531. 787. 088 : 621. 37

Experimentelle Untersuchungen über die Elektronische Kompensation der Einflüsse vom Indikator- Verbindungskanal*

Von KO TERADA**, Sadamune ETO***, Shin SUZUKI****,
und Shiro KOGISO****

Der beim Anbringen eines Indikator-Druckaufnehmers am Motor entstehende Verbindungskanal verfälscht das Drucksignal. Die Verfasser haben eine Kompensationsschaltung gebaut und überprüft, die, im Gegensatz zum bisherigen Verfahren durch Drosselung des Kanals, die im aufgenommenen Drucksignal enthaltenen Einflüsse des Verbindungskanals elektronisch kompensiert. Nach diesem Verfahren erhält man wesentlich bessere Indikator-Diagramme als bisher.

1. Einleitung

Beim Indizieren befinden sich im Zylinderkopf eines Verbrennungsmotors oft ein Verbindungskanal und ein kleiner Raum vor der Druckaufnehmer-Membran. In solchen Fällen werden Drucksignale aufgenommen, die durch Schwingungen und Reibung im Verbindungskanal und im kleinen Raum vor dem Druckaufnehmer verzerrt sind. Seit langem baut man gewöhnlich eine Drosselungsvorrichtung in den Verbindungskanal ein, damit die Druckschwingungen gedämpft werden. Aber bei Anwendung dieses Verfahrens wird die Aufnahme von steilen Druckanstiegen durch die Drosselung gestört.

Für die Beziehungen zwischen dem Brennraumdruck und dem Druck gerade vor der Druckaufnehmer-Membran ist eine für diese Arbeit brauchbare Gleichung vorgeschlagen worden⁽¹⁾. Wenn man eine elektronische Kompensationsschaltung nach dieser Gleichung baut und damit das Ausgangssignal des Druckaufnehmers kompensiert, kann man ein wesentlich genaueres Signal erhalten als durch das Drosselverfahren. Die Verfasser haben ein elektronisches Kompensationsgerät gebaut, um die Möglichkeit der elektronischen Kompensation der Einflüsse vom Verbindungskanal zu untersuchen. Die Kompensationsschaltung ist einfach und kann durch entsprechende Einstellung für verschiedene Verbindungskanäle verwendet werden, weil ihre Konstanten beliebig reguliert werden können. Der Frequenzgang

ist bei diesem Verfahren wesentlich besser als bei Drosselung.

2. Grundlagen

2.1 Übertragungseigenschaften des Verbindungskanals

Der in Bild 1 dargestellte Verbindungskanal wirkt als Filter, dessen Eigenschaft beispielsweise in Bild 2 aufgetragen ist. Der Verbindungskanal hat viele Resonanzfrequenzen.

Nach Gl. (1), die später gezeigt wird, beträgt die tiefste Resonanzfrequenz für eine gewöhnliche Kanallänge von 3~4 cm rund 2 000 Hz, und die zweite um 6 000 Hz herum. Weil für normale Zwecke die obere Grenze von Druckschwingungsfre-

Bild 1 Indikator-Verbindungskanal

Bild 2 Beispiel des Frequenzganges eines Verbindungskanals

* Eingegangen am 25. 7. 1968.

** Assistenzprofessor, Technische Fakultät, Universität Nagoya, Chikusa-ku, Nagoya.

*** Doktorand, Technische Fakultät, Universität Nagoya.

**** Masterkursus-Student, Technische Fakultät, Universität Nagoya.

quenzen, die durch den Indikator wiedergegeben werden sollen, ungefähr in der Nähe der zweiten Resonanzfrequenz liegen darf, genügt es, einen flachen Frequenzgang bis zu dieser Frequenz dadurch zu erhalten, daß man Geräusch und Signale noch höherer Frequenzen durch ein Filter beseitigt, das gleichzeitig die dabei auftretende Verstärkung in der Nähe der zweiten Resonanzfrequenz ausgleicht. Man kann also eine Kompensation des Verbindungskanals dadurch erzielen, daß man die erste Resonanz mit einer nach Gl. (1) gebauten elektronischen Schaltung kompensiert, und die zweite mit einem entsprechenden Filter ausgleicht. In der vorliegenden Arbeit ist eher auf die elektronische Kompensationsschaltung für die erste Resonanz Gewicht gelegt als auf das oben erwähnte Filter. Das Indikatordiagramm wird von der Druckschwingung der ersten Resonanzfrequenz am stärksten beeinflusst, deren Amplitude viel größer ist als die der anderen Resonanzschwingungen.

2.2 Gleichung für die Drücke vor und hinter dem Verbindungskanal

Für die Beziehung zwischen dem Brennraumdruck und dem Druck gerade vor der Druckaufnehmer-Membran gibt es mehrere Gleichungen, von denen hier jedoch nur eine angeführt wird. Diese ist die Gleichung, die auf das Kompensationsgerät angewendet wurde⁽¹⁾.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{p}_G + 2\theta |\dot{p}_G| \dot{p}_G + \omega_0^2 p_G &= \omega_0^2 p_Z \\ \omega_0 &= \frac{a_0}{l\sqrt{1+V/fl}}, \\ \theta &= \frac{1+V/fl}{4\kappa p_0} \left\{ \frac{1}{\mu^2} + \lambda \left(\frac{l}{d} \right) \right\}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

wobei p_G =Druck vor der Druckaufnehmer-Membran, p_Z =Brennraumdruck, a_0 =Schallgeschwindigkeit des Gases, $f=\pi d^2/4$, $\kappa=c_p/c_v$, p_0 =mittlerer Druck (Bezugsdruck), μ =Durchflußkoeffizient des Verbindungskanals (etwa 0,7) und λ =Reibungskoeffizient des Kanals (etwa 0,02). Diese Gleichung wurde unter folgenden Annahmen abgeleitet:

a. In der Kontinuitätsgleichung und der Eulerschen Bewegungsgleichung sind für die Gasströmung $\partial u^2/\partial x$ und $\partial \rho/\partial x$ als klein angesehen und vernachlässigt.

b. Für die Reibung ist eine stationäre Strömung angenommen.

c. Das Verbrennungsgas, das sich im kleinen Raum vor dem Druckaufnehmer befindet, mache adiabatische Zustandsänderung.

Bei der Auswahl der auf die Kompensation anzuwendenden Gleichung wurde berücksichtigt, daß vor allem die Kompensationsschaltung möglichst einfach gebaut werden sollte. Hauptsächlich aus diesem Grunde hat man Gl. (1) angewendet, während die anderen Gleichungen auch eigene

Charakter haben.

Außer dem Vorteil, daß die Kompensationsschaltung einfach gebaut werden kann, ist in Gl. (1) der Reibungszustand der zweiten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit proportional, was dem tatsächlichen Verhältnis ähnlich zu sein scheint. Auf der anderen Seite aber kann die Schwingung im Verbindungskanal an sich nicht so einfach ausgedrückt werden wie Gl. (1), weil sie eine Schwingung mit unendlich vielen Freiheitsgraden ist. Diese Gleichung hat also nur eine einzige Resonanzfrequenz, obwohl es in der Praxis viele Resonanzfrequenzen gibt. Aber weil beim Entwurf der Kompensationsschaltung nur die erste Resonanz in Frage kommt, kann man zu diesem Zweck Gl. (1) anwenden, sofern man in diesem Sinne die einfachste Gleichung benutzen will.

Nach diesen Betrachtungen hat man eine Kompensationsschaltung nach Gl. (1) gebaut. In der vorliegenden Arbeit hat man nach der Untersuchung der Genauigkeit, die bei der praktischen Anwendung in Frage kommt, die Kompensationsgüte durch Experimente kontrolliert.

3. Untersuchung der Kompensationsmöglichkeit nach dem angewendeten Verfahren

Im folgenden wird erörtert, wieweit die Einflüsse des Verbindungskanals durch die Kompensationsschaltung ausgeglichen werden können. Auch das Prüfverfahren dafür ist beschrieben.

3.1 Experimente mit dem Stoßwellenrohr

Um einen stufenförmigen Drucksprung zu erhalten, der für die Überprüfung der Eigenschaften des Verbindungskanals durch seine Reaktionsverhalten auf eine stufenartige Druckveränderung notwendig ist, hat man ein Stoßwellenrohr gebaut. Zwischen eine 3 m lange Hochdruckkammer und eine 6 m lange Niederdruckkammer wurde eine 0,15 mm dicke Messingmembran eingelegt, die, nachdem die Hochdruckkammer auf etwa 27 kp/cm² aufgepumpt worden war, durch eine Nadelvorrichtung durchgestoßen wurde. Der auf diese Weise erzeugte Drucksprung war etwa 6 kp/cm² hoch, und als er nach einer Reflexion am geschlossenen Ende der Niederdruckkammer zurückkam, wurde er ungefähr zweimal so hoch wie der ursprüngliche Druck. Zum Experiment wurde diese reflektierte Stoßwelle verwendet, deren Druck mit zwei Druckaufnehmern gemessen wurde. Der eine wurde unmittelbar am Rohr befestigt, so daß seine Membran mit der Rohrinnenfläche übereinstimmte, und der andere vermittelt eines Verbindungskanals. Beide Druckaufnehmer wurden um die Rohrachse symmetrisch und mit gleichem Abstand vom Rohrende befestigt. Der Abstand vom Rohrende

wurde so gewählt, daß der Druck nach dem stufenförmigen Sprung möglichst lang gleich blieb. Außerdem wurde zwischen der Messingmembran und den beiden Druckaufnehmern ein dritter Druckaufnehmer eingeschraubt, der zur Erzeugung des Trigger-Signals für das Synchroskop benutzt wurde. Damit der Anfang der horizontalen Ablenkung beliebig eingestellt werden konnte, wurde das Ausgangssignal des dritten Druckaufnehmers zu einem Verzögerer geleitet, durch den das Trigger-Signal nach einem beliebigen Zeitabstand dem Synchroskop gegeben wurde. Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung des Stoßwellenrohrs, und Bild 4 stellt die Nadelvorrichtung zum Durchstoßen der Messingmembran dar. Die verwendeten Druckaufnehmer nach dem Dehnmeßstreifen-Prinzip hatten eine Längs- und Quereigenschwingungsfrequenz von etwa 35 bzw. 15 kHz.

3.2 Genauigkeit der angewendeten Gleichung

Um die Genauigkeit der angewendeten Gleichung zu überprüfen, hat man dem Eingang eines Analogrechners statt p_z der Gl. (1) einen stufenförmigen Spannungssprung e_z gegeben. Durch den Analogrechner, der entsprechend Gl. (1) geschaltet war, hat man die Lösung e_g erhalten, die p_g von Gl. (1)

Bild 3 Schematische Darstellung des Stoßwellenrohrs und der Anordnung von Meßgeräten

Bild 4 Durchstoßnadelvorrichtung des Stoßwellenrohrs

entsprach. Andererseits wurde mittels des Stoßwellenrohrs bei einem stufenförmigen Eingangsdrucksprung das Ausgangssignal p_g des Druckaufnehmers mit Verbindungskanal ermittelt. Die Wellenform von p_g wurde mit der von e_g verglichen, indem jeweils die Summe ΔS der Flächenräume, die von der Ein- und Ausgangskurve umgeben waren, und die Bezugsfläche S_0 , die von der Eingangskurve und der Nulllinie umgeben war, planimetrisch festgestellt (Bild 5) und $\Delta S/S_0$ -Werte von p_g und e_g gegenübergestellt wurden. Das Ende der Flächenmessung war der Zeitpunkt, in dem die mit dem Druckaufnehmer gemessene Druckschwingung genügend gedämpft war. Die in diese Flächenmessung einbezogene Zeitdauer ist daher je nach der Länge des Verbindungskanals unterschiedlich. Aber sie wurde bei gleicher Kanallänge für e_g und p_g gleich lang gewählt. Diese Zeitdauer betrug für 20, 30, 45, 60 und 100 mm Länge jeweils 4, 5, 6,5, 8 bzw. 10 msek. Das Volumen der Hohlkammer vor der Druckauf-

Bild 5 Definition von ΔS und S_0

Bild 6 Beispiele des Frequenzganges

Tabelle 1 Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung für Gl. (1)

	$\frac{l}{d}$	$\Delta S/S_0$					f_0 Hz				
		100	60	45	30	20	100	60	45	30	20
Stoßwellenrohr	3	0,126	0,105	0,118	0,116	0,100	475	650	800	975	1150
	4	0,144	0,141	0,138	0,155	0,094	575	825	1000	1250	1425
	5	0,130	0,121	0,127	0,128	0,124	650	925	1100	1450	1825
Analogrechner	3	0,099	0,086	0,077	0,065	0,062	600	800	975	1250	1700
	4	0,104	0,084	0,075	0,072	0,059	600	900	1075	1525	2025
	5	0,107	0,085	0,080	0,073	0,064	625	975	1250	1725	2425

nehmer-Membran betrug in allen Fällen $0,467 \text{ cm}^3$. Wenn die Frequenz der Schwingung und das Flächenverhältnis $\Delta S/S_0$ bei e_G und p_G gleich waren, wurde der Fehler als Null angesehen. Die Vergleichsergebnisse sind in Tabelle 1 gezeigt, und in Bild 6 ein Beispiel für einen Verbindungskanal mit 100 mm Länge und 5 mm Durchmesser.

Der Verstärkungsverlauf wurde durch die Guilleminsche Annäherungsmethode mit Endkorrektur⁽²⁾ festgestellt. Nach Tabelle 1 sind die Unterschiede zwischen den berechneten und gemessenen Werten von $\Delta S/S_0$ gering. Diese Unterschiede wurden hauptsächlich durch die in den gemessenen Signalen enthaltenen hochfrequenten Anteile hervorgerufen, die schließlich durch ein Filter beseitigt werden sollen. Für die Kompensation sind sie deshalb nicht problematisch. Zwischen den berechneten und gemessenen f_0 -Werten gibt es auch noch Unterschiede. Aber beim Gebrauch des Kompensationsgerätes werden die Konstanten der Schaltung aufgrund der tatsächlichen Resonanzfrequenz bestimmt, so daß auch diese Frequenzunterschiede nicht kritisch werden.

Im oben gezeigten Vergleich wurden folgende Zahlenwerte angenommen:

$$\lambda = 0,02, \quad \mu = 0,7, \quad \kappa = 1,4, \quad a_0 = 450 \text{ m/sek}, \\ p_0 = 6 \text{ kp/cm}^2, \quad p_z = 7 \text{ kp/cm}^2.$$

Die Schallgeschwindigkeit wurde durch eine Annahme bestimmt, daß sich am Anfang in der Niederdruckkammer des Stoßwellenrohrs Luft von Atmosphärendruck und Zimmertemperatur befand.

Durch diese Überlegungen haben die Verfasser beurteilt, daß Gl. (1) auf die Kompensationsschaltung für den Verbindungskanal angewendet werden kann.

3.3 Vereinfachung der Kompensationsschaltung

Durch eine Schaltung nach Gl. (1) können die Eigenschaften des Verbindungskanals mit ausreichender Genauigkeit kompensiert werden. Wenn die

Bild 7 GröÙe des Dämpfungsgliedes

Schaltung jedoch ohne besonders große Fehler noch vereinfacht werden könnte, wäre es wünschenswert. Als Vereinfachungsmaßnahme haben die Verfasser eine Linearisierung der Gleichung herangezogen.

Gl. (1) kann mit Signalspannungen e_G und e_Z , die p_G bzw. p_Z entsprechen, folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\ddot{e}_G + 2\theta |\dot{e}_G| \dot{e}_G + e_G = e_Z \quad (2)$$

wobei statt der in Gl. (1) verwendeten Zeit t eine neue Zeit $T = \omega_0 t$ eingeführt worden ist, und θ bei der Umrechnung auf die elektrische Spannung einen neuen Wert genommen hat.

Wenn man anstelle des nichtlinearen Dämpfungsgliedes von Gl. (2) $2\theta m \dot{e}_G$ mit einer Konstanten m verwendet, bekommt man folgende Gleichung:

$$\ddot{e}_G + 2\theta m \dot{e}_G + e_G = e_Z \quad (3)$$

Um den durch die Vereinfachung hervorgerufenen Fehler klar zu machen, hat man bei einer stufenförmigen Eingangsspannung e_Z die Ausgangsspannung e_G für sowohl Gl. (2) als auch Gl. (3) analogrechnerisch ermittelt und den Unterschied beobachtet.

Die GröÙe des Dämpfungsgliedes von Gl. (2) ist im Sprungvorgang und bei der darauffolgenden Schwingung sehr unterschiedlich, wie es in Bild 7 durch ein analogrechnerisch gewonnenes Beispiel gezeigt ist. Daher ist es unmöglich, eine Gerade den ganzen Bereich vertreten zu lassen. Übrigens hat sich gezeigt, daß in der Schwingungsperiode die

Bild 8 Definition von S und α

Bild 9 Maximalsteigungs- u. Flächenverhältnisse abhängig von m

Druckschwingungsgeschwindigkeit und damit auch das Dämpfungsglied in Gl. (2) sehr klein ist, und daß dadurch die Schwingung nach Gl. (2) auch nach dem Abklingen der Schwingung nach Gl. (3) noch nicht verschwindet. Deswegen haben die Verfasser nur den Sprungvorgang betrachtet.

Wenn einem nach Gl. (2) bzw. Gl. (3) geschalteten Analogrechner ein stufenförmiger Sprung als Eingangsspannung gegeben wird, und wenn die dadurch gewonnenen Ausgangskurven angenähert miteinander übereinstimmen, kann man annehmen, daß im Sprungvorgang das Ausgangssignal e_z von Gl. (3), das durch Einsetzen von e_G aus Gl. (2) in die Gl. (3) ermittelt wird, annähernd gleich dem ursprünglichen stufenförmigen Eingangssignal von Gl. (2) ist. Aufgrund dieser Überlegung hat man die e_G -Kurven aus Gl. (2) und (3) verglichen.

Als Faktoren, die den Unterschied zwischen beiden e_G -Kurven bezeichnen, wurden wie in Bild 8 die maximale Steigung $\operatorname{tg} \alpha$ im Sprungvorgang und die sich dort ergebende Fläche S gewählt. Für die Kurve aus Gl. (2) wurden diese Faktoren als $\operatorname{tg} \alpha_1$ bzw. S_1 bezeichnet, und für die Kurve aus Gl. (3) als $\operatorname{tg} \alpha_2$ bzw. S_2 . Die Werte von $\operatorname{tg} \alpha_2/\operatorname{tg} \alpha_1$ und S_2/S_1 wurden dann in Abhängigkeit von m und 2θ ermittelt.

In Bild 9 sind $\operatorname{tg} \alpha_2/\operatorname{tg} \alpha_1$ und S_2/S_1 über m aufgetragen, wobei die Stufenhöhe der sprunghaften Eingangsspannung vom Analogrechner auf 10 V eingestellt wurde. Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß es einen m -Wert gibt, bei dem entweder $\operatorname{tg} \alpha_2/\operatorname{tg} \alpha_1$ oder S_2/S_1 gleich 1 ist, wenn die Größe von 2θ gegeben ist. Aber es gibt im allgemeinen keinen m -Wert, bei dem beide Faktoren gleichzeitig 1 sind. Für die Verbindungskanäle, die bei der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, betrug 2θ 0,14 bis 0,43.

Bild 10 Vergleich von linearem und nichtlinearem Ansprechen.

Als Beispiel sind in Bild 10 aus Gl. (2) und (3) analogrechnerisch gewonnene Kurven für $\operatorname{tg} \alpha_2/\operatorname{tg} \alpha_1 = 1$ bzw. $S_2/S_1 = 1$ gezeigt. Wie das Bild zeigt, ist die Übereinstimmung der Kurven bei $S_2/S_1 = 1$ viel besser. Es ist bei der Vereinfachung durch Linearisierung günstiger, daß man einen m -Wert wählt, bei dem die Fläche S für beide Kurven gleich ist.

4. Kompensationsschaltung

4.1 Über die versuchsmäßig gebaute Kompensationsschaltung

Die versuchsweise Kompensationsschaltung wurde so gebaut, daß man nach Gl. (1) aus einem Eingangssignal p_G ein Ausgangssignal p_Z erhalten konnte. Für diesen Zweck kann man zwei verschiedene Schaltungen anwenden, wie sie in Bild 11a und b schematisch dargestellt sind. Davon haben die Verfasser die Schaltung a gewählt, die einfacher ist als b. Die Schaltung a ist leicht zu bauen, aber durch ihre Differentiationsschaltungen wird sehr leicht Geräusch erzeugt. Aber weil die Frequenz derartigen Geräusches gewöhnlich mehr als etwa 8000 Hz beträgt, kann man es durch ein entsprechendes Tiefpaßfilter beseitigen. Wenn man Signalfrequenzen, die höher als diese Geräuschfrequenz sind, beobachten will, muß man die Schaltung b verwenden. In Bild 11 sind statt p_G und p_Z die entsprechenden Spannungen e_G bzw. e_Z eingezeichnet. Bild 11c zeigt das Rückkopplungs-Kompensationselement für die Schaltung b.

Haupteigenschaften der gebauten Kompensationsschaltung sind in Bild 12 gezeigt. Diese Eigenschaften sind für den Kompensationszweck zufriedenstellend. Die Zeitkonstante der Differentiationsschal-

Bild 11 Kompensationsschaltungen

tung kann stufenweise reguliert werden. Im Bild sind die Ausgangsspannungen bei jeder Zeitkonstanten dargestellt.

4.2 Kompensationsexperimente

Für einen Verbindungskanal mit 5 mm Durchmesser und 100 mm Länge wurde die versuchsmäßig gebaute Kompensationsschaltung angewendet, und damit wurde bei einem stufenartigen Eingangssprung das Ausgangssignal des Druckaufnehmers kompensiert. Die Ergebnisse sind in Bild 13 gezeigt. In diesem Fall wurde die Verstärkung in der Nähe der zweiten Resonanz von 2000 Hz durch ein Tiefpaß-

Bild 12 Eigenschaften der Hauptteile vom Kompensationsgerät

Bild 13 Kompensationsbeispiel bei einem stufenförmigen Eingangsdrucksignal

filter ausgeglichen, dessen Frequenzgang von Kurve c in Bild 14 vertreten wird. Die bei etwa 650 Hz liegende erste Resonanz von Kurve a, die aus dem Ausgangssignal des mit dem Verbindungskanal ausgerüsteten Druckaufnehmers durch das Guilleminsche Annäherungsverfahren gewonnen wurde, ist

Eingangsspannung des Summierers

Bild 14 Frequenzgang eines Verbindungskanals

durch die Kompensationsschaltung ausgeglichen worden, und der Frequenzgang wird Kurve b, die gegen die zweite Resonanzfrequenz allmählich steigt. Das kompensierte Ausgangssignal wird hinter einem nachgeschalteten Filter gewonnen, das zwischen 1 000 und etwa 1 800 Hz im Vergleich mit Kurve b eine fast genau umgekehrte Eigenschaft (Kurve c) aufweist. Wenn man sich eine Kombination von Kurven b und c vorstellt, kann man leicht verstehen, daß man fast bis zu etwa 2 000 Hz, d.h. der zweiten Resonanz einen flachen Frequenzgang erhalten kann. Dieser ist viel besser als Kurve d, die bei Verwendung einer Drossel von 3 mm Durchmesser, der für einen 5 mm-Verbindungskanal als am geeignetsten angesehen wird⁽¹⁾, festgestellt wurde. In Tabelle 2 sind vor der Kompensation, nach der Kompensation durch Kompensationsschaltung

Bild 15 Anwendungsbeispiel auf das Indizieren an einem Dieselmotor mit Direkteinspritzung

und Filter und durch Drosselung mit verschiedenen Durchmessern Werte vom in Bild 5 definierten Flächenraum zusammengestellt.

Bild 15 wurde durch Anwendung dieses Kompensationsverfahrens auf einen Dieselmotor mit Direkteinspritzung erhalten, wobei der Verbindungskanal einen Durchmesser von 4 mm und eine Länge von 60 mm hatte. Eine genaue Feststellung der Schallgeschwindigkeit a_0 vom Verbrennungsgas ist beim Experiment am Motor sehr schwierig, und daher wird auch ω_0 rechnerisch nicht genau ermittelt. Deswegen hat man ω_0 aus dem noch nicht kompensierten Signal abgelesen, und dementsprechend die Konstanten der Schaltung eingestellt.

In Bild 16 sind mit Hilfe des Stoßwellenrohrs gewonnene Ausgangssignale des Druckaufnehmers bei Drosselung mit verschiedenen Durchmessern gezeigt. Verglichen mit Bild 13, das mit Hilfe der Kompensationsschaltung ermittelt wurde, ist die Schulterpartie des Sprungs von den Kurven in Bild 16 mit abnehmendem Drosselungsdurchmesser stumpfer ausgerundet. Auch bei 3 mm Durchmesser, der für diesen Verbindungskanal als am geeignetsten angesehen wird, ist die Schulterpartie ziemlich stumpf ausgerundet, während bei der elektronischen Kompensation (Bild 13) die Schulterpartie kaum stumpf geworden ist. Bei letzterer gibt es nur schwache Schwingungen, deren Amplitude kleiner als etwa 0,5 kp/cm² ist, abgesehen

(a) 4 mmφ Drosselung

(c) 2 mmφ Drosselung

(b) 3 mmφ Drosselung

(d) 1 mmφ Drosselung

Bild 16 Ein- und Ausgangssignale bei verschiedenen Drosselungsdurchmessern ($d=5$ mm, $l=100$ mm)

Tabelle 2 Vergleich von $\Delta S/S_0$ -Werten bei verschiedenen Zuständen des Kanals

Zustand des Kanals	ohne Drosselung ohne Kompensation	ohne Drosselung mit Kompensation	4 mmφ Drosselung	3 mmφ Drosselung	2 mmφ Drosselung	1 mmφ Drosselung
$\Delta S/S_0$	0,165	0,035	0,091	0,036	0,145	0,541

von einer nach unten gerichteten Spitze ca. 1 msec nach dem Aufsprung. Solche Schwingungen haben keinen Einfluß auf das Indikatordiagramm bei Motorbetrieb, was aus Bild 15 ersichtlich ist. Das kommt vielleicht auch daher, daß die Drucksteigerung im Motor nicht so steil ist wie im Stoßwellenrohr.

5. Schlußbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit liegt der elektronisch zu kompensierende Frequenzbereich unter der zweiten Resonanz des Verbindungskanals. Deswegen wird selbstverständlich die obere Grenze des kompensierten Frequenzbereiches nach unten geschoben, wenn der Verbindungskanal länger wird. Wenn daher ein schnellaufender Kleinmotor einen ungewöhnlich langen Verbindungskanal hat, können hochfrequente Signale, die bei einem solchen Kleinmotor benötigt werden, nicht mehr genau wiedergegeben. Aber schnellaufende Kleinmotoren haben normalerweise einen kurzen Verbindungskanal. In fast allen Fällen kann man daher durch die elektronische Kompensation Indikatordiagramme mit genügender Genauigkeit erhalten.

Es ist auch ein Vorteil dieses Kompensationsverfahrens, daß die Konstanten der Schaltung entsprechend den Abmessungen des jeweiligen Verbindungskanals sehr einfach eingestellt werden können, und daß sich dadurch ein einziges Kompensationsgerät für verschiedene Kanäle verwenden läßt.

In Bild 13 beginnt der Sprung des Signals vor der Kompensation später als der des Eingangssignals, und zwar mit einer Zeitverschiebung, die aus der Kanallänge und Druckwellengeschwindigkeit bestimmt und durch eine Verschiebung der Zeitachse ausgeglichen wird, was ebenfalls für Bild 16 gilt. In Bild 13 springt das Ausgangssignal nach der Kompensation noch etwa 0,2 msec später auf, was durch das Filter, das zum Ausgleich der zweiten Resonanz verwendet wurde, bedingt wurde. Aber weil Motoren mit einem so langen Verbindungskanal im allgemeinen verhältnismäßig groß sind und langsam laufen, ist die Zeitverschiebung von 0,2 msec

nicht problematisch. Die meisten kleineren Motoren haben einen Verbindungskanal mit 3 bis 4 cm Länge, bei der die Grenzfrequenz des Filters auch entsprechend erhöht wird, und die Zeitverschiebung wird dann so gering, daß sie im Vergleich mit der Liniendicke auf dem Leuchtschirm vernachlässigt werden kann.

Wenn man nur das Verhältnis S_2/S_1 in Tabelle 2 betrachtet, ist der Unterschied zwischen der elektronischen Kompensation und der Drosselung mit 3 mm Durchmesser kaum zu nennen, wozu die nach unten gerichtete Spitze der kompensierten Kurve in Bild 13 wesentlich beiträgt. Aber in Bild 13 ist die Kurve in der Schulterpartie nicht ausgerundet wie bei Bild 16b, und die obengenannte Spitze erscheint bei der Messung am Motor auch nicht (Bild 15).

Die Vereinfachung durch Linearisierung ist nur für den Sprungvorgang mit geringem Fehler durchzuführen, und eine Annäherung für den ganzen Verlauf ist nicht möglich.

Aus den erhaltenen Ergebnissen kann man folgendermaßen schließen:

- 1) Gl. (1) hat eine für die elektronische Kompensation genügende Genauigkeit.
- 2) Die elektronische Kompensation des Indikator-Verbindungskanals ist qualitativ der Drosselung des Kanals entscheidend überlegen.
- 3) Durch Verwendung einer Kompensationschaltung und eines Filters kann man einen flachen Kompensationsfrequenzgang ungefähr bis zur zweiten Resonanz erhalten.
- 4) Eine Vereinfachung durch Linearisierung ist nur auf den Sprungvorgang anwendbar.
- 5) Durch die vorliegende Arbeit wurde eine neue Methode für die Kompensation des Verbindungskanals gefunden und entwickelt, und die Überlegenheit der elektronischen Kompensation wurde gezeigt.

Schrifttum

- (1) F. Nagao and M. Ikegami. *Bulletin of JSME*, Vol. 8, No. 29 (1965), p. 98; Vol. 30, No. 213 (1964), p. 645.
- (2) S. Matsuoka and H. Shimizu: *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs.*, Vol. 28, No. 195 (1962), p. 1577.