

ÜBER DIE FESTSTELLUNG DES DRUCKANSTIEGS IM MOTORZYLINDER

KO TERADA, SADAMUNE ETO und YASUHIRO KAWAGUCHI

Abteilung für Maschinenbau

(Received April 21, 1967)

1. Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten diskutieren viele Forscher über die Probleme des Klopfens im Motorzylinder. Zum Beispiel haben H. R. Ricardo¹⁾ und K. Löhner²⁾ Abnahme des Wirkungsgrades, Verbrennungsgeräusche und Schädigung durch das Klopfen behandelt. Sie haben auch darauf hingewiesen, daß der Druckanstieg je Grad Kurbelwinkel $\frac{dp}{d\alpha}$ at/°KW zur einigermaßen hinreichenden quantitativen Abschätzung der Heftigkeit des Klopfens dient.

Der Wirkungsgrad eines Ottomotors ist, nach diesen Verfassern, bei Druckanstiegen zwischen 1,7 und 2,5 at/°KW günstig, und auch kein harter Gang ist zu erkennen. Bei Dieselmotoren fände man auch einen steileren Druckanstieg von 2,5 bis über 5 at/°KW, weil ein etwas härterer Gang hierbei in Kauf genommen werde. Es ist zu beachten, daß der Druckanstieg je Kurbelwinkel in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck oder auch vom augenblicklich herrschenden Druck betrachtet werden muß. Allerdings ist bis heute der Zusammenhang zwischen Druckanstieg je Kurbelwinkel, Wirkungsgrad, Beanspruchung des Triebwerks usw. noch nicht eingehend untersucht. Es ist auch immer noch eine Frage geblieben, ob der Druckanstieg je Kurbelwinkel ein passender Faktor zur Bewertung des Klopfens ist. Das kommt wahrscheinlich auch daher, daß der Druckanstieg wegen der Unvollständigkeit des Meßverfahrens bisher nicht genau genug gemessen worden ist. Es ist ziemlich schwer, eine genaue Tangente auf einem normalen Indikatordiagramm zu ziehen: dabei sind individuell bedingte Abweichungen nicht zu vermeiden. Im Zündtotpunkt verändert sich die Drehgeschwindigkeit des Motors, wenn er ein kleines Schwungrad hat oder sehr langsam läuft. Diese Geschwindigkeitsschwankung ist manchmal nicht registriert, und man benutzt bei der Ermittlung des Druckanstieges die mittlere Geschwindigkeit.

Die Verfasser haben einen elektronischen Druckanstieg-Indikator gebaut, der mit nur geringem Fehler kontinuierlich die augenblicklichen Werte des Druckanstieges je Kurbelwinkel anzeigt. In der vorliegenden Arbeit sind u. a. Arbeitsprinzip, Aufbau, Eichung und einige Meßergebnisse berichtet.

2. Grundlagen

2.1. *Erwünschte Leistungen des Druckanstieg-Indikators*

Der Druckanstieg-Indikator muß folgendermaßen verschiedene Eigenschaften besitzen:

(1) Er muß auf die hochfrequenten Druckschwingungen, die im Brennraum entstehen können, genau ansprechen. Als Gesamtfrequenzgang soll er zwischen etwa 10 bis 10,000 Hz eine Abweichung von weniger als $\pm 0,5$ dB haben. Die

Niederfrequenzgrenze bis zum Gleichstrom ist nicht unbedingt nötig, weil der Druckanstieg-Indikator nur für die Messung der steilen Druckanstiege gedacht ist.

(2) Für den ganzen Drehzahlbereich des Motors muß man die Drehzahl-signale mit geringem Fehler von weniger als etwa 1% erhalten können. Die Drehgeschwindigkeit soll mit einem Abstand von 1 bis 5°KW kontrolliert werden, wenn die Drehzahlschwankung groß ist. Wenn es möglich wäre, sollte sich ein kontinuierliches Drehzahl-signal ergeben.

(3) Der $\frac{dp}{d\alpha}$ -Verlauf soll mit einem Fehler von höchstens 5 bis 6% (einschl. des Oszillographen) angezeigt werden.

(4) Es ist anzunehmen, daß der höchste Druckanstieg etwa bei 50 bis 60 at/°KW liegt. Der Druckanstieg-Indikator muß auch diese Werte anzeigen können.

(5) Die Eichung soll einfach durchgeführt werden können.

(6) Der Apparat muß mit hoher Stabilität arbeiten.

2.2. Aufbau des Druckanstieg-Indikators

Der $\frac{dp}{d\alpha}$ -Wert wird dadurch ermittelt, daß $\frac{dp}{dt}$ und $\frac{d\alpha}{dt}$ zunächst einzeln gewonnen und durch eine Reihe von Rechenschaltungen in die Form $\frac{dp}{dt} \Big/ \frac{d\alpha}{dt}$ gebracht werden. Bild 1 zeigt das Schema des Meßsystems. Die Arbeitsweise der einzelnen Teile ist im folgenden erörtert.

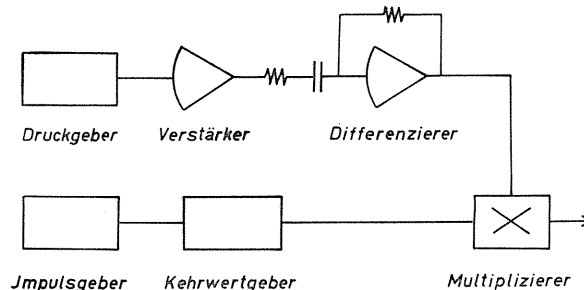


BILD 1. Schema des Druckanstieg-Indikators

2.2.1. Drucksignal-Teil

Ein Druckgeber verwandelt den Gasdruck in ein elektrisches Signal. Nachdem es verstärkt worden ist, wird es an einen Differenzierer angeschlossen, während man auch ein normales Indikatordiagramm erhalten könnte. Die Ausgangsspannung des Differenzierers ist $\frac{dp}{dt}$ proportional.

2.2.2. Drehzahl-signal-Teil

Das Drehzahl-signal wird durch einen Drehzahlgeber gewonnen, der aus einer an der Kurbelwelle befestigten Scheibe mit am Umfang gleichmäßig verteilten Löchern und einem stillstehenden Phototransistor, der die Lichtstrahlen durch die Löcher empfängt, besteht. Aus dem Phototransistor erhält man elektrische Impulse, deren Abstände je nach der Anzahl der Löcher am Umfang der rotierenden Scheibe einem gewissen Kurbelwinkel entsprechen. Diese Impulse werden einem

Kehrwertgeber gegeben, aus dem man ein Analogsignal gewinnt, das dem Kehrwert der Drehgeschwindigkeit proportional ist.

2. 2. 3. Multiplizierer

Die Ausgangsspannung des Drucksignal-Teils, d.h. $\frac{dp}{dt}$, und die des Drehzahl-signal-Teils, d.h. $1/\omega_0 \left(\omega_0 = \frac{d\alpha}{dt} \right)$, werden zu einem Multiplizierer geführt, und in ihm werden zunächst $\left(\frac{dp}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \right)$ und $\left(\frac{dp}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \right)$ einzeln berechnet und dann quadriert. Die auf diese Weise ermittelten beiden Werte werden zu einem Subtrahierer geleitet, in dem die Differenz zwischen $\left(\frac{dp}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \right)^2$ und $\left(\frac{dp}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \right)^2$ berechnet wird. Als Ausgangsspannung des Multiplizierers (einschl. des Subtrahierers) kann man schließlich nach folgender Gleichung ein Signal bekommen, das dem Druckanstieg je Kurbelwinkel $\frac{dp}{d\alpha}$ entspricht:

$$\left(\frac{dp}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \right)^2 - \left(\frac{dp}{dt} - \frac{1}{\omega_0} \right)^2 = 4 \frac{dp}{dt} / \frac{1}{\omega_0} = 4 \frac{dp}{d\alpha}.$$

2. 3. Messung der einzelnen Faktoren

2. 3. 1. Auswahl des Druckgebers

Für eine genaue Messung muß der Druckgeber folgende Eigenschaften besitzen:

- (1) Teile, die dem heißen Gas ausgesetzt werden müssen hohe Warmfestigkeit haben.
- (2) Der wesentliche Teil des Gebers muß genügend gekühlt werden, damit das Ausgangssignal von der Temperaturschwankung des Gases und des Zylinderkopfs nicht beeinflusst wird.
- (3) Der Geber muß gegen die Vibrationen des Motors unempfindlich sein.
- (4) Der Frequenzgang des Gebers muß für den ganzen Frequenzbereich der zu messenden Druckschwingungen einen guten Verlauf aufweisen; auch hochfrequente Druckschwingungen müssen vom Geber aufgenommen werden.
- (5) Die Handhabung soll möglichst leicht sein.
- (6) Die Form und das Volumen des Brennraums dürfen durch Anbringung des Gebers nicht beeinträchtigt werden.
- (7) Das ganze Indiziersystem muß ein großes Signal-Geräusch-Verhältnis haben.
- (8) Eine statische Eichung soll leicht durchgeführt werden.

Es gibt heute mehrere elektrische Indiziersysteme, nämlich induktive, piezoelektrische und kapazitive Systeme und auch Meßsysteme mit Dehnmeßstreifen. Die Eigenschaften dieser verschiedenartigen Indiziersysteme sind von vielen Forschern untersucht worden^{3) 4) 5) 6) 7) 8)}.

Nach einer Reihe von Untersuchungen über die heute in Japan zu findenden Indiziersysteme und auch mit Rücksicht auf das bei uns herrschende Klima wurde schließlich für den Druckanstieg-Indikator ein Meßsystem mit Dehnmeßstreifen verwendet, das die oben erwähnten Bedingungen vollkommen erfüllt.

Einige technische Daten des Gebers für dieses System sind:

Widerstand der Dehnmeßstreifen	120 Ω
Nenndeformation	$1200 \cdot 10^{-6} / 100$ atü
Genauigkeit	Fehler unter 1% des Vollausschlags

Überlastung
Eigenfrequenz

bis 125%
rund 40 kHz (längs)
rund 15 kHz (quer)

2.3.2. Über das Umformungsverfahren der Drehgeschwindigkeit Zur Erzeugung des Kehrwertes der Drehgeschwindigkeit ω_0 dienen, wie bereits angedeutet, eine an der Kurbelwelle befestigte Scheibe mit Löchern am Umfang und ein Phototransistor. Diese Elemente liefern mit hoher Sicherheit die gewünschten Impulse.

Wenn die Löcher auf der Scheibe zwischen der Lichtquelle und dem Phototransistor an diesen vorbeifahren, wird bei jeder Bestrahlung je ein Impuls vom Phototransistor erzeugt. Die auf diese Weise erzeugten Impulse werden zunächst in ihrer Höhe gleichmäßig abgeschnitten (s. Bild 2), und steuern den nachstehenden Integrierer, in dem die Integration einer bestimmten Spannung bei jedem Impuls anfängt bzw. aufhört. Der Scheitelwert der Ausgangsspannung vom Integrierer ist daher dem Zeitabstand der Impulse, d.h. dem Kehrwert der Drehgeschwindigkeit der Scheibe bzw. der Kurbelwelle, proportional. Durch einen Tiefpassfilter erhält man eine Analogspannung, die dem Kehrwert der Drehgeschwindigkeit proportional ist.

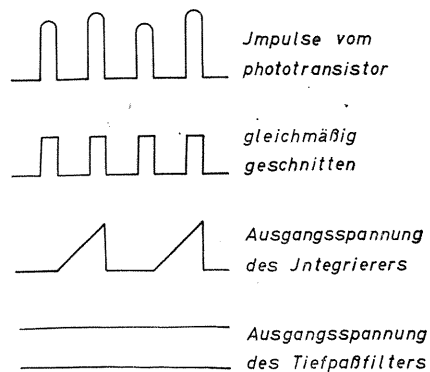


BILD 2. Behandlung der Impulse im Drehzahl-Signal-Teil.

2.3.3. Fehler bei der Umformung der Drehgeschwindigkeit

(1) Bei Bestrahlung und Deckung des Phototransistors entsteht bzw. verschwindet die Spannung mit einem gewissen Verzug. Diese Erscheinungen werden dann problematisch, wenn der Phototransistor mit hoher Frequenz bestrahlt und gedeckt wird. Wenn er zu kurz gedeckt wird, wird der zweite Impuls schon erzeugt, bevor der erste noch nicht verschwindet. Wenn er umgekehrt zu kurz bestrahlt wird, wird die Impulsspannung nicht hoch genug. In beiden Fällen wird die Tätigkeit des Integrierers gestört, und die gewünschten Signale können nicht vom Integrierer geliefert werden. Bei Bestimmung der Anzahl der Löcher, des Durchmessers und des Abstands von den Löchern muß man deswegen diese Dinge berücksichtigen. Wenn die Deckungszeit der Bestrahlungszeit gleich war, konnte der benutzte Phototransistor bis etwa 10 kHz ohne Störung den Integrierer steuern.

(2) Unter Umständen kann eine Drehschwingung der Kurbelwelle auch bei gleichbleibender Drehgeschwindigkeit eintreten. Falls auch diese Schwingung aufgenommen werden soll, müssen der Durchmesser und Abstand der Löcher sehr klein sein. Diese Forderung läuft der Erfüllung der in (1) beschriebenen Bedingungen zuwider. Deshalb muß man darüber einen Kompromiß schließen.

(3) Wenn auch bei gleichbleibender Geschwindigkeit eine ziemlich heftige Drehschwingung der Kurbelwelle vorhanden ist, kann man kein richtiges Signal mehr von der Kurbelarmgeschwindigkeit erhalten. In solchen Fällen muß die Drehscheibe möglichst nahe der Kurbel befestigt werden. Bei einem Einzylinder-

Dieselmotor, der für die Überprüfung des Druckanstieg-Indikators benutzt wurde, wurde der Torsionswinkel zwischen der Kurbel und dem Schwungrad bei einer plötzlichen Veränderung der Drehgeschwindigkeit von 1000 auf 1050 U/min zu nur etwa 0,2 Grad berechnet. Deswegen wurde die Scheibe am Schwungrad befestigt.

(4) Wenn die Lichtquelle durch Wechselstrom gespeist wird, werden die gewonnenen Impulse unter Umständen nicht gleichmäßig hoch. Es ist zu empfehlen, die Lampe möglicherweise mit Gleichstrom brennen zu lassen.

(5) Irgendwelche Abweichungen der Löcherabstände werden vom Druckanstieg-Indikator als Schwankung der Drehzahl aufgenommen. Die Löcher müssen deshalb sehr genau gearbeitet werden.

(6) Wenn die Scheibe während des Betriebs vibriert bzw. nicht in einer Ebene liegt, werden ungleichmäßige Impulse erzeugt. Sie muß daher immer in einer Ebene laufen.

(7) Der Ständer für die Lichtquelle und den Phototransistor muß starr sein, sonst werden die Impulse ungleichmäßig, u.z. durch ihre Schwingungen.

(8) Wenn die Zeitdauer zwischen den Impulsen zu lang ist, wird das Ausgangssignal des Integrierers nicht mehr dreieckig, sondern es nimmt eine gesättigte Form an, und ergibt Fehler. Diese Fehler können durch Vermehren der Löcher oder Änderung der Zeitkonstante des Integrierers beseitigt werden.

2.3.4. Fehler bei Geschwindigkeitsveränderung

(1) Genau betrachtet, ist es zu erkennen, daß die Drehgeschwindigkeit der Kurbelwelle vor und nach dem Zündtotpunkt anders ist, d.h. die Geschwindigkeit nimmt in der Nähe des Zündtotpunktes zu, und zwar um so mehr, je geringer die Trägheit des Schwungrades ist, oder je langsamer der Motor läuft. Es ist notwendig, für den zu messenden Druckanstieg die genau entsprechende, augenblickliche Drehgeschwindigkeit zu ermitteln. Weil man wegen der in 2.3.3. (1) geschilderten Bedingung die Abstände der Löcher nicht unendlich klein machen darf, wird die Veränderung der Geschwindigkeit nicht sofort aufgenommen, wenn sie plötzlich zwischen zwei Löchern auftritt. Auch wenn eine plötzliche Veränderung der Drehgeschwindigkeit an einem Loch, d.h. gerade bei Bestrahlung, entsteht, wird sie mit einem zeitlichen Verzug vom Druckanstieg-Indikator aufgenommen, wie es in Bild 3 dargestellt ist. Im Bild ist ein Extremfall gezeigt, in dem die Drehzahl der Kurbelwelle (Linie a) im Zeitpunkt P plötzlich hochgeht. Die Impulsabstände werden nach P kürzer als vorher (b). Diese Impulse steuern den Integrierer, und es gibt folgende zwei Fälle:

a. Die plötzliche Drehzahlveränderung stimmt bei c mit dem Anfang der Integration überein.

b. Sie fällt bei d mit dem Schluß der Integration zusammen.

Die der höheren Geschwindigkeit entsprechende Integration beginnt bei d etwas später als bei c. In beiden Fällen wird die plötzliche Drehzahlveränderung im

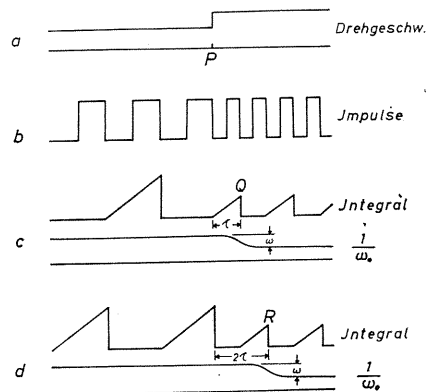


BILD 3. Fehler bei der Ermittlung der $1/\omega_0$ proportionalen Spannung.

Zeitpunkt P nicht in P sondern erst am Schluß der Integration für die neue Geschwindigkeit, d.h. bei c um τ später als P , in Q , und bei d erst um 2τ später als P , in R , aufgenommen. Zwischen P und Q bzw. R wird durch den Filter eine Spannung gewonnen, die fast gleich groß geblieben ist wie vorher. Während dieser Zeitdauer ergibt sich ein Fehler von ε . Aber weil in der Praxis kein plötzlicher Sprung der Drehzahl auftreten kann, und auch weil der Kurbelwinkel zwischen P und R wegen der großen Anzahl der Löcher bei langsamlaufenden Motoren nur 1 bis 3 Grad beträgt, darf man diesen Fehler immer vernachlässigen. Bei schnelllaufenden Motoren ist die Drehzahlveränderung in der Nähe des Zündtotpunktes so geringfügig, daß man den Fehler dieser Art gar nicht zu berücksichtigen braucht.

(2) Es ist einerseits erwünscht, mit Hilfe eines vollkommenen Tiefpassfilters alle Wechselstromanteile der Ausgangsspannung vom Integrierer restlos zu eliminieren. Aber mit Rücksicht auf den Ansprechverzug bei plötzlicher Geschwindigkeitsveränderung muß der Filter andererseits auch höhere Frequenzen passieren lassen. Auch hierbei ist man gezwungen, einen Kompromiß zu schließen. Wenn die Impulsfrequenz aus dem Phototransistor hoch genug ist, enthält die Ausgangsspannung fast keine Wechselstromanteile. Je höher die Frequenz der Impulse ist, um so kürzer kann man den Ansprechverzug des Drehzahl-Signal-Teils machen, und zwar durch Änderung der Filtercharakteristik. Dafür muß die Drehscheibe möglichst viele Löcher haben, aber nicht so viel, daß die erzeugten Impulse ungleichmäßig werden.

3. Charakteristik des gebauten Druckanstieg-Indikators

3.1. Eichung des Drucksignal-Teils (einschl. des Multiplizierers)

Hierbei handelt es sich nur um die neu gebauten elektronischen Schaltungen, d.h. der Druckgeber und der serienmäßige Verstärker für den Geber sind nicht berücksichtigt, denn diese beiden Teile sind schon vom Hersteller eingehend untersucht worden, und es ist ganz klar, daß sie für den jetzigen Zweck keinen nennenswerten Fehler verursachen können.

Für die Eichung des Drucksignal-Teils wurde zunächst der Übergangsverlauf nach dem Guilleminschen Verfahren geprüft. Weil dieser Teil einen Differenzierer hat, ist es nicht zweckmäßig, dem Eingang einen stufenartigen Spannungssprung zu geben. Deswegen wurde eine sägezahnförmige Kippspannung angewendet, damit die Ausgangsspannung des Differenzierers einen stufenartigen Sprung hatte. Bei der Eichung betrug die Spannungsneigung $3 \cdot 10^4$ V/s. Die

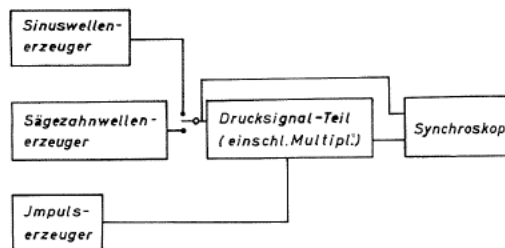


BILD 4. Schaltung zum Eichen des Drucksignal-Teils.

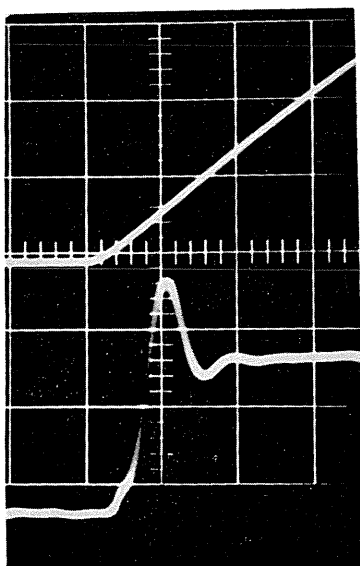


BILD 5. Ein- und Ausgangsspannung beim Eichen des Drucksignal-Teils.

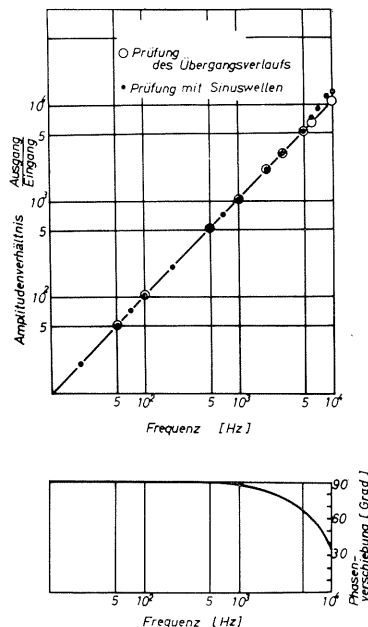


BILD 6. Eichergebnisse des Drucksignal-Teils einschl. des Multiplizierers.

Eichschaltungen sind in Bild 4 schematisch dargestellt. Um aus dem Multiplizierer eine gewisse Ausgangsspannung zu bekommen, hat man dem Drehzahlsignal-Teil Impulse mit konstanter Frequenz von 5000 Hz gegeben. Bei dieser Frequenz der Impulse wurden die Wechselstromanteile durch den Filter fast völlig eliminiert, so daß man gar keine Welligkeit der Ausgangsspannung auf dem Schirm des Oszillographen erkennen konnte. Die Eichkippspannung und die Ausgangsspannung des Multiplizierers sind in Bild 5 gezeigt. Aus beiden Oszillogrammen wurde folgende Übertragungsfunktion ermittelt:

$$G(j\omega) = \{ (5,185 - 6,879 \cos 40 \cdot 10^{-6} \omega + 1,948 \cos 65 \cdot 10^{-6} \omega - 0,2533 \cos 80 \cdot 10^{-6} \omega) - j(6,879 \sin 40 \cdot 10^{-6} \omega + 1,948 \sin 65 \cdot 10^{-6} \omega - 0,2533 \sin 80 \cdot 10^{-6} \omega) \} \cdot 10^3$$

In Bild 6 sind das Amplitudenverhältnis zwischen der Ein- und Ausgangsspannung und die Phasenverschiebung zusammengestellt. Die Grundfrequenz der Druckschwingung beim Klopfen ist in den meisten Fällen unter 4000 Hz. Die Phasenverschiebung bei 4000 Hz beträgt ungefähr 20 Grad, die etwa der Breite der Oszillogrammlinie entsprechen.

Nach der Prüfung des Übergangsverlaufs wurde der Frequenzgang auch bei sinusförmigen Eingangsspannungen gemessen, und das Ergebnis ist ebenfalls in Bild 6 eingezeichnet. Zwischen beiden Meßergebnissen sind nur geringe Unterschiede oberhalb etwa 7000 Hz zu erkennen.

3.2. Eigenschaften des Drehzahl-signal-Teils

Es wurde untersucht, wie sich die Ausgangsspannung des Filters verhielt,

wenn Impulse von bekannter Frequenz als Eingangsspannung dem Drehzahl-signal-Teil gegeben wurden. Dafür wurden Impulse aus einem Impulserzeuger verwendet, und die Zusammenhänge zwischen der Impulsfrequenz und den Ausgangsspannungen vom Integrierer und Filter wurden festgestellt. Dann wurde auch die Ausgangsspannung des Multiplizierers dadurch betrachtet, daß dem Eingang des Differenzierers statt des Gebersignals eine sinusförmige Spannung konstanter Frequenz und konstanter Amplitude gegeben wurde. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse (Bild 7) entsprechen dem Verhalten des Drehzahl-signal-Teils bei Betrieb mit gleichbleibender Drehzahl.

Aus Bild 7 kann man annehmen, daß dieser Teil bei Frequenzen von 1500 bis 6000 Hz eine brauchbare Linearität aufweist. Die Sinuswellenfrequenz, die dem Differenzierer zugeführt wurde, betrug 3000 Hz.

Um die Filtereigenschaften genauer zu untersuchen, hat man dem Filter eine stufenförmige Spannung gegeben und aus dem Übergangsverhalten der Ausgangsspannung folgende Übergangsfunktion des Filters ermittelt:

$$G(j\omega) = \frac{1 - j\omega T}{1 + (\omega T)^2}, \quad T = 1,643 \text{ ms.}$$

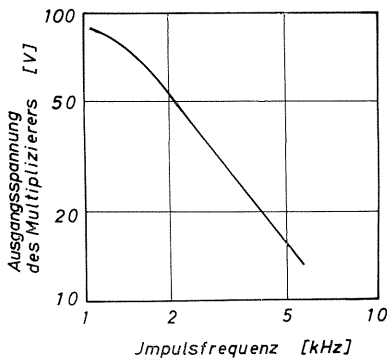


BILD 7. Frequenzgang des Drehzahl-signal-Teils einschl. des Multiplizierers.

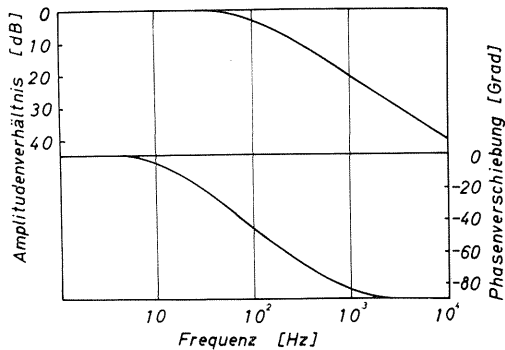


BILD 8. Eigenschaften des Filters.

Amplitudenverhältnis und Phasenverschiebung aus dieser Gleichung sind in Bild 8 wiedergegeben.

Bild 9 a zeigt ein Beispiel der Ausgangsspannung vom Filter. Aus dem Bild ist ersichtlich, daß zu einem Gleichstromanteil ein Wechselstromanteil überlagert ist. Das Verhältnis b/a wurde für verschiedene Impulsfrequenz gemessen und in Bild 9 b aufgetragen. Der Wechselstromanteil sollte möglichst gering sein. Wenn er auf 3% beschränkt werden soll, muß die Impulsfrequenz höher als 2500 Hz sein. Er moduliert das Ausgangssignal, wenn er vom Multiplizierer mit aufgenommen wird.

Die Kehrwert-Schaltung einschließlich des Integrierers und Filters arbeitet in einem Frequenzbereich von 1500 bis 6000 Hz fast fehlerfrei, und die Anzahl Z der Löcher würde daher mit Drehzahl n U/min: $60 \cdot 1500/n < Z < 60 \cdot 6000/n$, während sie aus dem Ansprechvermögen bis $60 \cdot 10^4/n$ steigen könnte. Aber wenn zum Beispiel der Wechselstromanteil des Ausgangssignals vom Filter auf 3% zu be-

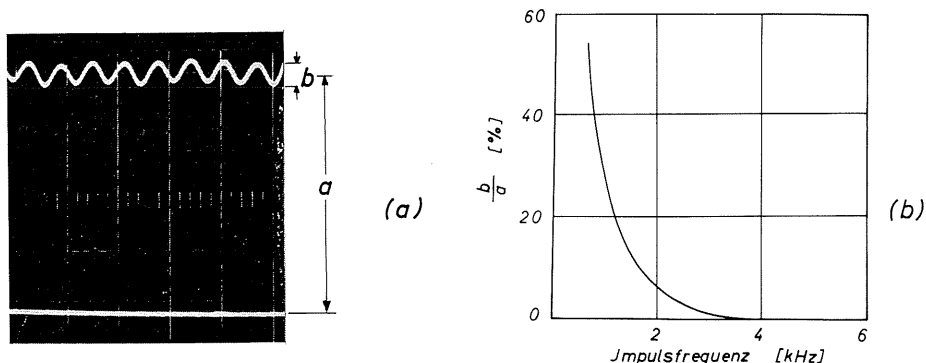


BILD 9. Wechselstromanteil der Ausgangsspannung vom Filter.

schränken ist, soll die Löcheranzahl Z folgende Werte haben:

$$60 \cdot 2500/n < Z < 60 \cdot 6000/n.$$

Die Löcheranzahl muß bei schnelllaufenden Motoren gering sein, wie sie aus dieser Gleichung hervorgeht. Die Drehzahlsschwankung in der Nähe des Zündtotpunktes ist bei solchen Motoren vernachlässigbar. Bei Langsamläufern können dagegen die Löcher dicht aneinander verteilt werden, damit auch die Drehgeschwindigkeitsschwankungen, die während einer Umdrehung entstehen, aufgenommen werden.

3. 3. Eichung des ganzen Druckanstieg-Indikators

Der Druckanstieg-Indikator enthält einen Druckgeber, der den Gasdruck in ein elektrisches Signal verwandelt, und auch eine Anzahl von elektronischen Schaltungen. Deswegen scheint es zweckmäßig zu sein, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilen noch anschaulicher zu erläutern, damit auch der Eichvorgang leicht erklärt werden kann.

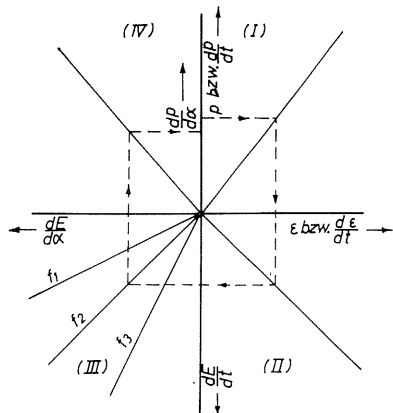


BILD 10. Beziehungen zwischen wichtigen Faktoren.

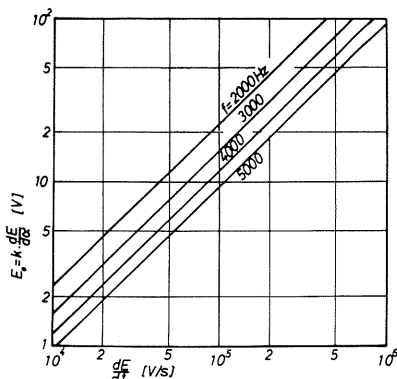


BILD 11. Eichergebnisse gemäß Feld III in BILD 10.

Im Druckgeber tritt eine Verformung ϵ auf, die dem Gasdruck p im Brennraum entspricht, wie man es auf Feld I in Bild 10 sieht. Der Zusammenhang zwischen ihren zeitlichen Veränderungen, nämlich dp/dt und $d\epsilon/dt$, geht ebenfalls aus Feld I in Bild 10 hervor, wenn man die Dimensionen in at/s bzw. 1/s liest. Als Ausgangsspannung des Verstärkers erhält man eine Spannung E , die der Verformung ϵ des Gebers und daher auch dem Druck p entspricht. Aus dem Differenzierer gewinnt man eine dE/dt proportionale Spannung, wie sie die Linie auf Feld II zeigt. Um eine dem Druckanstieg $dp/d\alpha$ proportionale Spannung zu bekommen, wird die Ausgangsspannung dE/dt des Differenzierers mit einer dem Kehrwert der Drehzahl n proportionalen Spannung multipliziert. Im allgemeinen ist es zweckmäßig, statt der Drehzahl n die Impulsfrequenz f zu verwenden, weil diese unabhängig von der Drehzahl allgemeingültig ist. Auf Feld III sind beispielsweise drei Linien eingezeichnet, die Impulsfrequenzen f_1, f_2 und f_3 entsprechen ($f_1 < f_2 < f_3$). Mit Hilfe einer von solchen Eichkennlinien kann man das Multiplikationsergebnis ermitteln, wenn sie einmal festgestellt worden ist. Die Impulsfrequenz wird aus $f = nZ/60$ berechnet, während die Winkelgeschwindigkeit ω_0 °KW/s der Kurbelwelle aus $\omega_0 = 360 n/60 = 6 n$ (°KW/s) ermittelt wird. Daher: $\omega_0 = 360 f/Z$. Der entstandene Druckanstieg $dp/d\alpha$ kann aus der Beziehung zwischen dE/dt , dp/dt und $d\alpha/dt$ ($= 360 f/Z$) berechnet werden, und mit dem gemessenen Wert der Ausgangsspannung verglichen werden, der $dE/d\alpha$ bzw. $dE/dt \cdot Z/360 f$ proportional ist. Dadurch erhält man die Kennlinie auf Feld IV.

Beim Druckgeber, der für den Druckanstieg-Indikator verwendet wurde, entstand eine Verformung von $\epsilon = 1425 \cdot 10^{-6}$ bei $p = 100$ at, und die dabei gewonnene Ausgangsspannung des Verstärkers betrug $E = 75$ V. Daher $dE/dt = 75$ V/s bei $dp/dt = 100$ at/s. Diese Beziehung kann auf Feldern I und II dargestellt werden.

Um den Druckanstieg-Indikator Feld III entsprechend zu eichen, hat man eine dreieckige Spannung mit bekanntem Spannungsanstieg (V/s) verwendet. Diese Eichung wurde für Impulsfrequenzen von 2000, 3000, 4000 und 5000 Hz durchgeführt, und die Ergebnisse sind in Bild 11 zusammengestellt.

In Bild 12 ist beispielsweise die Ausgangsspannung des Druckanstieg-Indikators über dem zeitlichen Drucksteigerungsverhältnis pro Impulsfrequenz aufgetragen. Wenn die Drehscheibe 360 Löcher hat, wird es $\omega_0 = 360 f/Z = f$, und man kann die Abszisse durch Druckanstieg je Grad Kurbelwinkel ersetzen.

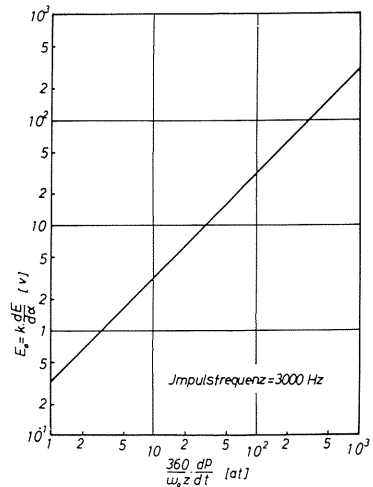


BILD 12. Eichergebnisse des ganzen Meßsystems.

4. Anwendungsbeispiele

4.1. Beispiele bei Verwendung eines Impulserzeugers

Es wurde statt des Drehzahlgebers mit der Drehscheibe ein elektronischer Impulserzeuger verwendet. Als Versuchsmotor diente ein wassergekühlter Viertakt-

Einzyylinder-Vorkammer-Dieselmotor mit folgenden technischen Daten:

Hub 170 mm max. Dauerleistung 13 PS bei 1200 U/min
Bohrung 120 mm

In Bild 13 sind einige synchronoskopische Meßbeispiele gezeigt. Bei 570 U/min war ein heftiges Klopfgeräusch zu hören.

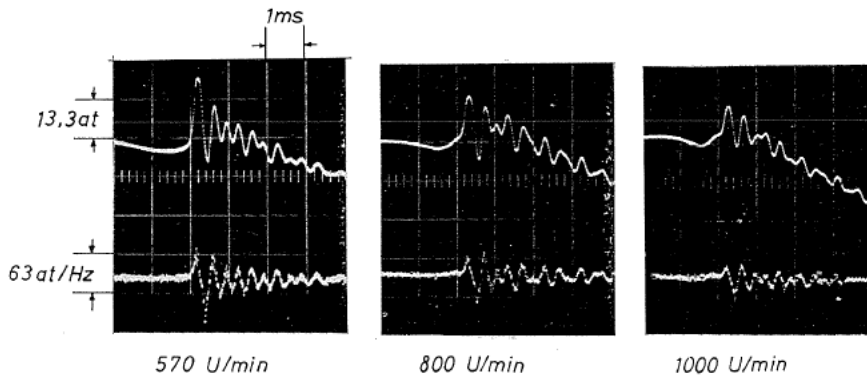


BILD 13. Meßbeispiele bei Verwendung eines Impulserzeugers.

Hier möchten die Verfasser verschiedene Verfahren zur Ermittlung des Druckanstieges je Grad Kurbelwinkel vergleichen. Zum Vergleich werden folgende Meßverfahren ausgewählt:

1. *Verfahren* Die Differenz zwischen dem maximalen Verbrennungsdruck und dem Verdichtungsenddruck wird durch den diesem Zeitabstand entsprechenden Kurbelwinkel dividiert (Bild 14, AB).

2. *Verfahren* Die Differenz zwischen dem maximalen Verbrennungsdruck und dem Druck am Anfang der steilen Drucksteigerung wird durch den diesem Zeitabstand entsprechenden Kurbelwinkel dividiert (Bild 14, A'B).

3. *Verfahren* An der Stelle, wo der Druckanstieg am steilsten zu sein scheint, zieht man eine Tangente, deren Neigung als Druckanstieg festgestellt wird (Bild 14, Tangente in C).

4. *Verfahren* Feststellung des Druckanstieges mit Hilfe des Druckanstieg-Indikators.

Außerdem gibt es noch ein weiteres Verfahren, nach dem man den Druck- und Zeitunterschied zwischen dem 10%- und 90%-Punkt der steilen Drucksteigerung ermittelt^{10) 11)}. Man bekommt den Quotienten als Druckanstieg je Kurbelwinkel.

Für einige Meßergebnisse bei gleicher Einspritzmenge wurden Druckanstiege

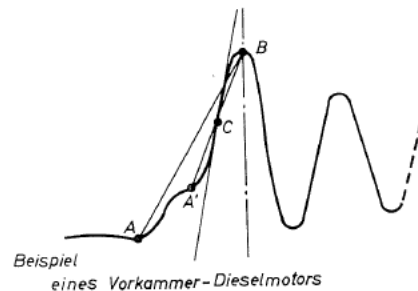


BILD 14. Vergleich verschiedener graphischer Methoden zur Ermittlung des Druckanstieges.

nach den oben genannten vier Verfahren ermittelt, und die Ergebnisse sind in Bild 15 dargestellt. Aus dem Bild ist ersichtlich, daß der Druckanstieg, der mit Hilfe des Druckanstieg-Indikators gewonnen ist, 3 bis 6-mal so hoch ist wie der nach dem 1. Verfahren.

Schon vorher war zu vermuten, daß das 1. Verfahren ungewöhnlich niedrige Werte ergeben würde. Aber die hier gewonnenen Werte nach dem 1. Verfahren zeigen etwa 4 bis 10 at/°KW, die bisher in der Literatur öfter angeführt sind. Wahrscheinlich ist das darauf zurückzuführen, daß die Eigenfrequenz des Druckgebers heute sehr hoch ist und der Geber auf steile Drucksteigerung genau ansprechen kann.

Die Meßergebnisse nach dem 4. Verfahren haben immer höhere Werte als die nach dem 3. Verfahren. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß der Druckanstieg-Indikator immer eine Tangente für jeden Zeitpunkt berechnet, während man im 3. Verfahren meistens keine genaue Tangente zieht und dazu neigt, eine Gerade entlang einem Teil der Drucklinie zu ziehen. Diese Neigung ist dann besonders stark, wenn die Drehgeschwindigkeit niedrig und $dp/d\alpha$ groß ist.

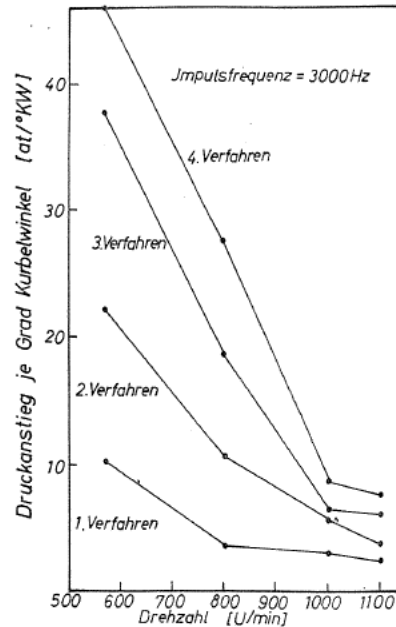


BILD 15. Vergleich von Meßergebnissen nach verschiedenen Verfahren.

4. 2. Beispiele bei Verwendung einer Drehscheibe mit 360 Löchern

Für verschiedene Betriebsbedingungen des verwendeten Dieselmotors wurden Druckanstiege mit Hilfe des Druckanstieg-Indikators gemessen. In diesem Fall wurde der automatische Geschwindigkeitsregler demontiert, und die Einspritzmenge wurde durch das Schieben der Zahnstange von der Einspritzpumpe eingestellt. Eine Einspritzmenge von 140 mg je Einspritzung entsprach der Höchstleistung des Motors.

4. 2. 1. Auswertung der Ergebnisse

Bei den Kolbenkraftmaschinen haben die Meßergebnisse verhältnismäßig große Abweichungen, weil aus zahlreichen Gründen der Verbrennungszustand ziemlich veränderlich ist. Bild 16 zeigt ein Beispiel, in dem die gemessenen Werte größere Abweichungen haben. Jede von drei Gruppen, die hier im Bild dargestellt sind, besteht aus ungefähr 100 Meßwerten; diese Werte wurden mit Hilfe von Statistikerkenntnissen auf die Normalität der Verteilung geprüft, und einige davon wurden eliminiert. Das Ergebnis ist in Bild 17 dargestellt. Aus den gestrichelt eingezeichneten Gesamtdaten wurden einige Meßwerte ausgeschlossen, die auf Grund der Statistik durch ungewöhnliche Verbrennungserscheinungen hervorgerufen zu sein schienen. Dann sieht die akkumulierte Relativhäufigkeit wie die durchgezogene Gerade aus. Von nun an werden nur die zurückgebliebenen Werte in die Betrachtung einbezogen. Durch eine Dispersionsanalyse wurde klar, daß zum

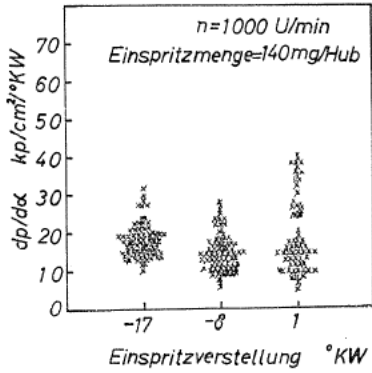


BILD 16. Abweichungen der $dp/d\alpha$ -Meßwerte.

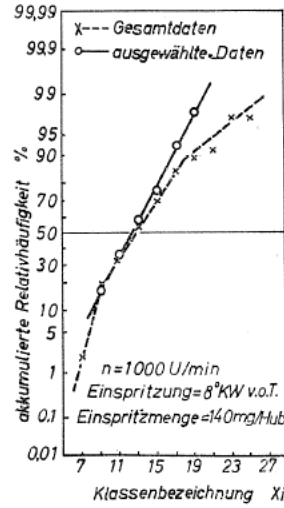


BILD 17. Auswahl der Meßwerte.

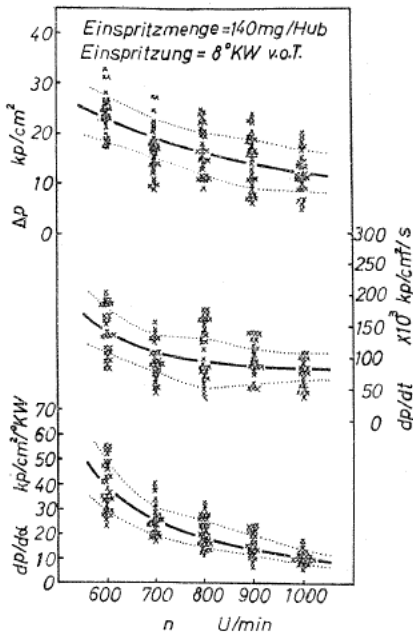


BILD 18. Einfluß der Drehzahl auf $dp/d\alpha$ (1).

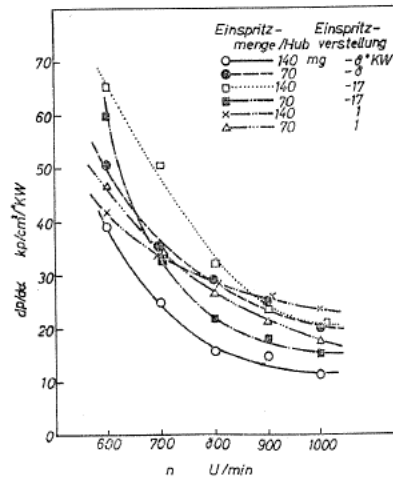
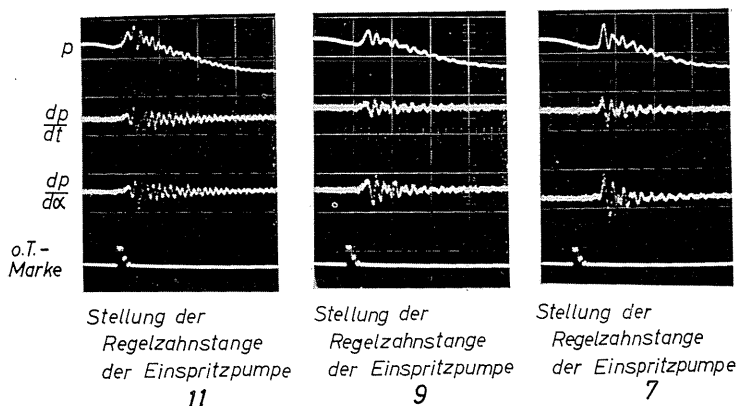


BILD 19. Einfluß der Drehzahl auf $dp/d\alpha$ (2).

Ausdrücken der Einflüsse von Parametern etwa 30 Meßwerte genügen.

4. 2. 2. Einfluß der Drehgeschwindigkeit auf den Drckanstieg

Bild 18 zeigt den Einfluß der Geschwindigkeit auf den Druckanstieg je Kurbelwinkel $dp/d\alpha$ und den zeitlichen Druckanstieg sowie die Druckdifferenz je Vor- und nach der Zündung. In Bild 19 ist der Einfluß der Einspritzmenge und -verstellung dargestellt, und in Bild 20 sind Oszillogramme wiedergegeben, bei denen die Einspritzmenge verändert wurde. Aus diesen Diagrammen ist die Veränderung des Zündverzugs ersichtlich. Im unteren Drehzahlbereich sind die Luftgeschwindigkeit, Temperatur, der Verdichtungsdruck und Einspritzungsdruck niedrig, und die Brennstoffzerstäubung und die Mischung sind schlecht. Dadurch wird der



Einspritzung = 8° KW v.o.T.
 Drehzahl = 800 U/min
 Ablenkung = 2ms pro Skalenteil

BILD 20. Meßbeispiele.

Zündverzug größer und der zeitliche Druckanstieg dp/dt höher. Deswegen nimmt der Druckanstieg $dp/d\alpha$ mit abnehmender Drehzahl steil zu.

4. 2. 3. Einfluß der Einspritzmenge

Bild 21 zeigt Meßergebnisse, bei denen die Drehzahl 800 U/min und die Einspritzverstellung 8° v.o.T. betrug. Zahnstangenskala 11 der Einspritzpumpe entsprach einer Einspritzmenge von 140 mg/Hub, und Zahnstangenskala 7 der von 70 mg/Hub. Als die Drehzahl verändert wurde, wurden die Meßwerte wie in Bild 22. Bei gleichbleibender Drehzahl und einer Voreinspritzung von 8° nimmt $dp/d\alpha$ zu, wenn die Einspritzmenge abnimmt. Das kommt daher, daß das Luftverhältnis mit der Abnahme der Einspritzmenge größer, und dadurch auch der Zündverzug auch größer wird. Diese Neigung wird auch durch die Herabsetzung der Brennraumtemperatur infolge der Abnahme der Einspritzmenge verstärkt. Die Kurven haben für verschiedene Drehzahlen fast die gleiche Form. Wenn die Einspritzverstellung anders ist als 8° v.o.T., kann man nicht mehr unbedingt sagen, daß der Druckanstieg $dp/d\alpha$ mit der Abnahme der Einspritzmenge zunimmt. In Bild 19 verändert sich der Druckanstieg bei einer Einspritzverstellung von 17° v.o.T. und 1° n.o.T. anders als bei 8° v.o.T., wenn die Einspritzmenge geändert wird. Wenn die Voreinspritzung von der Standardeinstellung von 8° v.o.T. weit abweicht, tritt eine Verbrennung ein, die man nicht mehr beeinflussen kann. In diesem Fall wird der Druckanstieg $dp/d\alpha$ mit der Zunahme der Einspritzmenge größer.

4. 2. 4. Einfluß der Voreinspritzung auf den Druckanstieg

Mit allen Meßpunkten ist der Einfluß der Voreinspritzung in Bild 23 dargestellt. Für Δp , dp/dt und $dp/d\alpha$ sind auch ihre Mittelwerte und Standardabweichungen eingezeichnet. Bild 24 zeigt Mittelwerte von $dp/d\alpha$ für verschiedene Drehzahlen. Zum Vergleich ist auch eine Kurve eingezeichnet, die den Druckanstiegen beim Anlassen entspricht. Auf Oszillogrammen war zu erkennen, daß bei normalen Betriebsbedingungen der Zündverzug bei einer Voreinspritzung von 8° v.o.T. am kürzesten war. Beim Anlassen wurden nur wenige Meßpunkte ge-

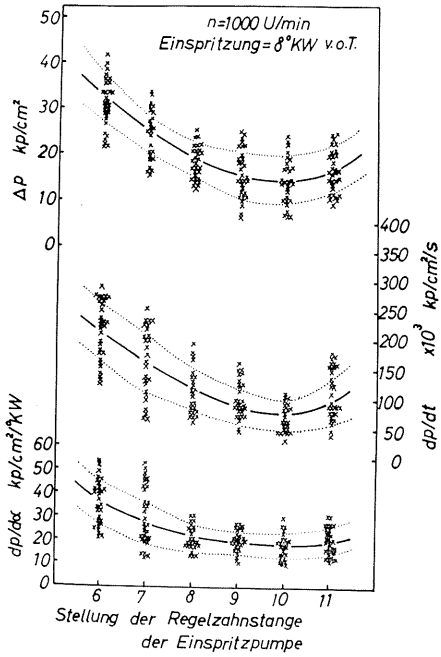


BILD 21. Einfluß der Einspritzmenge auf $dp/d\alpha$ (1).

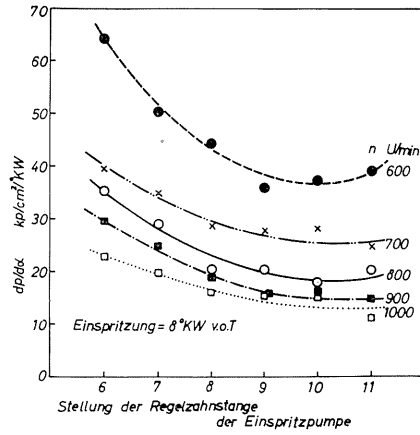


BILD 22. Einfluß der Einspritzmenge auf $dp/d\alpha$ (2).

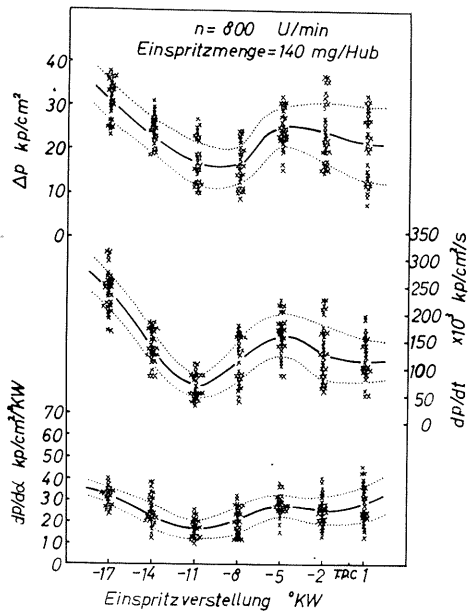


BILD 23. Einfluß der Einspritzverstellung auf $dp/d\alpha$ (1).

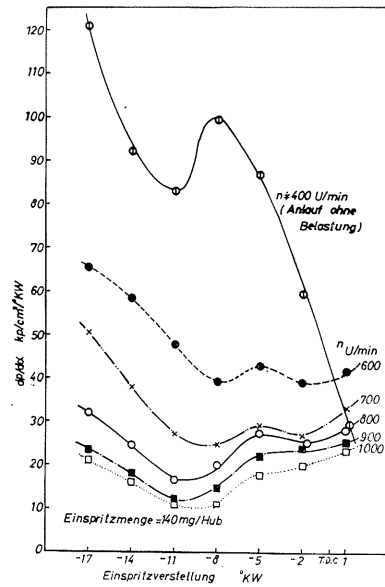


BILD 24. Einfluß der Einspritzverstellung auf $dp/d\alpha$ (2).

wonnen, und deswegen dient die in Bild 24 eingezeichnete Kurve zu einem genauen Vergleich nicht. Es zeigt sich jedoch, daß die Druckanstiege beim Anlassen etwa doppelt so groß sind wie die beim normalen Betrieb. Beim Anlassen ist der Zündverzug wegen der niederen Zylindertemperatur besonders lang, und der niedrigste Druckanstieg liegt etwas nach links verschoben. Wenn die Einspritzung spät eintritt, nimmt der Druckanstieg sehr steil ab, weil eine wirksame Zündung manchmal nicht erfolgt.

5. Überlegungen

5.1. Über die Messung mit dem Druckanstieg-Indikator

Es wurde festgestellt, daß die Messung des Druckanstiegs je Grad Kurbelwinkel mit dem Druckanstieg-Indikator folgende Vorteile hat:

(1) Die Meßgenauigkeit ist viel höher als bei der Messung des Druckanstiegs nach graphischen Methoden.

(2) Individuell bedingte Abweichungen, die bei graphischen Methoden oft zu beobachten sind, können durch den Druckanstieg-Indikator völlig ausgeschlossen werden.

(3) Den Druckanstieg-Indikator kann man über den ganzen Verbrennungsvorgang den Druckanstieg je Grad Kurbelwinkel kontinuierlich anzeigen lassen. Wenn man dasselbe Ergebnis graphisch erhalten wollte, könnte man das nur mit besonders großem Aufwand machen.

(4) Im unteren Drehzahlbereich, in dem die Klopfneigung groß ist, und beim Anlassen des Motors, ist die Drehzahlschwankung erheblich groß. Auch in solchen Fällen kann man mit dem Druckanstieg-Indikator genaue Werte feststellen.

Beim Versuchsapparat war der Fehler des Drehzahl-Signal-Teils unter $\pm 1\%$ einschl. des Wechselstromanteils nach dem Filter, wenn die Impulsfrequenz zwischen 3000 und 5000 Hz lag. Der Fehler des Drucksignal-Teils unterhalb 5000 Hz Druckschwingungsfrequenz lag innerhalb von $+1.5\%$ und -0.3% .

5.2. Möglichkeiten der Weiterentwicklung

Durch eine Prüfung der Meßgenauigkeit wurde klar, daß der versuchsweise gebaute Druckanstieg-Indikator die erwartete Genauigkeit besitzt. Um die Meßgenauigkeit weiter zu erhöhen, den Meßbereich zu erweitern und die Handhabung noch leichter zu machen, kann man folgende Maßnahmen treffen:

(1) Einen Drucksignalverstärker verwenden, dessen Frequenzgang innerhalb von 0-20 kHz vollkommen flach ist.

(2) Der Differenzierer sollte bessere Eigenschaften im oberen Frequenzbereich haben, u.z. ohne Störung durch Geräusch.

(3) Eigenschaft des Filters ist zu verbessern. 36-48 dB/Oktave oberhalb von 500 Hz sind gewünscht. Durch diese Maßnahme wird der Wechselstromanteil des Filterausgangs viel geringer, und trotzdem nimmt der Ansprechverzug bei Drehzahlveränderung nicht zu.

(4) Als ideale Lösung wird ein Drehzahlgeber gewünscht, der kontinuierlich Drehzahl-Signal liefern kann. Aber ein solches System mit Masse und Elastizität ist vorsichtig zu verwenden, weil es öfter zur Schwingung neigt.

5.3. Hinweise für die Anwendung des Druckanstieg-Indikators

Es gibt verschiedene Faktoren, die Einflüsse auf den Druckanstieg $dp/d\alpha$

haben. Diese Faktoren können z.B. vom Brennstoff, von der Bauart des Motors, vom Mischungsverhalten des Brennstoffs und der Luft usw. abhängig sein, und jeder der Faktoren hat wieder mehrere Grundfaktoren. Solche Faktoren wirken nicht unabhängig voneinander, sondern sie haben auch einanderwirkende Einflüsse. Bei der Messung des Druckanstiegs muß man auch Faktoren feststellen, die ihn beeinflussen. Sonst kann man nicht mehr die Betriebsbedingungen analysieren. Die Einspritzmenge und der Zündverzug sind dabei besonders wichtig.

Der Verbrennungszustand ist je Hub sehr veränderlich. Deshalb ist es notwendig, viele Meßergebnisse zu erhalten. Für eine einfache Feststellung des Druckbereiches oder der Abweichungen des Druckanstiegs dienen mehrfache Aufnahmen wie in Bild 25.

6. Zusammenfassung

Die Verfasser haben ein Meßsystem entwickelt, das es ermöglicht, den augenblicklichen Druckanstieg je Grad Kurbelwinkel anzuzeigen. Ein solches System ist bisher von allen Seiten gewünscht und trotzdem noch nicht gebaut worden. Der versuchsweise gebaute Druckanstieg-Indikator wurde von den Verfassern theoretisch und auch experimentell gründlich überprüft. Es gibt noch Möglichkeiten der Entwicklung bzw. Verbesserung an Einzelheiten des Apparates, aber das Meßsystem selbst kann bereits für praktischen Betrieb eingesetzt werden. Es arbeitet grundsätzlich mit nur geringem Fehler. Besonders ist es bei veränderlicher Drehgeschwindigkeit sehr nützlich.

Der Druckanstieg-Indikator kann nicht nur für Untersuchungen rein wissenschaftlicher Probleme am Verbrennungsmotor sondern auch für die Prüfung von Motoren in der Werkstatt vorteilhaft verwendet werden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Löhner an der T. H. Braunschweig und Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Maki, die den Verfassern die Anregung zu dieser Arbeit gegeben haben, möchten die Verfasser aufrichtigen Dank aussprechen.

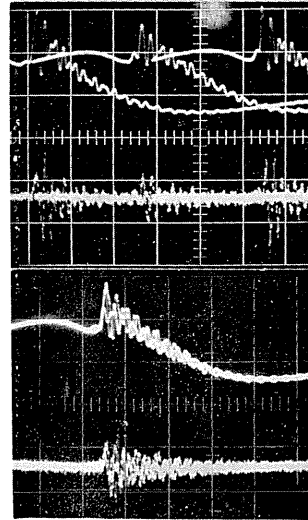


BILD 25. Wiederholt belichtete Aufnahmen.

Schrifttum

- 1) H. R. Ricardo; Der schnelllaufende Verbrennungsmotor, S. 11, 79, 89, 294, Springer-Verlag. (1954).
- 2) K. Löhner: Die Brennkraftmaschine, S. 32. VDI-Verlag. (1963).
- 3) K. Terada: DFL-Bericht Nr. 133 (1960).
- 4) K. Terada, O. Kruggel: DFL-Bericht Nr. 194 (1963).
- 5) S. Matsuoka: J. JSME 65-520, S. 734 (1962).
- 6) S. Matsuoka: J. JSME 65-552, S. 945 (1962).
- 7) S. Matsuoka, H. Shimizu: Trans. JSME 28-195, S. 1577 (1962).
- 8) J. Meyer: DFL-Bericht Nr. 228 (1963).
- 9) H. Brockhaus: ATZ 65-6, S. 155 (1963).
- 10) F. Nagao, H. Kakimoto, T. Hiraoka: Trans. JSME 24-144, S. 599 (1958).
- 11) F. Nagao, M. Ikegami, H. Konishi: Trans. JSME 29-198, S. 395 (1963).