

# Eine elektronisch gesteuerte Kraftstoffeinspritzung für Ottomotoren

Von Günther Baumann

Robert Bosch GmbH, Entwicklung Autoelektrik, Stuttgart

*Die von Bosch entwickelte elektronisch gesteuerte Benzineinspritzanlage mißt jedem einzelnen Zylinder des Ottomotors die dem jeweiligen Betriebszustand entsprechende Kraftstoffmenge zu. Der Kraftstoff wird intermittierend in das Ansaugrohr direkt auf die Einlaßventile gespritzt. Jedem Zylinder des Motors ist ein elektromagnetisches Einspritzventil zugeordnet, dessen Öffnungszeiten durch ein elektronisches Steuergerät bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Einspritzanlage ist es möglich, die Fahrleistungen zu verbessern, den Kraftstoffverbrauch zu senken und gleichzeitig die in den USA geforderten Grenzwerte der Abgasemission zu unterschreiten.*

*The electronically controlled fuel injection system developed by Bosch meters to each cylinder of the motor the quantity of fuel appropriate to the instantaneous running conditions. The fuel is injected into the inlet manifold directly on to the inlet valves. Each cylinder of the motor is provided with an electromagnetic injection valve, whose duration of opening is determined by an electronic control system. By means of this injection system it is possible to improve the performance, reduce fuel consumption and at the same time to reduce the emission of air contaminants in the exhaust below the limits mandatory in the USA.*

*Le système d'injection d'essence électronique conçu par Bosch mesure une quantité de carburant, correspondant à la condition de régime en cause, pour chacun des cylindres de moteur à essence. Le carburant est injecté de façon intermittente dans la conduite d'admission directement sur les soupapes d'admission. Un injecteur électromagnétique dont la durée d'ouverture est déterminée par un dispositif de commande électronique, est affecté à chacun des cylindres. A l'aide de ce système d'injection, il est possible d'améliorer la performance, de réduire la consommation de carburant et de se tenir en même temps en dessous des limites imposées aux Etats Unis pour les émissions des gaz d'échappement.*

## 1. Einleitung

Wie bekannt, bietet die Benzineinspritzung bei Ottomotoren eine Reihe von Vorteilen [1 bis 11]. Hierzu gehören vor allem höhere Hubraumleistung, geringerer spezifischer Kraftstoffverbrauch, geringerer Gehalt der Abgase an unverbrannten Be-

standteilen, höheres Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen, größere Elastizität und gleichmäßigere Verbrennung in den einzelnen Zylindern. Die Mehrkosten der Einspritzung fallen neuerdings wegen der Forderung nach Reinhaltung der Luft kaum noch ins Gewicht, da der bei Einspritzmotoren vorhandene Reinheitsgrad der Abgase bei Vergasermotoren nur durch zusätzliche, verteuerte Maßnahmen erreicht werden kann [12].

Die Verwendung elektromagnetisch betätigter Einspritzventile [13; 14] und elektronischer Hilfsmittel in Form von Transistorschaltungen zur Steuerung der Einspritzmenge [6; 15 bis 19] bietet dabei noch die zusätzlichen Vorteile, daß die Einspritzanlage keinen eigenen Antrieb am Motor benötigt und daß eine fast beliebig große Anzahl von Korrekturgrößen für besondere Betriebszustände in das System eingeführt werden kann. Daneben läßt sich bei den meisten Aggregaten der elektronischen Einspritzanlage der Einbauort in weiten Grenzen frei wählen, so daß ein raumsparender Einbau der Anlage mit geringen konstruktiven Änderungen an Motor und Fahrzeug möglich ist.

## 2. Prinzip der elektronischen Einspritzanlage

Die elektronisch gesteuerte Anlage ist eine intermittierende Saugrohreinspritzung, bei der der Kraftstoff aus elektromagnetisch betätigten Einspritzventilen auf die Einlaßventile des Motors gespritzt wird. Das gewählte Einspritzsystem ist universell anwendbar; alle denkbaren Abwandlungen in der Steuerung der Spritzfolge und den eingegebenen Korrekturen sind möglich.

Der grundsätzliche Aufbau der Einspritzanlage ist aus *Bild 1* zu ersehen. Jedem Zylinder des Motors ist ein elektromagnetisches Einspritzventil zugeordnet, das je Nockenwellenumdrehung *einmal* betätigt wird. Alle Einspritzventile stehen unter einem konstanten Kraftstoffdruck, der zu 2 atü gewählt wurde. Dieser Kraftstoffdruck wird von einem Druckversorgungssystem erzeugt, das aus Filter, Kraftstoffpumpe, Verteilerrohr mit Abzweigungen zu den Magnetventilen und Überströmdruckregler mit Rücklauf zum Tank besteht. Der Wert von 2 atü hat sich als brauchbarer Kompromiß zwischen Güte der Gemischaufbereitung und Aufwand für das Druckversorgungssystem erwiesen.

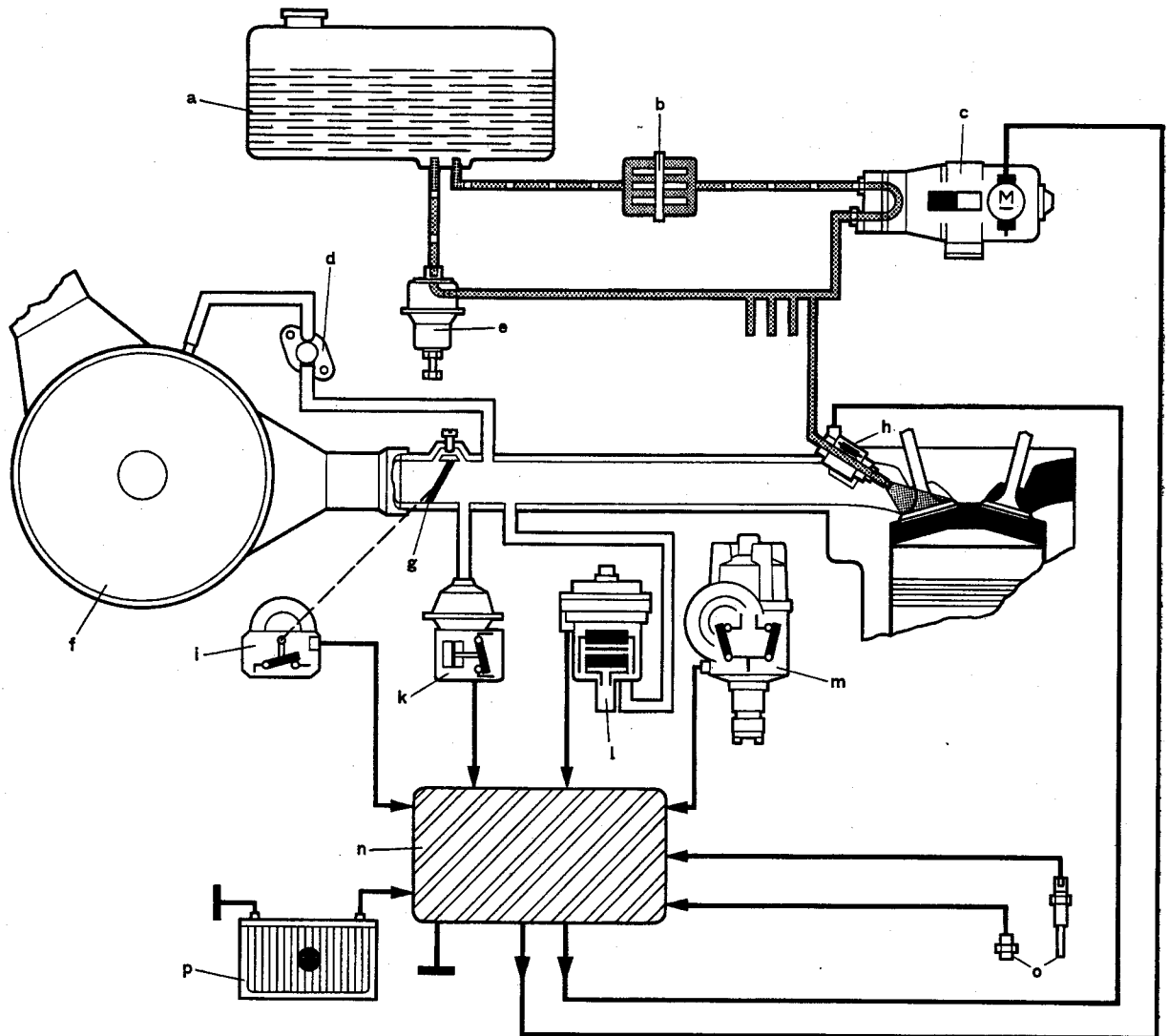


Bild 1: Prinzip der elektronisch gesteuerten Einspritzanlage. a = Kraftstoffbehälter; b = Kraftstofffilter; c = Kraftstoffpumpe; d = Zusatzluftschieber; e = Kraftstoffdruckregler; f = Luftfilter; g = Drosselklappe; h = Einspritzventil; i = Drosselklappenschalter; k = Druckschalter; l = Druckfühler; m = Zündverteiler mit Impulsauslöser; n = elektronisches Steuergerät; o = Temperaturfühler; p = Batterie.

Auch bleibt bei diesem Druck die elektrische Leistung der Pumpe in tragbaren Grenzen (etwa 25 W bei einem Motor mittlerer Leistung).

Die Dosierung der den Zylindern je Arbeitstakt zuzuführenden Kraftstoffmenge in Funktion des Betriebszustandes des Motors erfolgt durch Steuerung der Öffnungsdauer der Magnetventile. Zur Verminderung des elektronischen Aufwandes können die Ventile bei 4-Zylinder-Motoren in zwei Gruppen zu je zwei Ventilen, bei 6-Zylinder-Motoren in zwei Gruppen zu je drei Ventilen oder drei Gruppen zu je zwei Ventilen zusammengefaßt werden. Die Ventile einer Gruppe gehören dabei zu Zylindern, die in der Zündfolge hintereinander liegen. Sie sind elektrisch parallel geschaltet und spritzen somit gleichzeitig. Die zeitliche Lage der Einspritzimpulse bei einem 4-Zylinder-Motor ist aus Bild 2 ersichtlich.

Der Beginn der Öffnungsimpulse für jede Ventilgruppe wird durch einen Impulsauslöser bestimmt.

Dieser ist im Zündverteiler eingebaut und erzeugt für jede Ventilgruppe je Nockenwellenumdrehung einen Auslöseimpuls. Bei 4-Zylinder-Motoren sind die beiden Auslöseimpulse zeitlich um einen Nockenwellenwinkel von 180° gegeneinander versetzt. Durch jeden dieser Auslöseimpulse werden die zu der entsprechenden Gruppe gehörenden Magnetventile geöffnet; gleichzeitig wird das die Öffnungsdauer bestimmende elektronische Zeitglied eingeschaltet, das nach einer vom Betriebszustand des Motors abhängigen Zeitdauer die Magnetventile wieder schließt. Das nur einmal vorhandene zeitbestimmende Glied wird von einer Ventilgruppe auf die andere durch die getrennten Auslöseimpulse *zwangsläufig* umgeschaltet; ein Vertauschen der Spritzfolge der Gruppen während des Betriebes ist dadurch ausgeschlossen.

Die Informationen über den augenblicklichen Betriebszustand des Motors erhält das Steuergerät durch am Motor angebrachte Meßfühler.

Als Information über die Drehzahl dient die Frequenz der in das Steuergerät gelangenden Auslöseimpulse. Der Saugrohrdruck wird kontaktlos durch einen induktiven Druckfühler gemessen, der über eine kurze Schlauchleitung an das Ansaugrohr angeschlossen ist. Zur Kennzeichnung des Vollastbetriebes dient ein vom Unterdruck im Ansaugrohr gesteuerter Schalter, der beim Unterschreiten eines bestimmten Unterdruckes das Steuergerät auf die kraftstoffreichere Vollastanpassung umschaltet. Aus Gründen der Abgasemission und des Kraftstoffverbrauches wird im Schiebepetrieb die Kraftstoffzufuhr vollständig abgesperrt. Diese Absperrung bewirkt ein an der Drosselklappe angebrachter Schalter, der bei Leerlaufstellung der Drosselklappe anspricht und die Entstehung von Einspritzimpulsen dann verhindert, wenn gleichzeitig eine gewisse Mindestdrehzahl des Motors, die etwa zwischen 1300 und 1700 U/min liegt, überschritten wird.

Zur automatischen Gemischanpassung bei nicht betriebswarmem Motor dienen an geeigneter Stelle (z. B. im Kühlwasserkreislauf, im Ölkreislauf oder am Zylinderkopf) angebrachte Temperaturfühler. Auch eine Kombination mehrerer Temperaturfühler ist möglich. Diese Fühler enthalten z. B. temperaturabhängige Widerstände (NTC, PTC), deren Größe die Öffnungsdauer der Magnetventile beeinflusst. Auf dieselbe Weise kann mit einem Temperaturfühler die Einspritzmenge entsprechend der Abhängigkeit der Luftfüllung der Zylinder von der Ansauglufttemperatur korrigiert werden. Für das Starten des kalten Motors ist eine zusätzliche, von der Starttemperatur abhängige Gemischanreicherung erforderlich, die durch den Anlaßschalter und einen Temperaturfühler ebenfalls automatisch gesteuert wird. Die im Leerlauf des nicht betriebswarmen Motors benötigte Zusatzluft wird dem Motor über einen Zusatzluftschieber zugeführt, dessen Öffnungsquerschnitt eine Funktion der Motortemperatur ist.

### 3. Die Anpassung der Einspritzmenge an den Motor

#### 3.1. Stationäre Anpassung bei betriebswarmem Motor

Der Betriebszustand des Motors ist durch Drehzahl, Drosselklappenstellung und Saugrohrdruck bestimmt. Da zwischen diesen drei Parametern ein funktioneller Zusammenhang besteht, ist der Betriebszustand des warmen Motors bereits durch Angabe von zweien dieser drei Größen eindeutig definiert. Entsprechend ist die dem betriebswarmen Motor je Arbeitstakt zuzuführende Einspritzmenge eine eindeutige Funktion von zweien dieser drei Parameter.

Während wir bei der serienmäßig hergestellten *mechanischen* Benzineinspritzanlage Drosselklappenstellung und Drehzahl als Eingabegrößen ver-

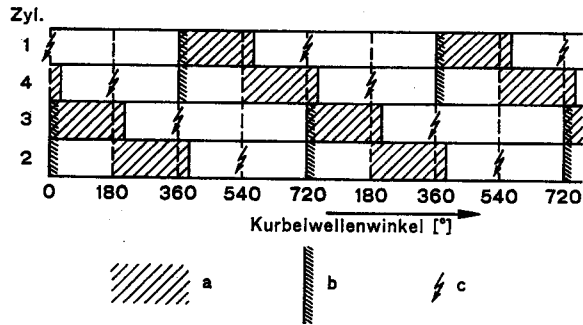


Bild 2: Steuerdiagramm. Eingezeichnet ist der Beginn der Einspritzimpulse; die Lage des Impulsendes ist von Drehzahl und Last abhängig. a = Öffnungsdauer der Einlaßventile; b = Einspritzbeginn; c = Zündzeitpunkt.

wenden, wurde für die *elektronisch* gesteuerte Einspritzung eine Steuerung in Funktion des absoluten Saugrohrdruckes und der Drehzahl gewählt. Das sich hierbei ergebende Motorkennlinienfeld läßt sich im elektronischen Steuergerät besonders einfach nachbilden. Da in diesem Fall die für die Kraftstoffmessung maßgebende Luftfüllung gemessen wird, haben zudem Änderungen an der Drosselklappenengeometrie oder dem Drosselklappengestänge keinen Einfluß auf das Mischungsverhältnis. Ebenso verursachen unerwünschte Strömungswiderstände, wie sie z. B. durch Zusetzen des Luftfilters entstehen können, keine Fehler in der Zumessung. Auch eine Höhenkorrektur ist überflüssig. Die Verwendung des Saugrohrdruckes als Eingabegröße hat allerdings zur Folge, daß beim schlagartigen Öffnen der Drosselklappe die dem neuen Betriebszustand entsprechende Vergrößerung der Einspritzmenge gegenüber der Vergrößerung der Luftfüllung etwas verzögert wird. Diese Verzögerung im Ansprechverhalten des Motors ist jedoch so gering, daß sie im Fahrbetrieb praktisch nicht bemerkt wird; sie liegt in der Größenordnung von etwa 0,05 s.

Das Einspritzkennlinienfeld wird am Motorenprüfstand mit einem sogenannten Handsteuergerät gewonnen, mit dem die Einspritzmenge über die Zeitdauer der Steuerimpulse von Hand kontinuierlich variiert werden kann. Für jeden Punkt des Kennlinienfeldes, gegeben durch Drehzahl und Saugrohrdruck, werden Einspritzmenge und Zündzeitpunkt variiert und Drehmoment, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Abgasemission gemessen (Bild 3). Für jeden Kennfeldpunkt erhält man damit eine kontinuierliche Folge möglicher Einspritzmengen und Zündzeitpunkte. Die hieraus für jeden einzelnen Punkt zu wählende Anpassung ergibt sich aus den Anforderungen, die an die Leistung, den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die Abgasemission gestellt werden.

Die Einstellwerte von Einspritzmenge und Zündzeitpunkt für günstigste Abgaszusammensetzung, geringsten spezifischen Verbrauch und höchstes Drehmoment sind jedoch nicht identisch; aufgrund

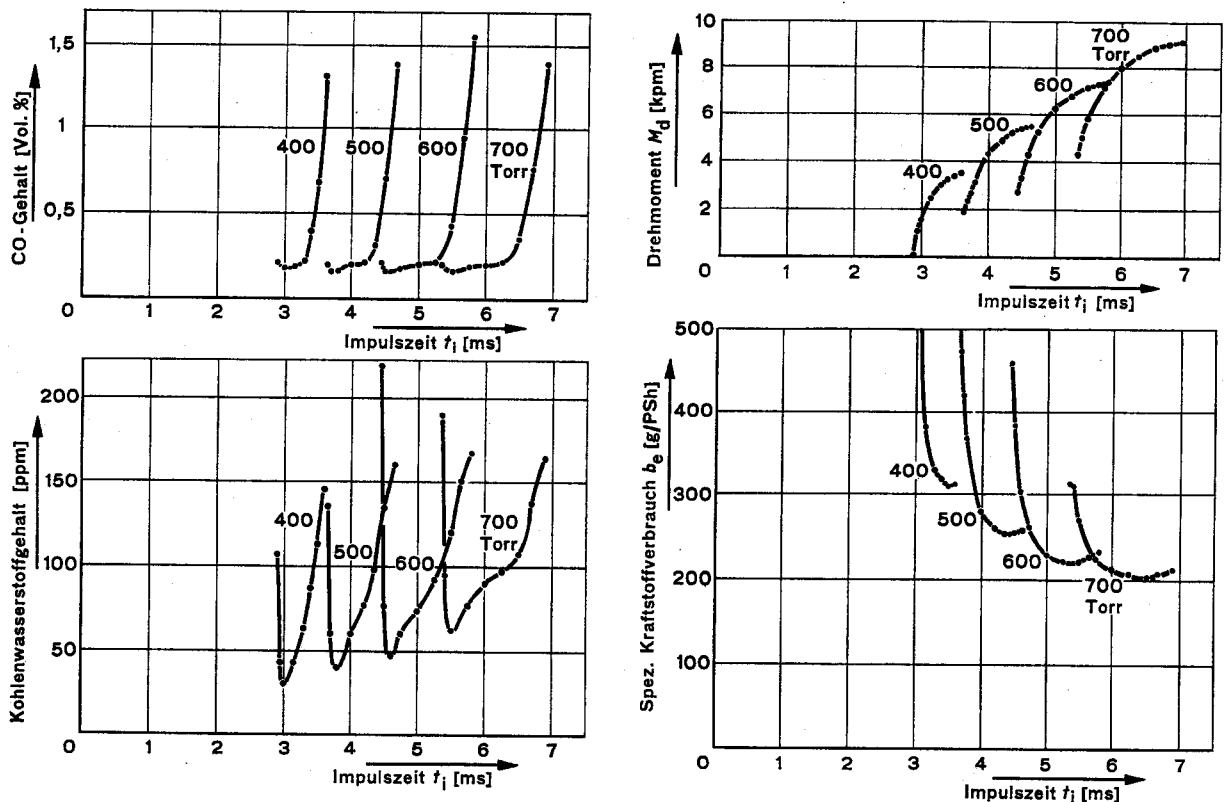


Bild 3: Motorkennlinien in Funktion von Impulszeit und absolutem Saugrohrdruck (Torr) bei 2000 U/min und Zündung 21 Grad Kurbelwelle v. O.T.<sup>1)</sup> a (links oben) = CO-Gehalt; b (links unten) = Kohlenwasserstoffgehalt; c (rechts oben) = Drehmoment; d (rechts unten) = spezifischer Kraftstoffverbrauch.

der gestellten Anforderungen muß in jedem Fall ein geeigneter Kompromiß geschlossen werden. Die Anpassungskriterien sind im allgemeinen in verschiedenen Bereichen des Kennfeldes verschieden:

Im Teillastgebiet wird möglichst geringer CO- und Kohlenwasserstoffgehalt des Abgases sowie möglichst geringer spezifischer Verbrauch angestrebt, bei Vollast (Bild 4) dagegen möglichst hohe Leistung und gute innere Kühlung bei noch tragbarem Verbrauch.

Im Vollastgebiet wird daher im allgemeinen eine wesentlich kraftstoffreichere Einstellung gewählt als bei Teillast. Bei Teillast stellt dabei im Gegensatz zur Vollast ein Verzicht auf das höchste Drehmoment keinen Nachteil dar, da in diesem Bereich ein gewünschtes höheres Drehmoment stets durch weiteres Öffnen der Drosselklappe, d. h. Erhöhung des Saugrohrdruckes, erreichbar ist.

Aus Bild 3 ergibt sich, daß eine Anpassung auf geringsten Kohlenwasserstoffgehalt bei 2000 U/min mit Zündung 21 Grad Kurbelwelle v. O.T.<sup>1)</sup> je nach Last CO-Emissionen von 0,15 bis 0,18% und Kohlenwasserstoffemissionen von 30 bis 62 ppm ergeben würde. Bei 4000 U/min ist der Einfluß des Saugrohrdruckes nur noch gering; die erreichbaren Emissionswerte liegen bei etwa 0,15% CO und etwa 15 ppm unverbrannter Kohlenwasserstoffe.

<sup>1)</sup> v. O.T. = vor dem oberen Totpunkt.

Bild 5 zeigt das nach diesen Kriterien aus den Prüfstandmessungen ermittelte Kennlinienfeld eines 4-Zylinder-Motors. Aufgetragen ist die Öffnungsdauer  $t_1$  der Einspritzventile über der Drehzahl. Parameter ist der absolute Druck im Ansaugrohr. Im Vergleich dazu zeigt Bild 6 dasselbe Kennfeld, jedoch in Funktion von Drosselklappenstellung und Drehzahl. Zu jedem Punkt der beiden Kennfelder gehört eine ganz bestimmte Einstellung des Zündzeitpunktes, die mit der üblichen Fliehkraft- und Unterdruckverstellereinrichtung verwirklicht werden kann.

### 3.2. Anpassung in den Übergangszuständen

Während des Schiebetriebes wird zur Abgasentgiftung und zur Senkung des Kraftstoffverbrauches die Kraftstoffzufuhr vollständig unterbunden.

Für das schnelle Beschleunigen mit schlagartigem Öffnen der Drosselklappe benötigt der Einspritzmotor keine oder nur eine sehr geringfügige Kraftstoffanreicherung.

### 3.3. Zusätzliche Anforderungen bei nicht betriebswarmem Motor

Sowohl beim Kaltstart als auch beim Lauf in nicht betriebswarmem Zustand benötigt der Motor ein kraftstoffreicheres Gemisch. Außerdem ist wegen der größeren Reibung bei nicht betriebswarmem Motor im Leerlauf eine höhere Füllung der Zylinder

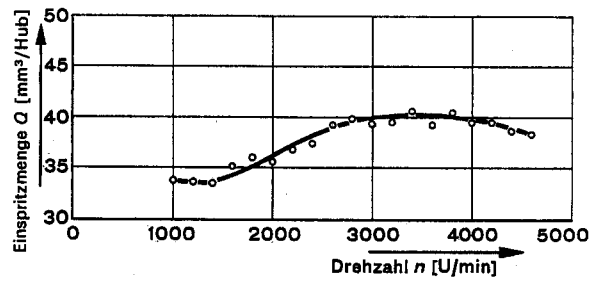
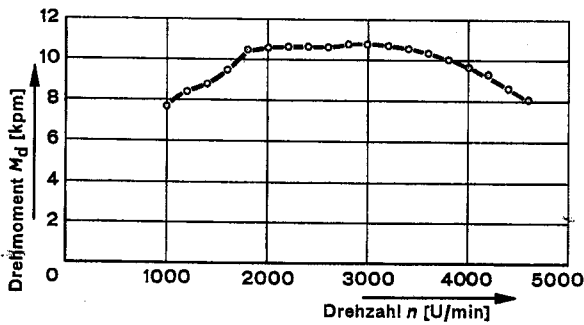
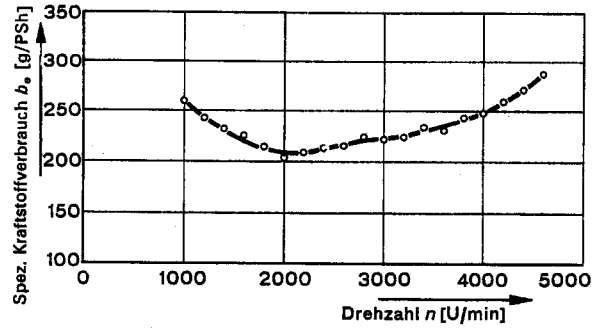
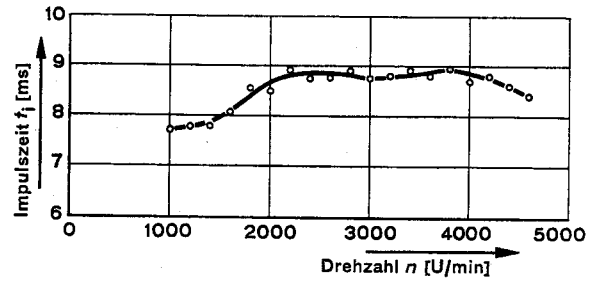
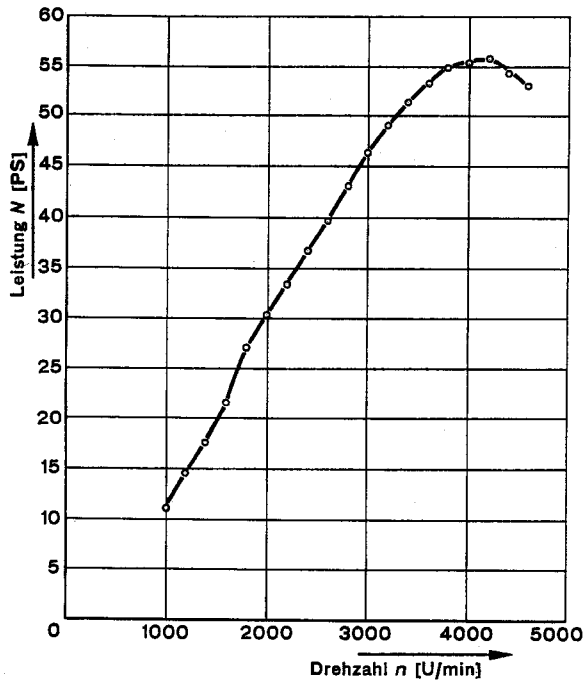


Bild 4: Motorkennlinien für Betrieb bei Vollast in Funktion der Drehzahl (Anpassung für höchstes Drehmoment). a (links oben) = Leistung; b (links unten) = Drehmoment; c (rechts oben) = Impulszeit; d (rechts Mitte) = spezifischer Kraftstoffverbrauch; e (rechts unten) = Einspritzmenge.

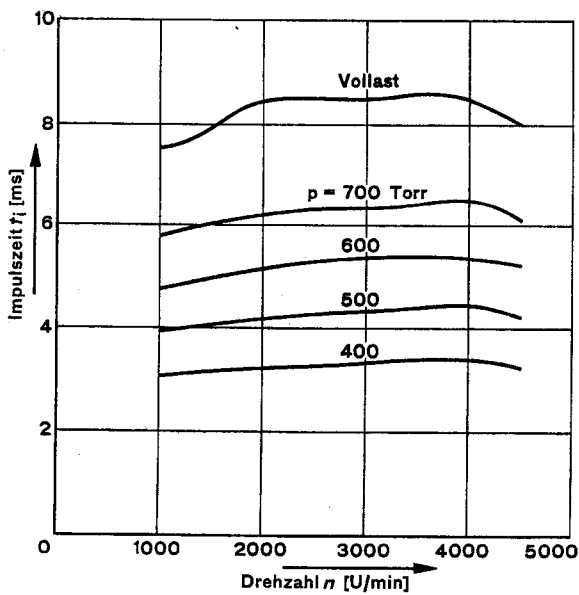


Bild 5: Motorkennlinienfeld. Impulszeit  $t_i$  in Funktion von Drehzahl  $n$  und absolutem Saugrohrdruck  $p$ .

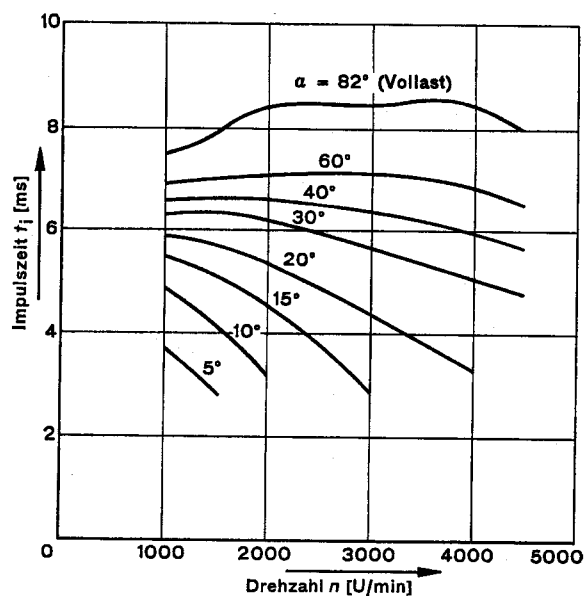


Bild 6: Motorkennlinienfeld. Impulszeit  $t_i$  in Funktion von Drehzahl  $n$  und Drosselklappenöffnung  $\alpha$ .

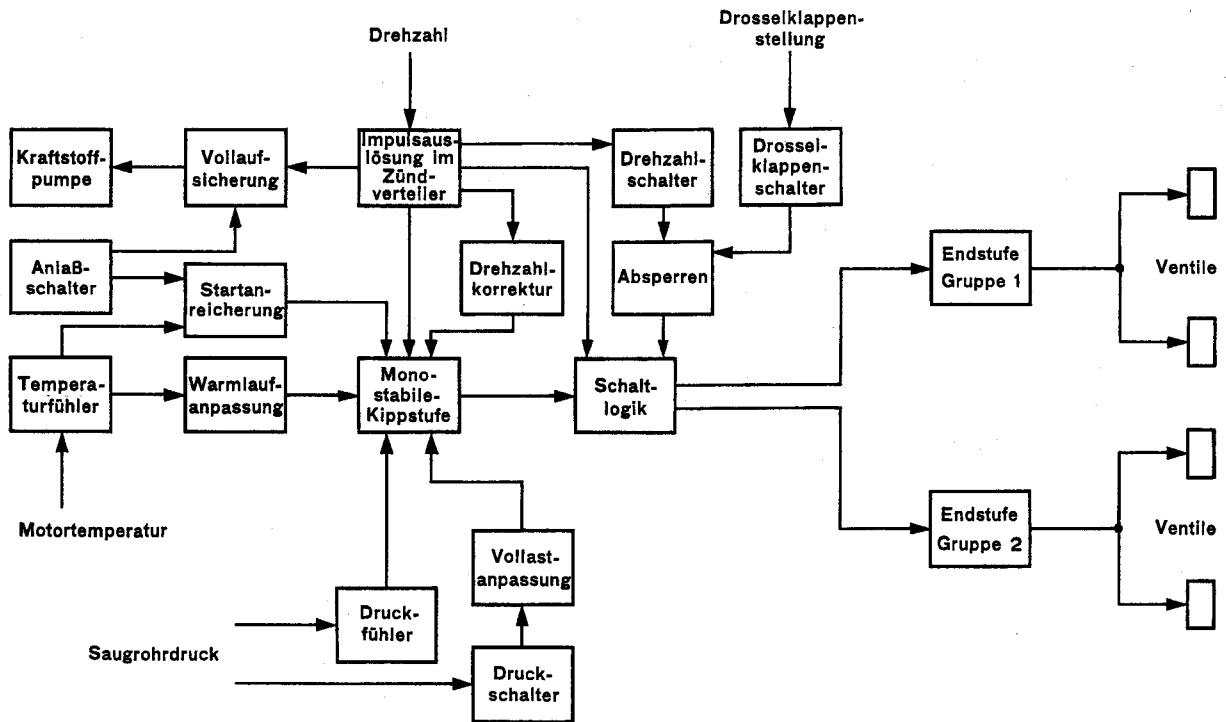


Bild 7: Blockschaltbild der elektronischen Steuerung.

erforderlich. Der Kraftstoff- und Luftbedarf des Motors in diesen Betriebszuständen muß durch zusätzliche Messungen, teilweise in der Kältekammer, ermittelt werden.

#### 4. Aufbau der einzelnen Aggregate der Einspritzanlage

##### 4.1. Elektronisches Steuergerät

Das elektronische Steuergerät (*Titelbild*) besteht im wesentlichen aus je einem Leistungsverstärker für jede Ventilgruppe und dem eigentlichen Zeitglied. Die Leistungsverstärker sind dann eingeschaltet, wenn sie von dem im Zündverteiler untergebrachten Impulsauslöser angesteuert werden und wenn außerdem das gleichzeitig in Gang gesetzte Zeitglied eingeschaltet ist. Durch eine geeignete logische Verknüpfung ist gewährleistet, daß eine eindeutige Zuordnung der Leistungsverstärker zum Impulsauslöser besteht und daß Fehlauflösungen durch Prellen der Auslösekontakte ausgeschlossen sind. Das Kernstück des Zeitgliedes wird durch eine monostabile Kippschaltung gebildet, die durch die Impulsauslösung aus ihrer stabilen Ausschaltstellung in ihre instabile Einschaltstellung gebracht wird. Die Verweildauer der monostabilen Kippschaltung in ihrer Einschaltstellung wird im wesentlichen durch die Größe der Induktivität des Saugrohrdruckfühlers bestimmt. Sie wird außerdem über eine gesonderte Drehzahlkorrekturschaltung entsprechend den Forderungen des Kennfeldes von der Motordrehzahl beeinflusst.

Über geeignete Schaltungszusätze werden die in Abschnitt 2. und 3. aufgeführten Korrekturen mit

den entsprechenden Funktionsverläufen eingeführt. Neben diesen Korrekturereingaben enthält das elektronische Steuergerät noch eine Spannungskorrekturschaltung, durch die die Dauer der Einspritzimpulse bei höheren Spannungen etwas verkürzt wird. Dies ist deshalb erforderlich, weil mit steigender Spannung die Anzugszeit der Magnetventile kleiner und ihre Abfallverzögerung größer wird, so daß bei gleicher Dauer des elektrischen Öffnungsimpulses die von den Magnetventilen eingespritzte Kraftstoffmenge mit steigender Spannung zunehmen würde.

Die Schaltung enthält außerdem noch eine Sicherung, die dafür sorgt, daß die Kraftstoffpumpe nur dann in Betrieb ist, wenn entweder der Starter betätigt oder eine bestimmte Mindestdrehzahl von etwa 100 U/min überschritten wird. Dadurch wird verhindert, daß bei stehendem Motor die Zylinder mit Kraftstoff vollaufen können, wenn einmal infolge einer Störung an der Anlage ein Magnetventil nicht mehr schließen sollte.

Kurzschlüsse und Masseberührungen an den Ein- und Ausgängen des elektronischen Steuergeräts sowie an den Magnetventilen und Meßwertaufnehmern haben keine Beschädigung der Einspritzanlage zur Folge.

Der Temperaturfehler des Gerätes ist im gesamten Bereich von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+70^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur kleiner als  $\pm 2\%$ . Umgebungstemperaturen von  $+70^{\circ}\text{C}$  am Steuergerät werden bei geeignetem Einbau des Steuergerätes auch bei einem in den Tropen in der Sonne stehendem Fahrzeug nicht überschritten.

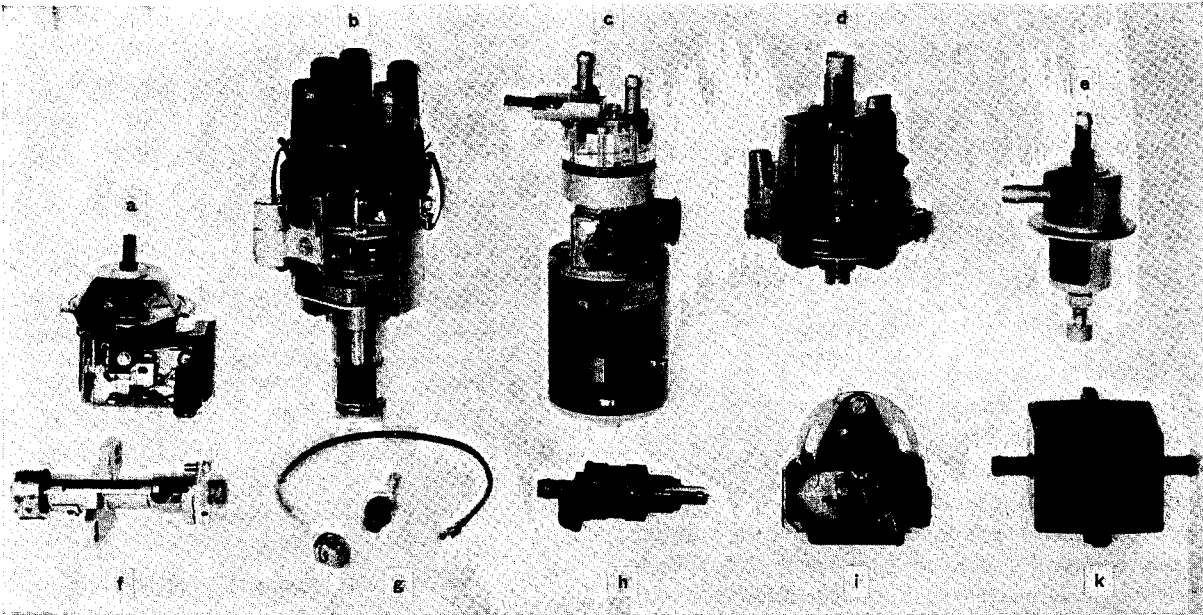


Bild 8: Einzelaggregate der elektronischen Einspritzanlage. a = Druckschalter; b = Zündverteiler mit Impulsauslöser; c = Kraftstoffpumpe; d = Druckfühler; e = Druckregler; f = Zusatzluftschieber; g = Temperaturfühler; h = Einspritzventil; i = Drosselklappenschalter; k = Kraftstofffilter.

Das Zusammenwirken der einzelnen Baugruppen des elektronischen Steuergerätes ist aus dem in *Bild 7* dargestellten Blockschaltbild ersichtlich.

Das elektronische Steuergerät ist in gedruckter Schaltungstechnik aufgebaut und enthält etwa 220 Bauelemente, davon etwa 25 Transistoren und 35 Dioden (*Titelbild*). Es ist mit dem Fahrzeugkabelbaum durch einen Vielfachstecker mit Gabelkontakten verbunden, der direkt auf die gedruckte Leiterplatte aufgesteckt wird.

Bei der Dimensionierung der Schaltung und der Auswahl der Bauelemente wurde der Forderung nach hoher Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Steuergerätes größte Beachtung geschenkt. Die gesamte Schaltung wurde aufgrund einer sogenannten Worst-Case-Berechnung ausgelegt. Das bedeutet, daß selbst noch bei einem zufälligen Zusammenreffen von Bauelementen, deren Kennwerte sämtlich an der ungünstigen Grenze des Toleranzbandes liegen, mit den ungünstigsten Werten von Versorgungsspannung und Umgebungstemperatur noch eine einwandfreie Funktion gewährleistet ist. Die Möglichkeit alterungsbedingter Änderungen der Kennwerte der Bauelemente wurde bei der Worst-Case-Berechnung ebenfalls berücksichtigt. Um die Lebensdauer der einzelnen Bauelemente zu erhöhen, wurden die vom Hersteller zugelassenen Grenzwerte von Strom, Spannung und Verlustleistung durchweg nicht voll ausgenutzt und zum Teil weit unterschritten.

Die Ergebnisse einer unter verschärften Bedingungen durchgeführten Dauererprobung haben gezeigt, daß das elektronische Steuergerät durch die beschriebenen Maßnahmen den Grad der Zu-

verlässigkeit und Lebensdauer erreicht hat, der für seine Verwendung an lebenswichtiger Stelle im Fahrzeug erforderlich ist.

#### 4.2. Impulsauslöser

Die zeitliche Lage der Einspritzimpulse wird durch einen im Zündverteiler untergebrachten Auslöser (*Bilder 1 und 8*) bestimmt. Der Auslöser besteht im Falle der Zwei-Gruppen-Einspritzung aus zwei um 180° gegeneinander versetzten Kontaktunterbrechern, die durch einen zusätzlichen Nocken auf der Verteilerwelle betätigt werden. Jedem der beiden Unterbrecher ist eine Ventilgruppe zugeordnet. 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 den Impulsauslöser um nur etwa 5 bis 10 mm vergrößert.

#### 4.3. Saugrohrdruckfühler

Der absolute Saugrohrdruck wird in das elektronische Steuergerät kontaktlos durch einen induktiven Druckfühler eingegeben, der über eine kurze Schlauchleitung mit dem Ansaugsystem in Verbindung steht. Der Druckfühler (*Bilder 1, 8 und 9*) besteht im wesentlichen aus einem Satz evakuierter Barometerdosen, die den Anker einer Induktivität verschieben. Die damit von der Größe des Saugrohrdruckes abhängige Induktivität des Fühlers dient als zeitbestimmendes Glied für eine monostabile Kippschaltung im elektronischen Steuergerät. Das Meßsystem ist in einem Druckgußgehäuse untergebracht. Der Anker der Induktivität wird in zwei geschlitzten Blattfedern reibungsfrei geführt. Um

eine Schwingungsanregung des Fühlersystems durch den pulsierenden Druck im Ansaugsystem zu verhindern, ist am Anschlußstutzen für den Druckschlauch eine Dämpfungsdrossel angebracht. Damit trotzdem der Motor beim raschen Öffnen der Drosselklappe schnell anspricht, wird die Drosselbohrung bei raschem Ansteigen des Saugrohrdruckes durch ein Überdruckventil großen Querschnitts überbrückt.

#### 4.4. Druckschalter

Im Vollastgebiet wird durch den Druckschalter (Bilder 1 und 8) die Gemischanpassung auf höchste Leistung umgestellt. Dieser besteht aus einem Schalter mit Schnappcharakteristik und Hysterese, der von einer über eine Schlauchleitung mit dem Ansaugsystem verbundenen Membrandose betätigt wird. Im Gegensatz zum Saugrohrdruckfühler spricht der Druckschalter auf die Druckdifferenz gegen den äußeren Luftdruck (Unterdruck) im Saugrohr an, damit auch beim Fahren in großer Höhe die Vollastanreicherung wirksam wird.

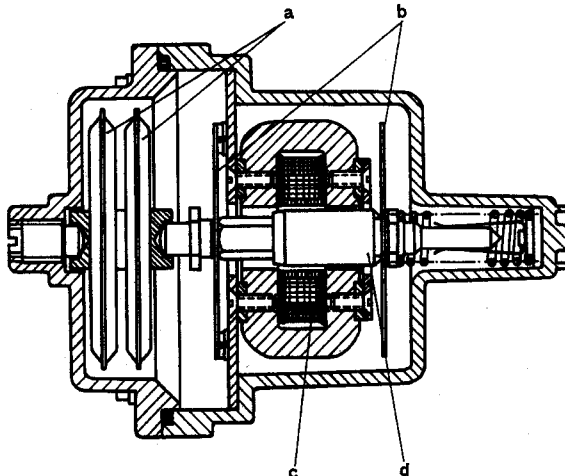


Bild 9: Saugrohrdruckfühler. a = Barometerdosen; b = Aufhängungsfedern; c = Induktivität; d = verschiebbarer Anker.

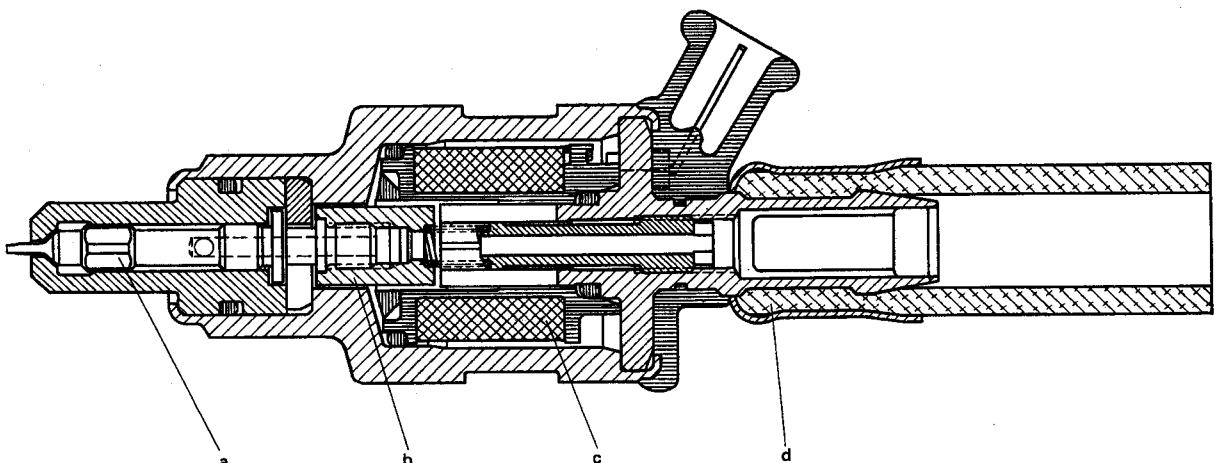


Bild 10: Einspritzventil. a = Düsenadel; b = Magnetanker; c = Magnetwicklung; d = Kraftstoffzuleitung.

#### 4.5. Drosselklappenschalter

Der Drosselklappenschalter (Bilder 1 und 8) bewirkt zusammen mit einem elektronischen Drehzahlmesser die Absperrung der Kraftstoffzufuhr im Schiebepetrieb. Er besteht aus einem Mikroschalter, der zusammen mit einem Betätigungs-nocken in ein Kunststoffgehäuse eingebaut ist, und kann direkt auf der Drosselklappenwelle angebracht werden.

#### 4.6. Temperaturfühler

Je nach den Anforderungen des auszurüstenden Motors und je nach den bei ihm vorliegenden thermischen Verhältnissen sind ein oder zwei Temperaturfühler (Bilder 1 und 8) erforderlich, die die Anpassung der Kraftstoffmenge an die Motortemperatur bewirken. Diese Temperaturfühler bestehen z. B. aus temperaturabhängigen Widerständen, die mit gutem Wärmekontakt in Schutzhüllen untergebracht sind. Die Temperaturfühler können an geeigneter Stelle des Motors, z. B. im Kühlluftstrom, Zylinderkopf, Kühlwasser oder Motoröl, eingeschraubt werden.

#### 4.7. Zusatzluftschieber

Solange der Motor seine Betriebstemperatur noch nicht erreicht hat, ist im Leerlauf zur Erzielung eines einwandfreien Rundlaufes eine zusätzliche Luftmenge erforderlich. Diese wird dem Ansaugsystem durch einen die Drosselklappe überbrückenden Luftkanal zugeführt, dessen Strömungswiderstand durch einen Drehschieber temperaturabhängig verändert wird (Bilder 1 und 8). Der Drehschieber wird durch eine Bimetallfeder betätigt; er enthält eine Kontur, mit deren Hilfe die gewünschte Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Temperatur nachgebildet wird. Der Zusatzluftschieber wird — ebenso wie die Temperaturfühler — an einer Stelle des Motors angebracht, deren Temperatur für den Betriebszustand des Motors charakteristisch ist.



#### 4.8. Einspritzventile

Die Einspritzventile (*Bilder 1, 8 und 10*) werden elektromagnetisch betätigt und dienen sowohl der Dosierung als auch der Zerstäubung des Kraftstoffes. Sie bestehen im wesentlichen aus einem Ventilkörper und der Düsennadel mit aufgesetztem Magnetanker. Der Ventilkörper enthält hinten die Magnetwicklung und vorne die Führung für die Düsennadel. Ist die Magnetwicklung stromlos, so wird die Düsennadel durch eine Feder auf ihren Dichtsitz gedrückt, der sich am vorderen Ende des Ventils befindet. Wird der Magnet erregt, so 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. Die Länge des dosierenden Ringspalt ist so kurz gehalten, daß der Einfluß von Viskositätsschwankungen im Kraftstoff auf die Dosierung vernachlässigbar ist. Anzugs- und Abfallszeit des Ventils liegen bei etwa 1 ms. Die im Laufe der Entwicklung erzielte hohe Konstanz dieser Totzeiten über die gesamte Betriebsdauer des Ventils ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, die erforderliche Genauigkeit der Einspritzmenge zu erreichen.

#### 4.9. Kraftstoffpumpe

Der Kraftstoff wird durch eine elektromotorisch angetriebene Rollenzellenpumpe (*Bilder 1 und 8*) vom Tank zu den Einspritzventilen gefördert. Das Pumpensystem selbst besteht aus einem zylindrischen Hohlraum mit Ein- und Austrittskanal, in dem eine rotierende Läuferscheibe derart exzentrisch angebracht ist, daß sich Scheibe und Hohlzylinder längs einer Mantellinie berühren. Die Läuferscheibe enthält an ihrem Umfang einige taschenförmige Aussparungen, in denen sich jeweils eine kleine Metallrolle befindet. Diese Rollen werden bei der Rotation der Läuferscheibe an die Wandung des zylindrischen Hohlraums gedrückt und wirken somit als umlaufende Dichtung. Die Pumpwirkung kommt dadurch zustande, daß durch die umlaufenden Dichtrollen am Eintrittskanal ein sich periodisch vergrößerndes, am Austrittskanal ein sich periodisch verkleinerndes Volumen gebildet wird. Die bei einem Motor mittlerer Leistung notwendige Fördermenge der Pumpe beträgt etwa 50 l/h.

#### 4.10. Kraftstofffilter

Das Kraftstofffilter (*Bilder 1 und 8*) ist ein Papierfilter in einem Kunststoffgehäuse. Es ist in die Kraftstoffleitung zwischen Tank und Pumpe eingebaut.

#### 4.11. Druckregler

Der Kraftstoffdruck wird durch den Druckregler (*Bilder 1 und 8*) auf einen konstanten Wert von 2 atü eingeregelt. Der Druckregler besteht aus einem Metallgehäuse, in dem eine federbelastete Membran beim Überschreiten des eingestellten Druckes die Öffnung zu einem Überströmkanal freigibt. Der Druck wird durch Verstellen der Vorspannung an der Gegenfeder der Membran eingestellt.

### 5. Stand der Entwicklung

Der heute erreichte und vorstehend beschriebene Entwicklungsstand ist das Ergebnis einer mehrjährigen Entwicklungsarbeit einschließlich umfangreicher Messungen an Motoren und Fahrzeugen. Fahrzeuge mit Versuchsanlagen, die in ihren grundsätzlichen Merkmalen bereits dem heutigen Stand entsprechen, laufen seit 1959.

Die Anlage wurde nunmehr zur Serienreife fertigentwickelt. Eine groß angelegte, systematische Erprobung der Einspritzanlage an einer großen Anzahl von Fahrzeugen wurde 1966 begonnen. Das Erprobungsprogramm reichte vom reinen Stadtverkehr über gemischte Stadt-, Landstraßen- und Autobahnfahrt bis zum Dauerbetrieb bei Vollast und Höchstgeschwindigkeit auf der Autobahn. Bei dieser Erprobung wurde inzwischen eine Gesamtlaufstrecke von weit über 2 000 000 km erreicht. Die Konstanz aller wichtigen Kennwerte jedes einzelnen eingebauten Aggregates sowie das Verhalten des gesamten Ottomotors einschließlich seiner Abgasemission wurden in regelmäßigen Laufzeit-Abständen überprüft. Es hat sich dabei gezeigt, daß die gesamte Einspritzanlage Laufzeiten von über 100 000 km ohne ein Auswechseln irgendwelcher Teile und ohne Nachjustierungen erreicht. Lediglich das Kraftstofffilter sollte in regelmäßigen Abständen erneuert werden.

Seit Sommer 1967 läuft die Serienfertigung der elektronischen Einspritzanlage, die erstmals beim 4-Zylinder-Motor des VW 1600 serienmäßig eingebaut wird. Die Anpassung der Anlage an diesen Motor und ihre Dauererprobung erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Volkswagenwerk.

Das Entwicklungsziel beim VW 1600 bestand vor allem in der Erreichung der nunmehr in den USA geforderten Grenzwerte für die Abgasemission. Die gewählte Anpassung der Einspritzmenge sowie auch die Einstellung des Zündzeitpunktes ist somit ein Kompromiß zwischen Abgasemission einerseits und Kraftstoffverbrauch und Fahrverhalten andererseits. Trotzdem war es möglich, neben sehr günstigen Abgaswerten gleichzeitig noch ein sehr gutes Fahrverhalten und eine beachtliche Senkung des Kraftstoffverbrauches zu erzielen.

Für die Fahrt auf horizontaler Straße mit konstanten Geschwindigkeiten von 32, 48, 80 und 120 km/h wurden bei Verbrauchswerten von 5,5, 5,1, 6,0 und 9,8 l/100 km CO-Emissionen von 0,15 bis 0,3% und Kohlenwasserstoffemissionen von 20 bis 100 ppm erreicht. Die im Kalifornientest [6; 20] beim VW 1600 erzielten Emissionswerte liegen bei etwa 0,3 bis 1,0% CO und etwa 180 bis 270 ppm unverbrannter Kohlenwasserstoffe (zulässig: 2,3% CO und 410 ppm Kohlenwasserstoffe). Der Kraftstoffverbrauch verringerte sich im gemischten Streckenbetrieb um etwa 1,0 bis 1,3 l/100 km; im Stadtverkehr ist die Ersparnis je nach Verkehrsdichte, Straßenverhältnissen und Fahrweise wesentlich höher. Gleichzeitig konnten das Drehmoment fast im gesamten Drehzahlbereich erhöht sowie die Elastizität des Motors und die Gleichmäßigkeit der Verbrennung in den einzelnen Zylindern verbessert werden.

### Literatur

- [1] O. Eberle: Bosch Einspritzausrüstung für 4-Takt-Ottomotoren mit Mengenteiler-Saugrohreinjection. MTZ 20 (1959), S. 331—334.
- [2] H. Scherenberg: Der Erfolg der Benzineinspritzung bei Daimler-Benz. MTZ 22 (1961), S. 241—245.
- [3] U. Anders: Entwicklungsprobleme der Benzineinspritzung von Personwagenmotoren. ATZ 63 (1961), S. 315—321.
- [4] H. Grözinger: Die Benzineinspritzung des 230 SL-Motors von Daimler-Benz. ATZ 65 (1963), S. 166—169.
- [5] R. Schenk: Kraftstoff-Einspritzung beim Peugeot 404. ATZ 65 (1963), S. 169—172.
- [6] H. Knapp, E. U. Joachim u. G. Baumann: Beeinflussung der Kraftfahrzeugabgase durch Benzineinspritzung. Bosch Techn. Berichte 1 (1965), S. 206—220, und MTZ 26 (1965), S. 353—361.
- [7] J. H. Freeman Jr. and R. C. Stahman: Vehicle Performance and Exhaust Emission, Carburation Versus Timed Fuel Injection. SAE Journal 74 (1966), S. 70—75.
- [8] J. H. Freeman Jr. and R. C. Stahman: Vehicle Performance and Exhaust Emission. SAE-Paper No. 650 863 (1965).
- [9] M. Nonnenmann: Der Einfluß der äußeren Gemischaufbereitung auf das Verhalten des Viertakt-Ottomotors. ATZ 68 (1966), S. 385—392.
- [10] Lucas-Einspritzsystem für 4-Zylinder-Motoren. Automobil Revue 61 (1966), Nr. 25, S. 21.
- [11] H. May und H. Schulz: Benzineinspritzung bei Kraftwagenmotoren. Leistung, Wirtschaftlichkeit und Abgaszusammensetzung bei Anwendung eines Scheibenteilersystems. MTZ 28 (1967), S. 167—173.
- [12] H. Luther, K. Löhner, H. Müller u. W. Zander: Möglichkeiten einer Entgiftung der Abgase von Ottomotoren. Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 18 (1965), S. 964—972.
- [13] Aeroplani Caproni und O. Fuscaldo: Elektromagnetisch gesteuerte Brennstoffeinspritzvorrichtung für Brennkraftmaschinen. Österr. Pat. 159 755 (11. 11. 1940).
- [14] Aeroplani Caproni und O. Fuscaldo: Schaltvorrichtung zur elektromagnetischen Steuerung von Brennstoffeinspritzventilen bei Brennkraftmaschinen. Österr. Pat. 160 182 (25. 2. 1941).
- [15] A. H. Winkler and R. W. Sutton: Electrojector — Bendix Electronic Fuel Injection System. SAE Transactions 65 (1967), S. 758—768.
- [16] R. Brüning: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung für Verbrennungsmotoren. Funk-Technik 18 (1963), Heft 23, S. 862—864.
- [17] Electronically Controlled Petrol Injection. Automobile Engineer 56 (1966), S. 461—465.
- [18] J. Zeyns u. K. Müller: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung. I. Aufbau der elektronisch gesteuerten Benzineinspritzung. MTZ 28 (1967), Heft 1, S. 10—12.
- [19] J. Zeyns u. K. Müller: Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung. II. Versuchsergebnisse an einem 6-Zylinder-Einspritzmotor. MTZ 28 (1967), Heft 1, S. 13—16.
- [20] Control of Air Pollution From New Motor Vehicles and New Motor Vehicle Engines. US Federal Register 31 No. 61 Part. II, 30. 3. 1966.

Das Kaltstartverhalten der elektronischen Benzineinspritzung ist gut. Beim VW 1600 sind bis  $-24^{\circ}\text{C}$  keine besonderen Maßnahmen erforderlich. Ein zusätzliches Einspritzventil im Ansaugsammler ermöglicht nochmals eine wesentliche Herabsetzung dieser Kaltstartgrenze.

Heißstartschwierigkeiten wurden bei der beschriebenen Anlage bis zu Außentemperaturen von  $+40^{\circ}\text{C}$  nicht beobachtet. Durch zusätzliches Erhöhen des Kraftstoffdruckes während des Startens kann der Heißstart auch bei den höchsten vorkommenden Außentemperaturen sicher beherrscht werden.

Es hat sich gezeigt, daß die Anlage sehr einfach und mit geringem Raumbedarf eingebaut werden kann. Die einzelnen Elemente brauchen nicht besonders aufeinander abgestimmt zu sein und sind voll austauschbar. Nach den bisherigen Erfahrungen ist auch ein Einjustieren der Anlage am Motor nicht erforderlich.