

A 58

Bericht Nr. 523

**Ein Gerät zur Messung von Bewegungen
nach dem Trägerfrequenzverfahren**

9208



**I. G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT
LUDWIGSHAFEN AM RHEIN**

Ein Gerät zur Messung von Bewegungen

nach dem Trägerfrequenzverfahren

Inhaltsverzeichnis

1.) Einleitung	3. 3
2.) Messverfahren	3
3.) Aufbau des Gerätes	5
a) Der Geber	5
b) Der Hochfrequenz-Sender	6
c) Der Verstärker mit Braunscher Röhre	7
4.) Nachprüfung des Gerätes	10
a) Durchführung der Nachprüfung	10
b) Ergebnisse	12
5.) Statische Messungen mit dem Gerät	13
a) Durchführung und Ergebnisse	13
b) Folgerungen	16
6.) Aufnahmen mit dem Gerät	17
a) Hubverlauf für verschiedene Düsen	17
b) Hubverlauf für eine Düse bei verschiedenen Drehzahlen	19
c) Hub- und Druckverlauf für eine Düse bei verschiedenen Einspritzmengen	20
7.) Bemerkungen	20

1.) Einleitung:

Ähnlich wie im Rundfunk elektrische Schwingungen sehr hoher Frequenz, der sog. Trägerfrequenz, durch die niederfrequenten Schwingungen der Sprache oder der Musik elektrisch moduliert, d.h. in ihrer Amplitude gesteuert werden, so lässt sich diese Amplitudensteuerung auch durch rein mechanische Bewegung ^{en} direkt herbeiführen. Koppelt man beispielsweise eine Hochfrequenzspule, die mit Hochfrequenzspannung gespeist ist, mit einer zweiten Spule mehr oder weniger fest, wodurch die Gegeninduktivität beider Spulen sich ändert, so wird in letzterer ein von dem Kopplungsgrade der Spulen abhängige Spannung induziert. Dabei richtet sich die Höhe der induzierten Spannung nicht nach der Geschwindigkeit der Bewegung. Die entstehende Spannung ist unabhängig von der Schnelligkeit, mit der die Kopplung, also die Gegeninduktivität beider Spulen geändert wird. Auf dieser Tatsache beruht das in folgendem beschriebene Messverfahren zur Bestimmung von Bewegungen. Es muss daher grundsätzlich sowohl für beliebig langsame als auch für beliebig schnelle Bewegungen gleich gut verwendbar sein.

Im vorliegenden Falle interessierte nun besonders die Ermittlung des Nadelhubs von Einspritzdüsen. Die Verwendung eines Verfahrens der angegebenen Art bringt dann den Vorteil mit sich, dass man die Höhe des Nadelhubs durch statische Eichung ermitteln kann. Ausserdem erlaubt das Verfahren insbesondere einen sehr gedrängten und sehr robusten Aufbau, was im Hinblick auf die äusserst starken Erschütterungen an der Düse von grösster Bedeutung ist.

2.) Messverfahren:

Die interessierende Bewegung muss also die Kopplung zwischen einer mit hochfrequenter Spannung beschickten Spule -im folgenden mit Senderspule bezeichnet- und einer weiteren Spule -im folgenden mit Empfänger- oder Messspule bezeichnet- ändern. In letzterer entsteht dann eine hoch

frequente Spannung, deren zeitlichen Amplitudenverlauf der Kopplungsänderung und damit der Bewegung entspricht (Bild 1). Die Messpule liefert

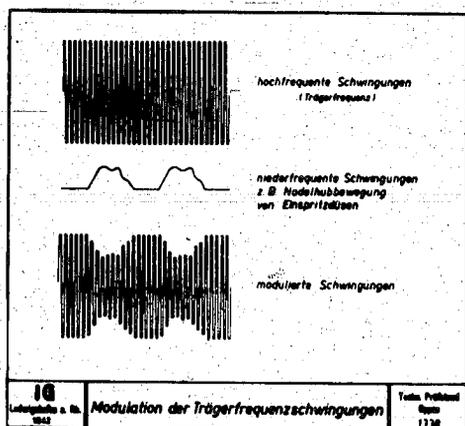


Bild 1

also eine durch die mechanische Bewegung gesteuerte oder auch modulierte Hochfrequenzspannung. Dabei "tragen" die Hochfrequenzschwingungen die der mechanischen Bewegung entsprechenden niederfrequenten Schwingungen. Die verwendete Hochfrequenz heisst daher "Trägerfrequenz". Das ganze Verfahren ist also ein Trägerfrequenzverfahren. Da auf der anderen Seite durch die Kopplungsänderung die gegenseitige Induktivität beider Spulen geändert wird, werden solche Verfahren auch als gegeninduktive Verfahren bezeichnet.

Zur Ermittlung der mechanischen Bewegung, die ja allein interessiert, muss nun die hochfrequente Schwingung von der niederfrequenten getrennt werden. Man hat dann letztere allein und kann dann die üblichen Methoden zur Bestimmung ihrer Amplituden, ihres Verlaufs usw. anwenden. Im vorliegenden Fall wurde wegen der mannigfachen Vorteile zur Darstellung des Bewegungsverlaufs die Braunsche Röhre gewählt.

3.) Aufbau des Gerätes

Das Gerät besteht im wesentlichen aus einem Geber, in dem durch den Bewegungsvorgang die Gegeninduktivität der Spulen geändert wird, dem Hochfrequenzsender und dem Verstärker mit der Braunschen Röhre.

a) Der Geber

Der Aufbau des Gebers richtet sich einerseits nach der Art, in der man die Kopplungsänderung vornehmen will und andererseits nach dem zur Verfügung stehenden Raum. Ganz allgemein können die in der Funktechnik üblichen Hochfrequenzspulen Anwendung finden. Doch wird man oft aus Gründen der Raumsparnis von deren Verwendung Abstand nehmen müssen. Tatsächlich kann man nämlich auch mit sehr kleinen Spulen (von etwa 5 mm Durchmesser oder auch weniger) auskommen.

Im einfachsten Falle wählt man 2 Spulen und trifft deren Anordnung so, dass die eine davon feststeht, während die andere mit ihr gekoppelte, von dem interessierenden Vorgang bewegt wird. Man kann aber auch beide Spulen feststehen lassen und die gegenseitige Induktivität durch Eintauchen eines Metallstabes ändern. Diese Art der Kopplungsänderung hat den Vorzug, dass man dabei alle Zuführungsdrähte fest verlegen kann. Dieser Gesichtspunkt war besonders im vorliegenden Fall der Untersuchung des Nadelhubs von Einspritzdüsen wegen der äußerst starken mechanischen Beanspruchungen von entscheidender Bedeutung. Es wurde daher hier diese Art der Kopplungsänderung gewählt. Jedoch wurden statt zweier kleiner Spulen

deren drei verwendet, die axial übereinander angeordnet waren. Die beiden Äusseren wurden dabei gegeneinander geschaltet. Dadurch wird einerseits die Empfindlichkeit der Messung erhöht und andererseits kann man dadurch erreichen, dass sich die Wirkung der Äusseren Spulen auf die mittlere oder auch umgekehrt teilweise oder ganz aufheben lässt, was bei Verwendung von zwei Spulen nicht möglich ist. Man kann nun die beiden Äusseren Spulen oder auch die mittlere Spule als Sender- bzw. Messspulen wählen. Diese beiden Möglichkeiten unterscheiden sich nur durch ihre Empfindlichkeit. Man hat also hier durch einfaches Vertauschen der Anschlüsse die Möglichkeit, die Empfindlichkeit zu ändern.

Die ungefähren Abmessungen der Spulen und des Metallstiftes, im folgenden auch Messstift genannt, und ein Beispiel für den Anbau des Gebers an die Düse, gehen aus Bild 2 auf Blatt 1 hervor. Der Wickelraum jeder Spule beträgt $4 \times 1 \text{ mm}^2$ bei etwa 7,5 mm mittlerem Durchmesser. Bei einer Drahtstärke von 0,05 mm Durchmesser hat jede Spule etwa 150 Windungen und 25 Ohm. Der Messstift hat einen Durchmesser von 3,5 mm. Er wird auf die rückwärtige Verlängerung der Düsennadel aufgeschraubt, oder auch sonstwie, s.B. wie im Bild dargestellt, am unteren Federteller der Düse befestigt. Da es nur auf die Relativbewegung von Metallstift zu den Spulen ankommt, so wird noch der Spulenkörper am Düsenkörper befestigt (s. Bild 2). Wegen der langanhaltenden starken mechanischen Erschütterungen muss die Ausführung sehr kräftig sein. Um nun jederzeit in der Lage zu sein, die Grösse des Hubes anzugeben, zeigt der Aufbau des Bildes 2 noch eine kleine Vorrichtung, die gestattet, den Spulenkörper um eine an einer Teilung ablesbare Strecke zu heben oder zu senken.

b) Der Hochfrequenz-Sender

Zur Erzeugung der hochfrequenten Schwingungen der Trägerfrequenzdiente ein besonderer Sender, dessen Schaltung aus dem vollständigen Schaltbild vom Düsenadelhub-Gerät (Bild 3 auf Blatt 2, rechts oben) hervorgeht.

Es wurde eine der Huth-Kühn'schen Schaltung gewählt. Jedoch fehlt hier die Abstimung des Gitterkreises. Die Rückkopplung erfolgt kapazitiv über den Kondensator C 10, wodurch in einfacher Weise der Grad der Rückkopplung geändert werden kann. Ausserdem hat die kapazitive gegenüber der induktiven Rückkopplung den Vorteil, dass man auf den zur Verwendung kommenden Hochfrequenzkernen noch genügend Wickelraum für die Ankopplung der Senderspule des Gebers hat. Die Amplituden der Schwingungen werden durch Verwendung der Audionschaltung begrenzt. (R_{13} , C_{11}). Als Senderöhre dient die Triode AC 2. Die Daten der Schaltelemente wurden so gewählt, dass sich eine Frequenz von etwa 400 MHz ergab.

Die Anwendung einer so hohen Frequenz hat verschiedene Vorzüge: Einerseits ist die Steuerung der Hochfrequenzamplituden durch die niederfrequente Schwingung umso einwandfreier, je dichter die einzelnen hochfrequenten Schwingungen aufeinander folgen, d.h. aber je höher die Trägerfrequenz ist; andererseits nimmt die Güte der Kopplung zweier Spulen mit wachsender Frequenz zu. Ferner ist die bereits oben angedeutete Trennung der niederfrequenten von den hochfrequenten Schwingungen umso einwandfreier möglich, je grösser ihr Frequenzunterschied ist.

c) Der Verstärker mit Braunscher Röhre

Die vollständige Schaltung des Düsennadelhubgerätes geht aus Bild 3 hervor. Der Eingangsregler P_1 erhält seine Spannung von der Messpule her über gewöhnliches, doppeladriges, jedoch gut abgeschirmtes Kabel. Über ein eben solches Kabel wird auch die Hochfrequenzspannung vom Sender her der Senderspule zugeleitet. Das bedingt wohl gewisse Verlust gegenüber der Verwendung von besonderem, kapazitätsarmen Kabel, doch wurde dieser Nachteil im Hinblick auf die bei der Anwendung von gewöhnlichem Kabel sich ergebende Vorteile in Kauf genommen.

Der Eingang des Verstärkers ist rein ohmisch und erlaubt in einfachster Weise gute Anpassung. Der an Regler P_1 abgegriffene Teil der

Messspannung wird zunächst über die zwei Trioden A C 2 verstärkt und dann der Gleichrichterröhre AB2 zugeleitet. Nach Einweggleichrichtung erfolgt die Siebung, im vorliegenden Falle die Trennung der Nieder- von der Hochfrequenz, über die Schaltelemente R 6, R 7, R 8, C 7, C 8, die so bemessen sind, dass sie die niederfrequente Schwingung nicht beeinflussen, wohl aber die hochfrequente Schwingung vollends unterdrücken. An dem Ableitwiderstand R 8 kann dann die der Bewegung des Stiftes entsprechende Spannung abgegriffen werden. Allgemein ist die so erhaltene Spannung noch zu gering, um genügende Ausschläge auf dem Schirme einer Braunschen Röhre hervorzurufen. Sie wird daher, wie das Schaltbild zeigt, noch dem Steuergitter einer Verstärker- röhre -der Penthode R E N S 1264- zugeführt, an die eine der Höhenablenk- platten der Braunschen Röhre angeschlossen ist. Diese letztere Stufe ist als Gleichstromverstärkerstufe ausgeführt, um die Apparatur jederseits statisch eichen zu können. Damit man immer das Bild der interessierenden Bewegung auf dem Röhrenschirme hat, muss noch der Ableitwiderstand R 8 auf eine gewisse positive Spannung geladet werden (R 34, R 35). Dann kann man mittels des Reglers P 3 den Leuchtpunkt, unabhängig von der Stellung des Eingangsreglers P 1, stets die gewünschte Lage geben. Um einen möglichst grossen und linearen Aussteuerbereich zu erhalten, ist als Anodenspannung der RENS 1264 560 Volt gewählt. Die Buchse M 1, die über den Widerstand R 10 an die Anode der Verstärkeröhre führt, gestattet noch die Einstreuung von Markierungen.

Das Schaltbild zeigt weiter noch den Netzteil der Braunschen Röhre und eine Anordnung zur Erzeugung von Kippspannungen. Da die von dem Netztrafo Tr 1 gelieferte Wechselspannung von 800 Volt für die Braunsche Röhre (Type E 1-18/1 von Löwe Radip, AG) zu gering ist, wurde mit der Sekundärwick- lung von Tr 1 noch die eines weiteren Trafos (Tr 2) in Serie geschaltet. Dieser Trafo liefert 2 x 220 V, sodass man nach Gleichrichtung über die Röhre HG 3020 auf 1400 bzw. auf 1700 Volt negativer Spannung kommt.

Der Kippschwingteil dient zur Erzeugung der für die seitliche Ablenkung des Kathodenstrahls notwendigen Spannung. Die Kippschwingung wurde jedoch allgemein nicht verwendet; sie ist durch die Schalter S 2, S 3 abschaltbar. Vielmehr wurde für alle weiter unten gebrachten Aufnahmen das im Technischen Prüfstand entwickelte Seitenablenkgerät verwendet. Der Regler P 8 gestattet noch das gesamte Diagramm seitlich zu verschieben.

Bild 4 zeigt eine Aufnahme des Düsenadelhubmessgerätes, an dem die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurden. Die verwendete



Bild 4: Ansicht des Gerätes

Braunsche Röhre hat einen Schirm von 180 mm Durchmesser. Der Apparat ist noch mit einem Piezo-Indikator kombiniert, sodass wahlweise dessen Ausgang oder der des Düsenadelhubmessgerätes durch Umlegen eines Schalters an die Braunsche Röhre angeschlossen werden kann. Der Vollständigkeit halber sei noch die Schaltung des Indikators in Bild 3a auf Blatt 4 gebracht. Sie unterscheidet sich von den bereits früher angegebenen Schaltbildern dieser Art besonders dadurch, dass die Anodenstromabhängigkeit der Elektrometer-Röhre durch Einschalten eines Widerstandes in die negative Zuleitung zum Heißfaden wesentlich herabgesetzt ist. Die Lage des Leuchtpunktes ist daher nicht mehr so stark von etwaigen Schwankungen der Netzspannung abhängig. Auf Bild 4 ist weiter noch der gesamte Geber einschliesslich Messstift zu erkennen.

Die soeben angeführte Verwendung einer Einstrahlröhre zu nahezu gleichzeitiger Beobachtung zweier ganz verschiedener Vorgänge erwies sich als äusserst vorteilhaft. Versetzt man nämlich die zwei interessierenden Vorgänge auf dem Röhrenschirme so, dass die Kurven einander nicht schneiden, so kann man z.B. genau die gleichen Fotoaufnahmen erhalten, wie bei einer Doppelstrahlröhre; man muss die Kurven nur nacheinander auf den gleichen Filmstreifen aufnehmen.

4.) Nachprüfung des Gerätes:

a) Durchführung der Nachprüfung

Oblgleich das dem Messverfahren zugrunde liegende Prinzip einen einfachen Aufbau der gesamten Apparatur gestattet, so erschien es doch ratsam, die einwandfreie Arbeitsweise der Anordnung einmal nachzuprüfen. Zu diesem Zweck wurde eine kleine Vorrichtung gebaut, die erlaubt, schnellere und ganz langsame Bewegungen miteinander zu vergleichen. Den Aufbau dieser dynamischen Eichvorrichtung bringt Bild 5⁶. Sie ist auf eine Einspritzpumpe anstelle des Druckventils aufgeschraubt. Die geforderte vertikale Bewegung des

Messtiftes kommt durch die Bewegung eines Stössels zustande, auf den der Stift geschraubt ist und der durch eine starke Feder allgemein bis zum einen Anschlag nach unten gedrückt wird. Wird nun die Pumpe, wie üblich angetrieben, so bewegt sich ihr Kolben bis zu einer gewissen Höhe, um dann wieder zurückzugehen. Steht der Stössel zunächst so hoch, dass sein unteres Ende das obere des Kolbens höchstens gerade berührt, so erfolgt noch keine Bewegung des Stössels. Nun kann man aber durch Verstellen der Führung des Stössels diesen soweit senken, dass er auf den Pumpenkolben drückt, wenn dieser den oberen Teil seines Weges durchläuft. Diese Wegstrecke durchlaufen dann infolge der Federung beide gemeinsam. Der "Hub" des Messtiftes ist also durch die Lage des Stössels bestimmt und sein Verlauf richtet sich danach, ob die Pumpe mit einem Exzenter oder einem Nocken arbeitet. Zur Feststellung der Grösse dieses Hubes befindet sich noch auf einer Überwurfmutter eine Einteilung, die mit Hilfe eines Zeigers die Ablesung der Verstellung der Führung des Stössels gestattet. Mit Hilfe einer Klemmschraube kann noch die Führung arretiert werden. Die Anbringung des Gebers erfolgt an einem Stutzen, der über zwei Haltebügel an der Hubvorrichtung befestigt ist.

Diese Vorrichtung wurde nun dazu benutzt, um einerseits die Abhängigkeit der Höhe des Hubes und andererseits die Abhängigkeit der Dauer des Hubes von der Drehzahl der Pumpe zu ermitteln. Erstere wurde unmittelbar auf der Braunschen Röhre bestimmt, indem bei seitlicher Ablenkung des Kathodenstrahls durch das TP-Seitenablenkgerät die Höhe des Ausschlages für verschiedene Hubhöhen bei wachsender Drehzahl beobachtet wurde. Sodann wurde der Antriebsmotor abgestellt und die Pumpe von Hand aus langsam durchgedreht. Diese Messungen wurden sowohl für einen Nocken als auch für einen Exzenter in der Einspritzpumpe durchgeführt. Zur Ermittlung der Dauer des Hubes wurde der entsprechende Verlauf auf der Braunschen Röhre mit Hilfe des Seitenablenkgerätes so auseinandergezogen, dass 60° der ganzen Ablenkungsbreite entsprachen. Die Dauer des Hubes wurde dann teils durch

direktes Ausmessen auf dem Röhrenschirm, teils aus Fotoaufnahmen des Hubverlaufs ermittelt. Geändert wurde dabei sowohl die Drehzahl als auch die Hubhöhe. Auch hier wurde die Dauer für den Exzenter und für den Nocken bestimmt. Nach dieser dynamischen Messung wurde die Pumpe noch mit der Hand durchgedreht und mittels eines besonderen Winkelmessers mit Noniuseinteilung der Winkel zwischen Hubbeginn und Hubende ermittelt, wobei die gerade beginnende bzw. gerade endende Strahlverschiebung auf der Braunschen Röhre diese Stellungen sehr genau erkennen liess.

b) Ergebnisse:

Bei Verwendung eines Nockens wird der Pumpenkolben und damit der Stößel mit dem aufgeschraubten Messstift wesentlich schneller als durch einen Exzenter bewegt. Entsprechend wird auch die Eichvorrichtung dadurch insbesondere bei höheren Drehzahl^{en} viel stärker beansprucht und es ist so auch eine viel schärfere Prüfung der Messapparatur möglich. Das ist auch aus den Kurvenverläufen auf der Braunschen Röhre ersichtlich, von denen zwei in Bild 6 auf Blatt 7 wiedergegeben sind. Die Aufnahmen sind bei gleicher Drehzahl (900 U/min) gemacht und lassen erkennen, dass bei Verwendung eines Nockens zusätzliche Schwingungen am Anfang des Hubes auftreten, während die Kurve für den Exzenter vollständig glatt ist. Diese Schwingungen, die die Höhe des Hubes nicht beeinflussen, sind schon von 600 U/min an bemerkbar, während sich für den Exzenter erst bei 1200 U/min ähnliche Überlagerungen ergeben. Wie eine genaue Untersuchung dieser unerwünschten Schwingungen ergab, rühren sie von dem Pumpenkolben her. Sie liessen sich am einfachsten dadurch beseitigen, dass während des Umlaufs der Stößel fest mit der Hand nach unten gedrückt wurde. Bei der Abwärtsbewegung des Stößels entstehen weiter infolge des harten Auftreffens auf den Anschlag Prellungen, wie dies auch aus der Aufnahme für den Nocken am Ende der Hubbewegung zu ersehen ist. Während die Prellungen das Ende des Hubes nicht ändern, also die Messung nicht stören, sind die obigen Schwingungen sehr

hinderlich, da sie ein umso früheres Anheben des Stössels zur Folge haben, je höher die Drehzahl ist (bis zu 2° Kw etwa). Sie mussten daher bei der Messung der Hubdauer unbedingt unterdrückt werden, was in oben angegebener Weise geschah.

Bei den so durchgeführten Messungen wurde sowohl für die Hubhöhe als auch für die Hubdauer bei Verwendung eines Exzenters oder eines Nockens Unabhängigkeit von der Drehzahl (von 500 U/min bis zur höchst erreichbaren Drehzahl von 1200 U/min) gefunden. Auch die rein statischen Messungen ergaben entsprechende Werte. Das oben beschriebene Gerät erlaubt somit, einerseits die Höhe von Ausschlägen von dynamischen Vorgängen durch rein statische Eichmessungen zu ermitteln und andererseits die Dauer dieser Vorgänge unmittelbar aus dem Bild auf der Braunschen Röhre abzulesen, bzw. aus dessen Aufnahme auszumessen.

5.) Statische Messungen mit dem Gerät

a) Durchführung und Ergebnisse

Sodann wurde noch eine Reihe von rein statischen Messungen mit dem Ziele durchgeführt, den Einfluss verschiedener Faktoren näher kennen zu lernen.

Zunächst erwies es sich für den Aufbau des Gebers nach Bild 2 als günstiger, mit 3 anstatt mit 2 Spulen zu arbeiten, wovon die beiden äusseren einander entgegengesetzt geschaltet sind. Vor allem zeigte sich, dass die Empfindlichkeit bei dem dreispuligen Geber davon abhängt, ob die mittlere oder die äusseren Spulen als Senderspulen gewählt werden. Im ersteren Falle ergab sich eine etwa fünfmal grössere Empfindlichkeit. Die Gründe für letztere Tatsache dürften wohl in der für Änderungen der Gegeninduktivität günstigeren Feldverteilung zu suchen sein. Doch wurde darauf nicht weiter eingegangen. Wegen der Möglichkeit, die Empfindlichkeit bei Verwendung von drei Spulen in einfachster Weise stark ändern zu können, wurden alle Messungen mit 3 Spulen bei Gegenschaltung der beiden äusseren durchgeführt.

Was zunächst absolute Zahlenwerte für die Empfindlichkeit an-
 betrifft, so soll hier von deren Angabe allgemein abgesehen werden, da
 sich die Empfindlichkeit sehr leicht in weiten Grenzen ändern lässt. Es
 sei daher nur deren Grössenordnung genannt. Die maximal im vorliegenden
 Fall erreichte Empfindlichkeit betrug etwa 40 mm Ausschlag auf der Braun-
 schen Röhre für 0,1 mm Verstellung des Messtiftes ($E = 40 \text{ mm}/0,1 \text{ mm}$) bei
 Verwendung der Spulen in der unempfindlicheren Schaltung. Gearbeitet wur-
 de indessen meist mit einer Empfindlichkeit von 10-20 mm/0,1 mm, die für
 die meisten Düsen vollständig ausreicht.

Die Empfindlichkeit ist sehr stark von der Stellung und von
 dem Werkstoff des Messtiftes abhängig, wie aus Bild 7 zu ersehen ist.

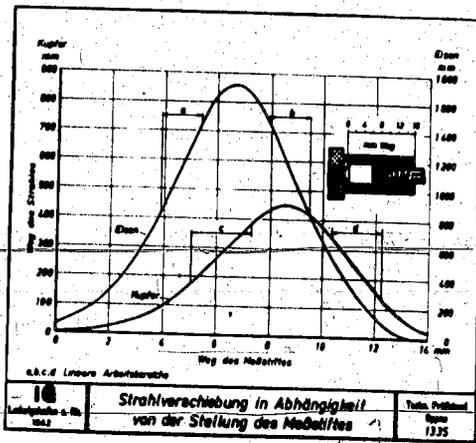


Bild 7

Es ist dort für zwei Metalle, für Eisen und Kupfer, als Stiftmaterial,
 die Strahlverschiebung als Funktion des Lages des Stiftes aufgetragen,
 wobei nur das Stück der Kurve herausgegriffen wurde, das wesentliche

Strahlverschiebungen aufweist. Die mittlere Spule war dabei die Messspule. Der Nullpunkt für die Abszisse war dadurch gegeben, dass der Stift bis zum Anschlag eingeschoben wurde. Sodann wurde er zurückgedreht und die Verschiebung des Leuchtflecks gemessen. Damit dieser immer auf dem 180 mm breiten Röhrenschirme bleibt, muss er nach Durchwandern einer Strecke von etwa 130 mm mit Hilfe des Reglers P 3 wieder auf seinen Ausgangspunkt zurückgeholt werden. Es wurde also immer auf dem gleichen Stück der Kennlinie der Röhre RENS 1284 gearbeitet. Der Nullpunkt der Ordinate ist willkürlich gewählt.

Betrachten wir zunächst den Kurvenverlauf für Eisen. Bei Durchschieben des Messtiftes ist anfangs die Strahlverschiebung gering. Die Empfindlichkeit, die ja durch die Steigung im jeweiligen Punkt der Kurve gegeben ist (E - Strahlverschiebung in mm/0,1 mm Verschiebung des Kernes), ist dann ebenfalls gering. Nach etwa 1,5 mm Weg des Messtiftes ändert sich die Empfindlichkeit merklich; sie nimmt dann bis zu einem Maximalwert zu (etwa 40 mm/0,1 mm bzw. 200 mm/0,1 mm bei Verwendung der äusseren Spulen als Messspulen) bleibt nun für etwa 1,5 mm konstant, um dann allmählich wieder auf Null zurückzugehen. Dreht man den Stift noch weiter heraus, so wandert der Leuchtpunkt in umgekehrter Richtung und die Empfindlichkeit durchläuft ungefähr die gleichen Werte, nur in umkehrtem Sinne. Der konstante Bereich höchster Empfindlichkeit ist hierbei ebenfalls etwa 1,5 mm lang. Nach etwa 14 mm Weg ist sie wieder auf Null gesunken.

Aus der Umkehr des Strahlweges folgt z.B., dass sich Bilder von Düsenadelhub-Kurven für die zwei obige Zonen maximaler Empfindlichkeit nur dadurch unterscheiden, dass sie spiegelbildlich zueinander sind.

Für andere Metalle als für Eisen ergeben sich ganz entsprechende Kurven. Bild 7 zeigt noch den Verlauf für Kupfer. Während zunächst die gesamte Strahlverschiebung bei Eisen über 1600 mm (Zahlen sind nur Relativzahlen) beträgt, hat diese für Kupfer nur den Wert 450 mm. Die maximale

Empfindlichkeit beträgt hier nur etwa den vierten Teil von der des Eisens. Was besonders auffällig ist, ist die Verschiebung der empfindlichsten Zone und die des Umkehrpunktes ($E=0$) des Strahles. Andere Nichteisenmetalle, z.B. Aluminium, verhalten sich ähnlich wie Kupfer, während z.B. Silberstahl ein dem Eisen sehr ähnliches Verhalten zeigt.

Was die Formgebung des freien Endes des zylindrischen Stiftes betrifft, so wird das genannte Ergebnis davon nur wenig beeinflusst. Vor allem bleibt die maximal erreichbare Empfindlichkeit die gleiche. Bis zu 30° zugespitzte Stifte ergaben kaum eine Änderung.

Dagegen hat der Durchmesser der Stifte grösseren Einfluss, der besonders stark bei Nichteisenmetall ist. So sinkt die gesamte Strahlverschiebung auf den 30. Teil bei Verwendung eines 1 mm starken Kupferstiftes gegenüber eines solchen von 3,5 mm. Auch die Empfindlichkeit geht stark zurück. Bei Eisen ist der entsprechende Rückgang der gesamten Strahlverschiebung nur $1/8$, sodass man hier trotz des dünnen Stiftes durch Änderung des Reglers P_1 noch die halbe maximale Empfindlichkeit wie oben erreichen kann. Besonders bei den dünneren Metallstiften zeigt sich am Anfang und Ende des Weges nochmals eine Umkehr des Kurvenverlaufs; die Strahlverschiebungen sind hier jedoch nur noch gering.

b) Folgerungen

Um einen linearen Zusammenhang zwischen Verschiebung des Messtiftes und der des Strahles zu erhalten, muss man den Stift so einstellen, dass man in einer der Zonen maximaler Empfindlichkeit arbeitet (in Bild 7 mit a, b, c und d bezeichnet). Die Lage dieser Zonen ist für Eisen und Nichteisenmetall verschieden. Die Kurvenläufe des Bildes 7 legen nahe, anstatt der hier gewählten, einfachen, zylindrischen Form des Messtiftes etwa einen kurzen Zylinder von der Länge, die der mittleren Entfernung der obigen Zonen (etwa 4,5 mm) entspricht, zu benutzen, wobei der kleine Zylinder durch einen wesentlich

dünnen Stift zu führen wäre. In dieser Richtung angestellte orientierende Versuche ergaben z.T. wohl grössere Empfindlichkeit, doch stellte sich dabei heraus, dass die Verhältnisse nicht so einfach liegen, wie man auf Grund der Kurven erwarten sollte. Da sich ausserdem die entsprechende Anordnung lang nicht so stabil wie die obige ausführen lässt, wurde diese Art der Ausführung des Messtiftes keine weitere Beachtung geschenkt.

Wie ferner die Messungen bei verschiedenen Querschnitten des Messtiftes zeigen, ist es besonders bei Verwendung von Nichteisenmetallen am günstigsten, möglichst grosse Durchmesser zu wählen. Grosse Querschnitte erhöhen ausserdem die Stabilität, da seitliche Schwingungen des Messtiftes nicht so leicht auftreten können.

Wenn auch die statischen Messungen mit verschiedenen Metallen als Messtift eindeutig zu Gunsten des Eisens sprechen, so wurde hier dennoch allgemein von dessen Verwendung abgesehen. Bei den immerhin sehr raschen Bewegungen der Düsenadel während des Einspritzvorganges könnte sich vielleicht doch eine von etwa vorhandenem Magnetismus herrührende Fälschung des Kurvenverlaufes ergeben.

6.) Aufnahmen mit dem Gerät

a) Hubverlauf für verschiedene Düsen

In den Bildern 8 bis 12 des Blattes 6 sind die Hubverläufe für verschiedene Einspritzdüsen als Beispiele gebracht. Bei diesen und auch den weiteren Bildern wurde zur seitlichen Ablenkung des Kathodenstrahls das TP-Seitenablenkgerät verwendet, das so angeschlossen war, dass die interessierenden Hubverläufe in der 60° Kw-Ablenkung lagen. Die Zeitachse geht dabei von links nach rechts. Die Rückführung des Strahls findet in 300° Kw statt, sodass die Grundlinie wesentlich lichtstärker ist. Alle Aufnahmen wurden bei 800 U/min, d.h. bei etwa 13 Einspritzungen/sec gemacht. Als Abspritzflüssigkeit diente durchweg Sonder-Dieselmotorenkraftstoff 2 (S.D.K.2).

Bild 8 zeigt zunächst die Hubverläufe für eine Lochdüse A, deren normale Einspritzmenge etwa $30 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ beträgt. Bei der Einspritzmenge (EM) von $20 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ ist der Hub noch nicht begrenzt, bei der doppelten Menge findet eine Begrenzung statt, die noch deutlicher bei $60 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ in Erscheinung tritt. Hier öffnet sich die Düse nach etwa 15°Kw noch ein zweites Mal. Es erfolgt hier das sogenannte Nachspritzen. Die den einzelnen Einspritzmengen entsprechenden Zeiten sind 12° , $18,5^\circ$ und 19°Kw oder 2,5, 3,86 und 3,96 Millisekunden ($1^\circ \text{Kw} = 0,2085 \text{ ms}$) bei der angegebenen Drehzahl. Die Nachspritzzeit beträgt etwa $8,2^\circ \text{Kw}$. Auffällig ist, dass bei Vergrössern der Einspritzmenge von 40 auf $60 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ die Dauer der Haupteinspritzung kaum zunimmt. Im letzteren Falle ist jedoch die Nadel länger (angehoben). Ausserdem wird eine kleine Menge noch durch das Nachspritzen verbraucht. Man erkennt ferner hier noch, wie auch z.T. bei den folgenden Bildern die Prellungen am Ende des Hubes, besonders bei grösseren Einspritzmengen.

Bild 9 zeigt sodann die Hubverläufe für die Zapfendüse A bei verschiedenen Einspritzmengen. Besonders bemerkenswert sind hier die Schwingungen, die die Düsennadel ausführt. Ihre Frequenz beträgt etwa 1600 Hz. Wie die Kurven des Bildes 9a, b und c zeigen, sind die Schwingungen zu Beginn der Einspritzung immer die gleichen, bei Vergrösserung der Einspritzmengen schliessen sich nur neue Schwingungen an die alten an.

Die Amplituden der Schwingungen werden wesentlich kleiner, wenn man statt der Pumpe A die Einspritzpumpe B benutzt, die besonders für grössere Einspritzmengen vorgesehen ist (Bild 10). Die Frequenz der Schwingungen bleibt dabei angenähert konstant. Auch hier zeigt das anfängliche Stück der Kurven bei allen Einspritzmengen den gleichen Verlauf.

Noch schöner ausgeprägt sind die Schwingungen für die Zapfendüse B, deren Hubverläufe in den Bildern 11a, b und c wiedergegeben sind. Die Frequenz beträgt ungefähr 1000 Hz. Bei Anschluss der Düse an die Einspritzpumpe B sind die Schwingungen nur noch sehr schwach ausgeprägt (Bild 12).

Auf die Gründe über die Ausbildung der Schwingungen sei hier nicht eingegangen. Sie sind vor allem durch die Länge und den Querschnitt der Zuleitungen und durch die verschiedenen Federn in Pumpe und Düse veranlasst. Wie die wenigen Aufnahmen schon erkennen lassen, ist daher ihre Entstehung durch äussere Umstände sehr stark beeinflussbar.

b) Hubverlauf für eine Düse bei verschiedenen Drehzahlen

In den Bildern 13a - d auf Blatt 7 ist noch der Hubverlauf für eine Lochdüse (A) bei konstanter Einspritzmenge ($40 \text{ mm}^3/\text{Hub}$) in Abhängigkeit von der Drehzahl wiedergegeben. Es wurde hier wieder eine Düse mit einfachem Hubverlauf gewählt, weil dann sich deren Kurve besser überblicken lässt. Die Hubdauer nimmt danach in $^{\circ}\text{Kw}$ gemessen, mit wachsender Drehzahl zu. Absolut -z.B. in Millisekunden- gemessen, ergibt sich jedoch eine Abnahme der Dauer mit wachsender Drehzahl.

Die Tabelle gibt die Zahlenwerte in einzelnen an.

Tabelle 1

(Hubdauer als Funktion der Drehzahl bei konstanter Einspritzmenge ($40 \text{ mm}^3/\text{Hub}$))

Bild	U/min	Hubdauer in Kw	Hubdauer in ms
13a	600	15,0	4,2
13b	790	18,4	3,9
13c	950	21,3	3,7
13d	1100	24,1	3,7

Diese Abnahme der Hubdauer wird verständlich, wenn man den Verlauf des Hubes näher betrachtet. Die Düse ist bei höheren Drehzahlen länger weit geöffnet, sodass die Flüssigkeit schneller austreten kann. Die Hubdauer scheint einem Minimum zuzustreben, sodass von einer gewissen Drehzahl an bei sonst ungeänderten Bedingungen keine Verringerung der Einspritzzeit mehr eintritt.

c) Hub- und Druckverlauf für eine Düse bei verschiedenen Einspritzmengen

Auch hier wurde wieder eine Lockdüse (B) wegen ihres einfachen Hubverlaufs verwendet. Die Bilder 14a- d (Blatt 7) zeigen für verschiedene Einspritzmengen nochmals den Verlauf des Nadelhubs (oben) und die entsprechenden Druckverläufe (unten) in der Flüssigkeitsleitung. Während die Hubverläufe durchweg glatt sind, sind die Druckverläufe sehr wellig. Schon bei der geringen Einspritzmenge von $15,6 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ zeigt der Druckverlauf, wenn auch erst sehr lang nach dem Hauptdruckanstieg, nochmaligen Anstieg, der jedoch wegen seines geringen Druckes nicht zum Öffnen der Düse führt.

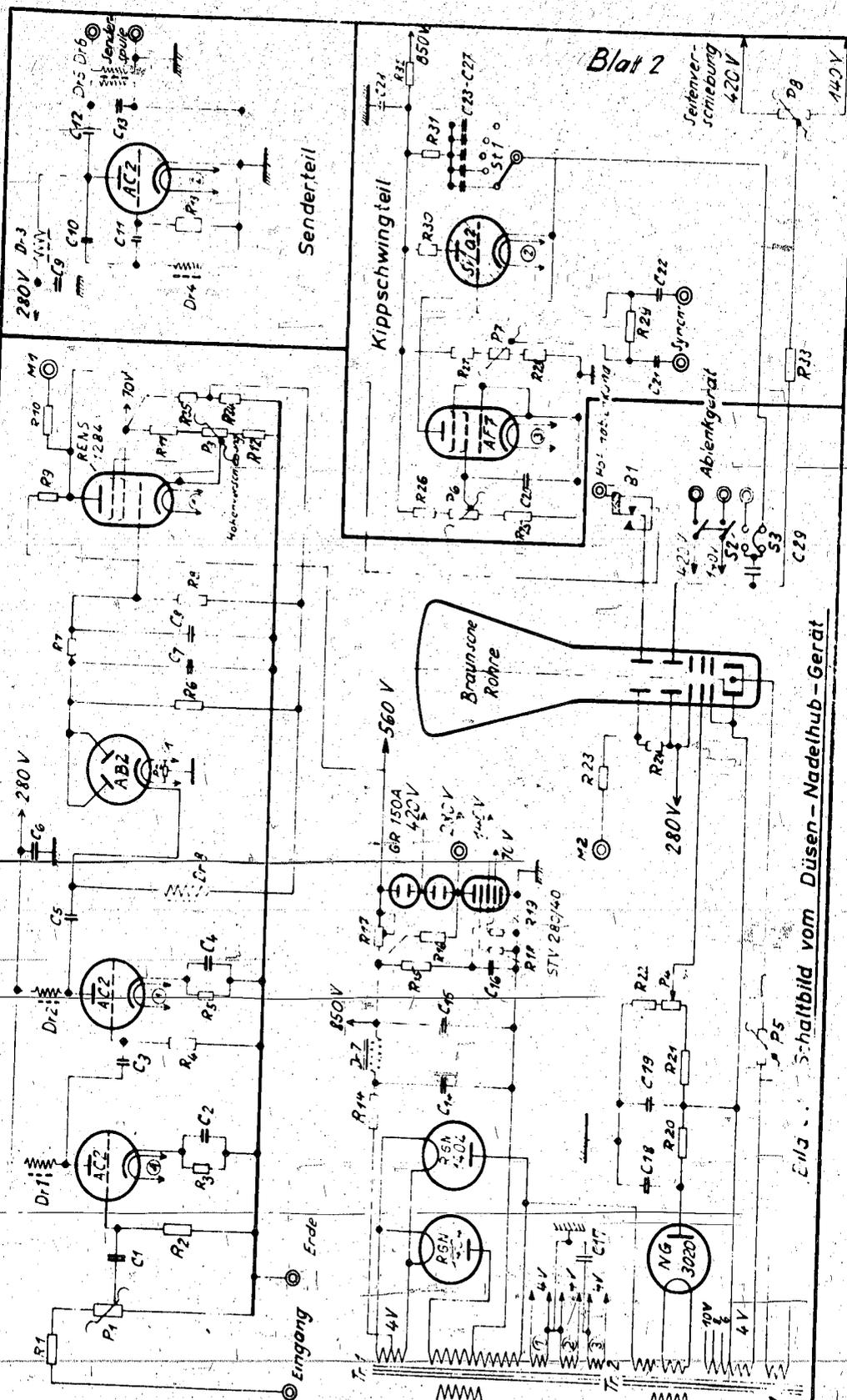
Nach Erhöhen der Einspritzmenge erfolgen in kürzeren Zeitabständen mehrmalige Druckerhöhungen, von denen der erste nach dem Hauptdruckanstieg zum nochmaligen Öffnen der Düse führt, während bei den anderen der dafür notwendige Druck zu gering ist. Man kann also aus der Betrachtung des Druckverlaufes allein nur mit gewisser Vorsicht auf das Öffnen der Düse schließen.

7.) Bemerkungen:

Die genannte maximal erreichte Empfindlichkeit lässt sich für besondere Fälle noch wesentlich steigern. Beispielsweise kann man, wenn nur langsame Bewegungsvorgänge vorliegen, die Zeitkonstante der vorkommenden Glieder erhöhen und dadurch viel grössere Empfindlichkeiten erzielen.

Es sind dann eben noch kleinere Bewegungen oder Verschiebungen erfassbar oder aber man kann Verstärkerstufen einsparen.

Da im vorliegenden Falle nur kleine Bewegungen vorlagen, und deshalb lineare Arbeitsbereiche von 1 - 2 mm bei weitem genühten, wurden keine Versuche zur Vergrößerung dieser Bereiche durchgeführt. In gewissem Umfange dürfte jedoch der Änderung der Empfindlichkeit, insbesondere durch Verwendung entsprechender Verstärkerröhren, vor allem in der Gleichstromstufe, entgegen zu wirken sein. Auch durch einen anderen Aufbau des Gebers kann eine gewisse Streckung der Empfindlichkeitskurve erreicht werden, wie bei obigen orientierenden Versuche mit dem kurzen Zylinder festgestellt wurde. Welche Strecken überhaupt mit Geber der beschriebenen Art ohne Rücksicht auf Linearität gemessen werden können, lehren die Kurven des Bildes 7. Danach sind Bewegungen oder Verschiebungen von 7 mm (bezw. 14 mm, wenn Doppeldeutigkeit infolge des Strahlumkehr ausgeschlossen ist) messbar.



Blat 2

Seitenverschiebung
420V

140V

Senderteil

Kippschwingteil

Ablenkgertät

Braun'sone
Röhre

Düsen-Nadelhub-Gerät

Stückliste siehe TPr 5 2430a

9231

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft
Ludwigshafen a. Rhein.

zum Bericht Nr 523 vom 20-11-42

TPr 5 2430

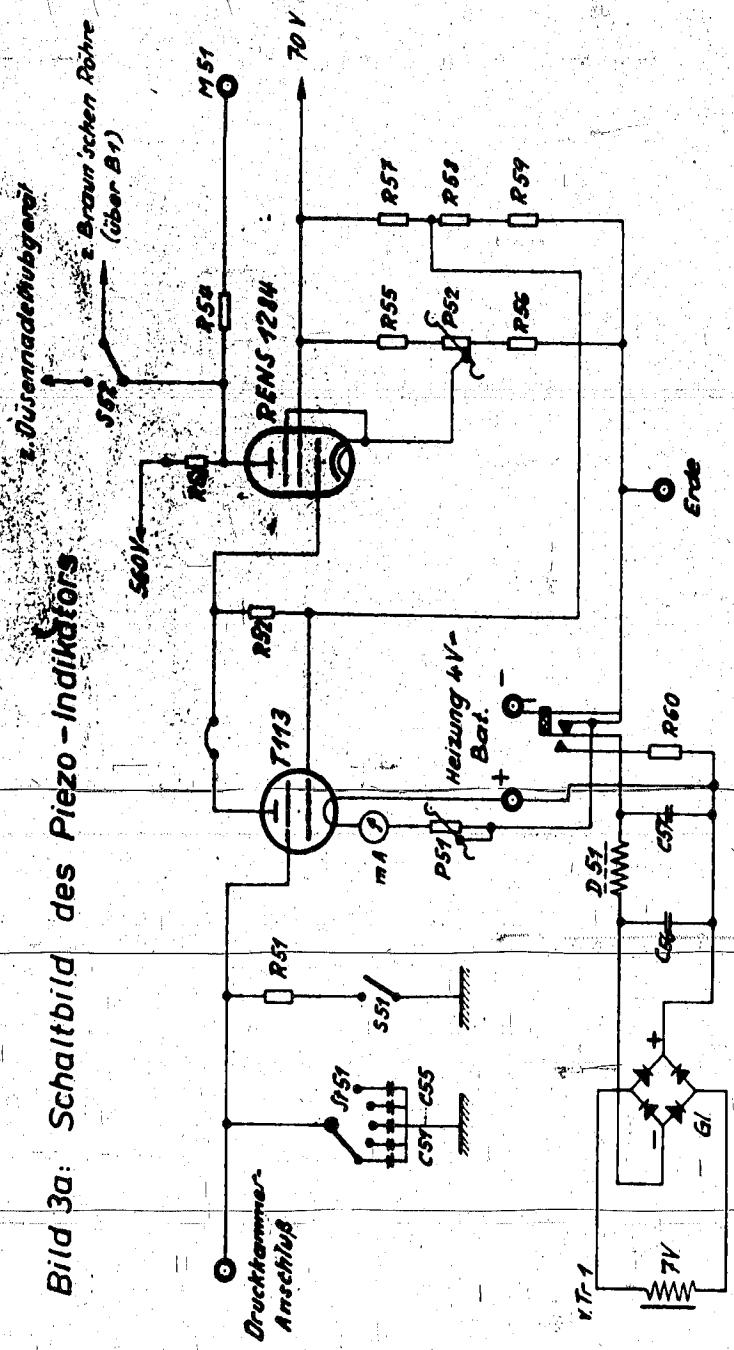
Stückliste zum Schaltbild vom Düsen-Nadelhub-Gerät

Tr1	Netztrafo Ne 88B spez	R5 = 0,5 KΩ	0,5 W	R32 = 0,1 MΩ	6 W	C22 = 0,1 MF
Tr2	" Ne 43B spez	R6 = 0,3 Ω	0,5 W	R33 = 5 MΩ	0,5 W	C23 = 3000 pF
Dr1	= 100 m H	R7 = 0,2 MΩ	0,5 W	R4 = 1 KΩ	0,5 W	C24 = 10000 pF
Dr2	= 100 m H	R8 = 0,4 MΩ	0,5 W	R35 = 10 KΩ	0,5 W	C25 = 50000 pF
Dr3	= 35 m H	R9 = 0,3 Ω	1 W	C1 = 300 pF		C26 = 0,1 MF
Dr4	= 180 Wdgn.	R10 = 0,5 MΩ	0,5 W	C2 = 25 MF	V EI	C27 = 0,5 MF
Dr5	= 180 Wdgn.	R11 = 10 KΩ	0,5 W	C3 = 300 pF		C28 = 0,5 MF
Dr5	= 40 Wdgn.	R12 = 300 Ω	0,5 W	C4 = 25 MF	12V EI	C29 = 0,5 MF
Dr7	= Drossel D22	R13 = 0,1 MΩ	0,5 W	C5 = 150 pF		
Dr8	= " F21	R14 = 100 Ω	0,5 W	C6 = 4 MF	350V EI	
S1	= doppelpol. Ausschalter	R15 = 40 KΩ	20 W	C7 = 30 pF		P1 = K Ω 0,5W
S2	= doppelpol. Ausschalter	R16 = 50 KΩ	8 W	C8 = 30 pF		P2 = 30 Ω Entbrummer
S3	= einpol. Umschalter	R17 = 20 KΩ	24 W	C9 = 8 MF	350V EI	P3 = 1 K Ω 1W
S1	= Stufenschalter	R18 = 0,8 MΩ	0,5 W	C10 = 10 pF		P4 = 0,5 MΩ 1W
S1	= Sicherungen	R19 = 0,8 MΩ	0,5 W	C11 = 100 pF		P5 = 10 Ω 2W
B1	= AEG Schaltbuchse	R20 = 0,1 MΩ	1 W	C12 = 1000 pF		P6 = 0,5 MΩ 1W
R1	= 70 KΩ 0,5 W	R21 = 0,3 MΩ	2 W	C13 = 100 pF		P7 = 0,1 MΩ 1W
R2	= 0,9 MΩ 0,5 W	R22 = 1,5 MΩ	3 W	C14 = 3 MF	1300V	P8 = 7 MΩ 1W
R3	= 1 KΩ 0,5 W	R23 = 0,5 MΩ	0,5 W	C15 = 4 MF	850V	
R4	= 0,8 MΩ 0,5 W	R24 = 10 KΩ	0,5 W	C16 = 8 MF	100V EI	
		R25 = 0,1 MΩ	0,5 W	C17 = 1 MF		
		R26 = 50 KΩ	0,5 W	C18 = 0,25 MF	2500V	
		R27 = 0,3 MΩ	0,5 W	C19 = 0,25 MF	2500V	
		R28 = 0,3 MΩ	0,5 W	C20 = 0,5 MF		
		R29 = 0,5 MΩ	0,5 W	C21 = 0,1 MF		
		R30 = 1 KΩ	0,5 W			
		R31 = 100 Ω	0,5 W			

9232

DIN Form-A 4 (210 x 297)

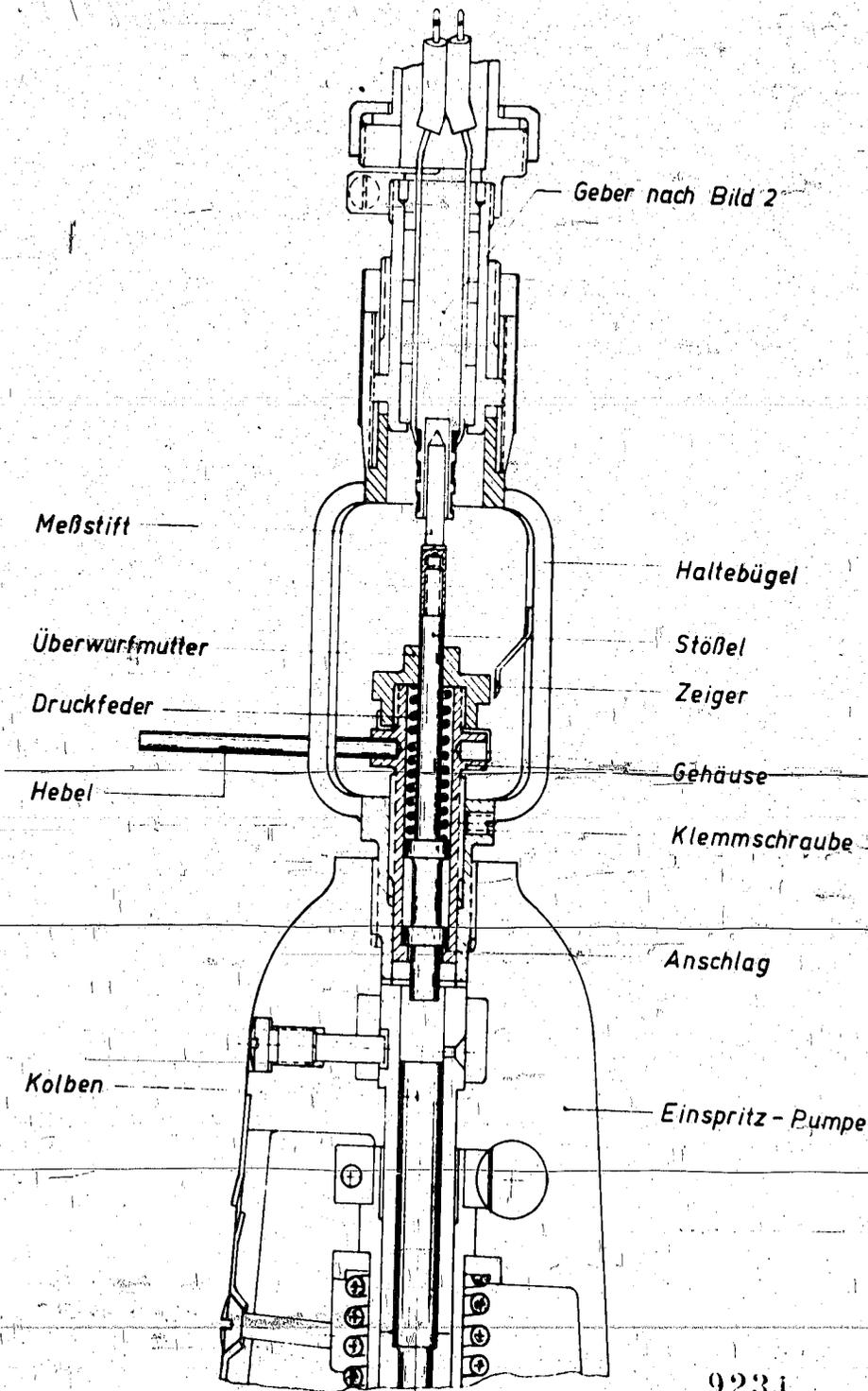
Bild 3a: Schaltbild des Piezo-Indiktors



D 51 = Drossel	D 16	R 51 = 500 M Ω	0,5 W	R 58 = 800 Ω	0,5 W	C 54 = 5000 pF	
S 51 = einpol. Ausschalter		R 52 = 10 K Ω	0,5 W	R 59 = 2 K Ω	0,5 W	C 55 = 10000 pF	
S 52 = einpol. Umschalter		R 53 = 300 K Ω	1 W	R 60 = 25 Ω	0,5 W	C 56 = 1800 MF	12V EL
S 51 = Stufenschalter		R 54 = 500 K Ω	0,5 W			C 57 = 1800 MF	12V EL
B 51 = AEG Schaltbuchse		R 55 = 7 K Ω	0,5 W	C 51 = 500 pF		P 51 = 10 Ω	
M 51 = Buchse f. Markierung		R 56 = 750 K Ω	0,5 W	C 52 = 1000 pF		P 52 = 500 Ω	
Gl = Gleichrichter		R 57 = 10 K Ω	0,5 W	C 53 = 3000 pF			

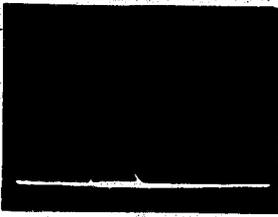
9233

Bild 5 Dynamische Eichvorrichtung
für Düsennadel-Hubgerät

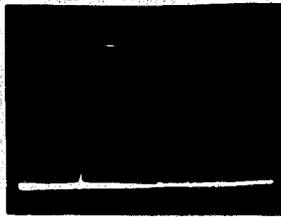


9234

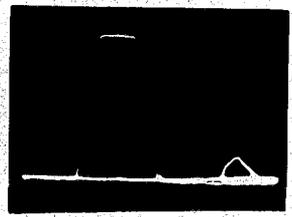
Bild 8: Nadelhubverlauf für Lochdüse A und Einspritzpumpe A



a) $EM = 20 \text{ mm}^3/\text{H}$

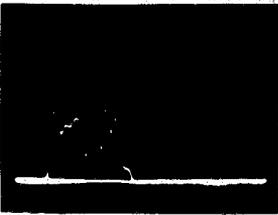


b) $EM = 40 \text{ mm}^3/\text{H}$

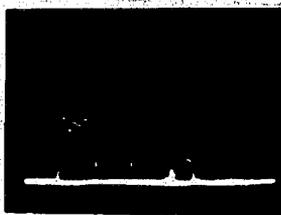


c) $EM = 60 \text{ mm}^3/\text{H}$

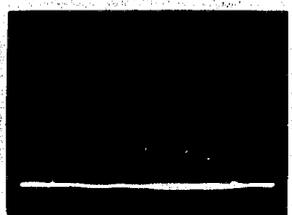
Bild 9: Nadelhubverlauf für Zapfdüse A und Einspritzpumpe A



a) $EM = 104 \text{ mm}^3/\text{H}$

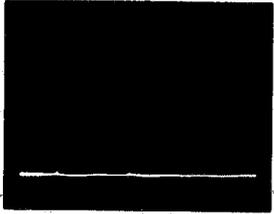


b) $EM = 192 \text{ mm}^3/\text{H}$

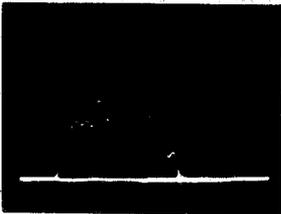


c) $EM = 280 \text{ mm}^3/\text{H}$

Bild 10: Nadelhubverlauf für Zapfdüse A und Einspritzpumpe B



a) $EM = 101 \text{ mm}^3/\text{H}$

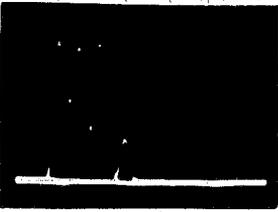


b) $EM = 205 \text{ mm}^3/\text{H}$

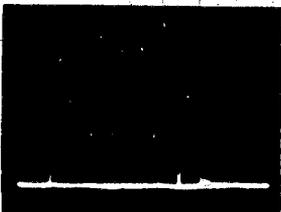


c) $EM = 285 \text{ mm}^3/\text{H}$

Bild 11: Nadelhubverlauf für Zapfdüse B und Einspritzpumpe A



a) $EM = 97 \text{ mm}^3/\text{H}$

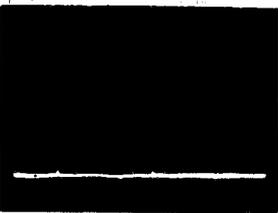


b) $EM = 200 \text{ mm}^3/\text{H}$

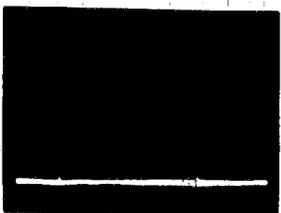


c) $EM = 290 \text{ mm}^3/\text{H}$

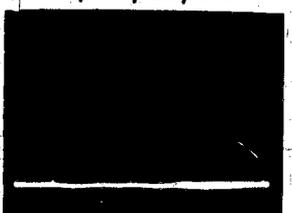
Bild 12: Nadelhubverlauf für Zapfdüse B und Einspritzpumpe B



a) $EM = 100 \text{ mm}^3/\text{H}$

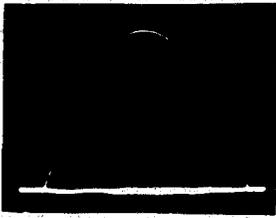


b) $EM = 200 \text{ mm}^3/\text{H}$



c) $EM = 300 \text{ mm}^3/\text{H}$

Bild 6: Bewegung des Meßstiftes in dyn. Eichvorrichtung

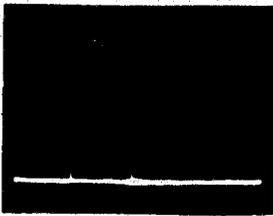


a) Exzenter

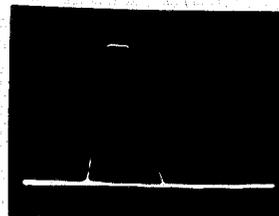


b) Nocken

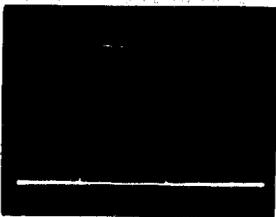
Bild 13: Nadelhubverlauf für eine Lochdüse A bei gleichbleibender Einspritzmenge ($35\text{mm}^3/\text{H}$) und verschiedenen Drehzahlen



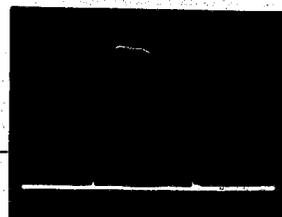
a) $n=600\text{U}/\text{min}$



b) $n=790\text{U}/\text{min}$

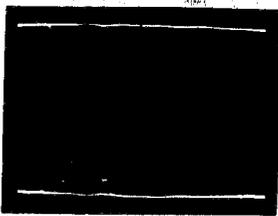


c) $n=950\text{U}/\text{min}$



d) $n=1100\text{U}/\text{min}$

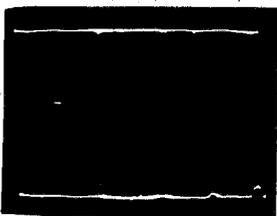
Bild 14: Nadelhubverlauf (oben) und Druckverlauf (unten) in die Flüssigkeitsleitung für eine Lochdüse B



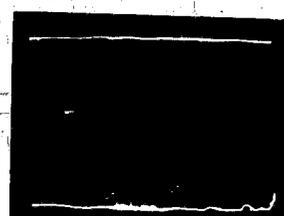
a) $EM=14,0\text{mm}^3/\text{H}$



b) $EM=15,6\text{mm}^3/\text{H}$



c) $EM=27,0\text{mm}^3/\text{H}$



d) $EM=35,8\text{mm}^3/\text{H}$ 9235