumann: Eine elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung für Ottomotoren. Bosch Techn. Ber. 2 (1967), H. 3, S. 107; MTZ 28 (1967), S. 475.
- [13] H. Scholl: Elektronische Benzineinspritzung. ATZ 70 (1968), S. 115.
- [14] K. Obländer und D. Kräft: Abgasreinigung an Kraftfahrzeugen; Meßverfahren und Testzyklen. ATZ 71 (1969), S. 117.