

A 24

Berichte des Technischen Prüfstandes Oppau

Bericht Nr. 475

**Aufnahme von Klopferschwingungen
mittels Körperschall und deren
elektrische Fernübertragung**

8850



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

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 475

Aufnahme von Klopferschwingungen mittels Körperschall und

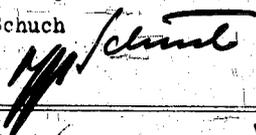
deren elektrische Fernübertragung

Übersicht: Zur Feststellung des Betriebszustandes von Motoren werden Geräte benötigt, die eindeutig etwaiges Klopfen erfassen und auf grössere Entfernungen zu übertragen erlauben. Ein solches Gerät, das Klopferschwingungen mittels Körperschalles aufnimmt und entweder auf der Braun'schen Röhre oder über einen Lautsprecher anzeigt, wird beschrieben.

Die Erprobung an Motoren verschiedenster Bauart weist die allgemeine Verwendbarkeit des Gerätes nach. Es zeigt sich als vorteilhaft, dass die optische und akustische Erfassung des Klopfens gleichzeitig vorgenommen werden kann.

Abgeschlossen am: 1. September 1941

Bearbeiter: Dr. E. Schuch



Dievorliegende Ausfertigung enthält

10 Textblätter

4 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		Herrn Prof. Dr. A. W. Schmidt, München,			
2		Betriebskontrolle Op.,			
3		Herrn Dipl. Ing. Penzig,			
4		Herrn Dr. Schuch,			
5-10		Techn. Prüfstand			

8851

Aufnahme von KlopfSchwingungen mittels Körperschall und
deren elektrische Fernübertragung

Bei Überladeversuchen, wie sie beispielsweise an Flugmotoren ausgeführt werden, ist die Feststellung des Klopfbeginns von grösster Bedeutung. Von den verschiedenen Methoden, die bereits dafür vorgeschlagen wurden¹⁾, verdienen verständlicherweise die Verfahren besonderen Vorzug, die ohne jeglichen Ein- oder Anbau am Motor auskommen. So dürfte die direkte Abhörmethode in dieser Beziehung die günstigste sein. Sie versagt jedoch, wenn man den Motor etwa in einem schalldichten Raum aufstellt und die Bedienung von ausserhalb vornimmt. Sie versagt aber auch, wenn der allgemeine Störpegel sehr hoch liegt. Man ist dann gezwungen, andere Verfahren heranzuziehen. Nun scheint es am einfachsten, anstelle des unmittelbaren Abhörens ein Mikrofon mit entsprechender elektrischer Verstärkung und einem Lautsprecher bzw. Kopfhörer zu setzen, oder ganz auf das Abhören zu verzichten und mittels Braun'scher Röhre gegebenenfalls mit Aussiebung der nicht interessierenden Frequenzen die Klopföne sichtbar zu machen. Solche Versuche sind z.B. von Jawrziniok¹⁾ zuerst ausgeführt worden. Er benutzte ein Kondensatormikrofon, wobei mit Hilfe eines kurzen Gummischlauches die Nebengeräusche ferngehalten wurden. Auch A.J.Schmidt^{3) 12)} verwendete anfänglich ein solches Mikrofon. Doch ist in letzter Zeit wegen der vielen möglichen Fehlerquellen und der Schwierigkeiten der günstigsten Anbringung und der Unterbringung des Mikrofon in den Hintergrund getreten. Versuche, die durch das Klopfen hervorgerufenen Schwingungen des Motorgehäuses, den sogen.Körperschall selbst unmittelbar zur Klopfstärkemessung heranzuziehen, zeigten dagegen, dass hier diese Schwierigkeiten weitgehend wegfallen. Die ersten Versuche dieser Art gehen auf E.S.L.Beale und R.Stansfield (Automotive Ind. 76, 1937, 693) zurück, die mittels eines magnetischen Gebers die Erschütterungen zwischen Motorgehäuse und Fundament massen. Ein Zeigerinstrument gab die Klopfstärke an. Etwas später verwendete J.S.Mount¹⁷⁾ einen

¹⁾ Schrifttumsnachweis am Schluss

Kristallgeber und zeichnete die Schwingungen mittels Braun'scher Röhre auf. In Deutschland wurden nahezu gleichzeitig zuerst von J.Ratzke¹⁵⁾ und von A.W.Schmidt¹⁶⁾ die Gehäuseschwingungen unmittelbar zum Nachweis des Klopfens herangezogen. Besonders A.W.Schmidt und seine Mitarbeiter haben die Anwendbarkeit dieses Verfahrens weitgehend erprobt und seine gute Brauchbarkeit für Mehrzylindermotoren insbesondere für Fahrzeugmotoren nachgewiesen. Dabei wurden als Aufnahmegeräte Kristallgeber verwendet.

Im vorliegenden Falle interessierte vor allem, inwieweit das angegebene Verfahren zur Ermittlung des Klopfzustandes von Flugmotoren-Einzylinder verwendbar ist. Da jedoch z.Zt. die Beschaffung von Kristallgebern grosse Schwierigkeit macht, wurde ein permanent-dynamischer Geber entwickelt, der Dauerbeanspruchungen sehr gut gewachsen ist. Seine Brauchbarkeit wurde durch Versuche an Motoren verschiedener Bauart erwiesen. Über die Ausführung dieses Gebers und die damit durchgeführten Untersuchungen wird im folgenden berichtet.

Versuchsdurchführung

Die Gesamtanordnung des Gerätes zeigt Bild 1. Sie ermöglicht eine Klopfanzeige auf sehr grosse Entfernungen. Dabei wird ein Geber, dem die Erschütterungen des Motors durch einen Stahldraht zugeleitet werden, an einen Siebkreis angeschlossen, der aus dem ankommenden Frequenzgemisch die nicht interessierenden Schwingungen heraussiebt. Die durchgelassenen Schwingungen werden in einem zweistufigen Wechselstrom-Widerstandsverstärker verstärkt. Durch Anschluss einer Braun'schen Röhre können sie dann sichtbar gemacht werden. Man kann aber auch beispielsweise den handelsüblichen Drahtfunkverstärker mit Lautsprecher an den Ausgang des Verstärkers anschliessen und so die Klopferschwingungen direkt hören. Sie treten sehr gut gegenüber dem allgemeinen Störpegel hervor.

Zur Aufnahme der Klopferschwingungen muss bei Versuchen von längerer Dauer der Geber direkt an der Maschine oder in deren Nähe befestigt werden. Dabei sind u.U. die mechanischen Beanspruchungen sehr stark. Es können hierfür nur robuste und für lange Versuchsreihen geeignete Geber Verwendung finden.

Bild 2a zeigt einen solchen Geber, dessen grundsätzlicher Aufbau aus Bild 2b hervorgeht. Im Ringspalt eines Topfmagneten aus Oerstit (Deutsche Edelstahlwerke A.G., Dortmund,) befindet sich eine Spule, durch deren Bewegungen Spannungen erzeugt werden. Die Zentrierung der Spule erfolgt durch zwei besondere Spinnen aus etwa 0,4 mm starker Mipolamfolie. Der Geber ist federnd in einem Ringe aufgehängt, der seinerseits an einem Träger oder einer Stütze befestigt ist. Als günstig erwies sich, den Geber so aufzustellen, dass die Bewegungen der Spule vertikal erfolgen. Die Maschinenschwingungen werden auf die Spule durch einen etwa 0,5 bis 1,5 mm starken Stahldraht übertragen, der einerseits oben am Spulenkörper und andererseits an einer passend gewählten Schraube des Motors befestigt wird. Einige Anordnungen zeigen die Bilder 5 - 7. Die Verbindung muss in leichten Bogen erfolgen. Die günstigste Länge dürfte bei etwa 50 cm liegen. Die Kopplung zwischen Maschine und Geber darf einerseits nicht zu schwach sein, weil sonst zu wenig Energie übertragen wird und die nachfolgende Verstärkung zu gross sein muss; auf der anderen Seite darf sie aber auch nicht zu stark sein, da dann zu viel Maschinenschwingungen übertragen werden. Da bei sehr starkem Klopfen der Draht selbst in Schwingungen gerät, die nur langsam abklingen, was besonders bei Mehrzylinder-Maschinen wegen der schnellen Folge der einzelnen Explosionen unangenehm ist, so müssen u.U. diese Schwingungen für diese Fälle gedämpft werden. Man braucht dazu nur den Draht beispielsweise mit Isolierschlauch zu überziehen.

Der allgemein verwendete Siebkreis (Bild 3) war eine Kondensator-kette erster Art, wie im Bericht 436; jedoch wurden jetzt, um höhere Grenzfrequenzen zu erhalten $L = 0,1 \text{ H}$ (Drosselglied der 2 KH -Sperrre) und $C = 200 + 2000 \text{ pF}$ gewählt. Die Grenzfrequenz errechnet sich nach der Formel $f = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ jetzt zu 5630 Hz bei voll eingedrehtem Kondensator. Dieser Siebkreis eignete sich wesentlich besser für die Messungen als der früher angegebene.

Anstelle dieses Siebkreises wurde insbesondere für die Aufnahme der Bilder das Oktavsieb von Siemens & Halske (Rel msl 19b) verwendet. Es gestattet besser als obiges Sieb einzelne Frequenzen voneinander zu trennen. Daher ist seine Verwendung da vorteilhaft, wo eine scharfe Trennung erforderlich ist bzw. wo sie wünschenswert erscheint.

Der benutzte Verstärker ist ein zweistufiger Wechselstrom-Widerstandsverstärker, dessen Schaltbild Bild 4 zeigt.

Der Ausgang kann direkt an die Höhenablenkplatte einer Braun'schen Röhre angeschlossen werden. Die horizontale Ablenkung erfolgt zur Beobachtung mit einem gewöhnlichen Kippschwingergerät oder einem Seitenablenkgerät, wie es bereits im Bericht Nr. 361 des Techn.Prüfstandes näher beschrieben wurde.

Statt der Braun'schen Röhre lässt sich ohne weiteres nach Anschluss einer Leistungsröhre auch ein Lautsprecher anschließen. So kann z.B. ein Drahtfunkverstärker direkt an den Ausgang des obigen Verstärkers angeschlossen werden. Das Klopfen tritt dabei durch einen sehr lauten, polternden Ton aus dem übrigen Störpegel hervor.

Versuchsergebnisse

Allgemeines:

Das oben beschriebene Verfahren der Klopfmessung mittels des Körperschalls wurde an vier verschiedenen Maschinen erprobt und zwar:

- 1.) BMW-Flugmotor, Einzylinder (BMW 132 N), luftgekühlt,
- 2.) DB-Flugmotor, Einzylinder (DB 6001), wassergekühlt,
- 3.) Hesselman-Einzylinder-Motor,
- 4.) Benz-Vierzylinder-Motor.

Die Ergebnisse und die Erfahrungen werden weiter unten im einzelnen besprochen. Einige Bemerkungen allgemeiner Natur seien hier vorausgeschickt.

Zum Abhören des Klopfens mittels Lautsprecher ist es günstig, den die Klopf-schwingungen übertragenden Stahldraht nicht zu dämpfen. Auch bei Beobachtung mittels Braun'scher Röhre ist die Dämpfung nur bei Mehr-zylinder-Maschinen und da nur dann erforderlich, wenn man die Zylinder einzeln beobachten will. Naturgemäss bringt die Dämpfung einen Energieverlust mit sich. Bei allen im folgenden gebrachten Aufnahmen von Klopf-schwingungen wurde jedoch mittels Isolierschlauches gedämpft. Die Schwingungen klingen dann schneller ab und treten daher in der Aufnahme besser hervor.

Für die Ermittlung des Klopfbeginns bei Untersuchung von Kraftstoffen benutzt man vorteilhafterweise die oben beschriebene Kondensator-kette 1.Art, nicht das Oktavsieb. Dann sind wohl mehr Störschwingungen vorhanden, doch ist die Methode empfindlicher. Insbesondere kann man dann bei Verwendung des Seitenablenkgeräts sehr gut den Klopfbeginn an den höher werdenden Amplituden erkennen. Denn dann liegen alle Schwingungen immer an der gleichen Stelle des Leuchtschirmes. Aber auch bei Verwendung eines Lautsprechers ist die Kondensator-kette von Vorteil. Die Untersuchung mit dem Oktavsieb zeigt nämlich, dass die Schwingungen, die durch das Klopfen am Geber erzeugt werden, nicht aus sehr nahe zusammenliegenden Frequenzen bestehen. Vielmehr stellen auch sie ein Gemisch dar, das einen umso volleren und von dem üblichen Störgeräusch unterschiedlicheren Ton am Lautsprecher hervorruft, je vollständiger es zu ihm gelangt. Sowohl zur Beobachtung auf der Braun'schen Röhre als auch zum Abhören mittels Lautsprecher ist es also aus den dargelegten Gründen günstig, weder den Stahldraht zu dämpfen, noch so stark auszusieben.

Bei den im folgenden gebrachten Aufnahmen sind die Stellen, wo Klopf-schwingungen auftreten, bzw. wo sie zu erwarten sind, durch einen Pfeil oder eine Ziffer gekennzeichnet. Man erkennt sehr gut, dass die einzelnen Verbrennungen sehr ungleichmässig ablaufen. Neben sehr stark

klopfenden Explosionen sind solche, bei denen überhaupt kein Klopfen auftritt. Die Aufnahmen zeigen weiter, dass sich Störschwingungen, vor allem von den Ventilen herrührend, weitgehend unterdrücken lassen.

Wenn im folgenden Frequenzangaben gemacht wurden, so geschah das nur deshalb, um einen Anhaltspunkt zu geben. Es ist klar, dass es schwierig ist, mit dem System Stahldraht-Geber Frequenzmessungen durchzuführen. Ausserdem lässt das Oktavsieb bei Frequenzen über 5000 Hz schon keine genauere Bestimmungen mehr zu, da es einen zu grossen Frequenzbereich hat. Vor allem war das auch nicht das Ziel der Versuche. Es sollte hier vielmehr ein möglichst allgemein verwendbares Gerät zur Bestimmung des Klopfbeginns angegeben werden.

Ergebnisse im Einzelnen:

1.) BMW-Flugmotor-Einzylinder (BMW 132 H)

Die Befestigung des Gebers geht aus Bild 5 hervor. Der die Erschütterungen übertragende Stahldraht ist deutlich zu erkennen. Die Befestigung des Drahtes erfolgte ziemlich weit vom Zylinder entfernt. Die bei dieser Aufnahme aufgenommenen Klopfeschwingungen gibt das Bild 8 wieder. Die Klopfeschwingungen liegen ziemlich hoch, über 6400 Hz.

2.) DB-Flugmotor-Einzylinder (DB 6001)

Bild 6 zeigt die Befestigung und die Übertragung der Maschinenschwingungen auf den Geber durch den Stahldraht. Versuche, die Schwingungen an der Tischplatte des Motors abzunehmen, blieben ohne Erfolg. Soweit das Oktavsieb überhaupt eine Frequenzermittlung für höhere Frequenzen zulässt, so scheinen die auftretenden Schwingungen eine etwas niedrigere Frequenz als bei dem BMW-Zylinder zu haben. Bild 9 zeigt, dass die Störschwingungen etwas schlechter als an obigem Motor zu beseitigen sind.

3.) Hesselman-Einzyylinder-Motor

Bei diesem Motor handelt es sich um einen I.G.-Prüfdiesel, der durch Auswechseln des Zylinderkopfes auf Hesselmanbetrieb umgestellt wurde. Der Geber wurde in der üblichen Weise befestigt und der Stahldraht nach einer Schraube des Zylinderkopfes geführt. Auch hier lassen sich die Klopfeschwingungen gut erkennen. Bild 10 zeigt das Verhalten für 3 Verbrennungen. Die vollständige Ausbiegung von Störfrequenzen war nur bei dem höchsten Frequenzbereich (6400 - 12800 Hz) des Oktavsiebes möglich. Auch hier bestehen die Klopfeschwingungen aus einem Frequenzband, sodass die Empfindlichkeit der Anordnung steigt, wenn man nicht so stark aussieht..

4.) Benz-Vierzylinder-Motor

Der Benz-Motor ist ein wassergekühlter Vierzylinder-Motor älterer Bauart. Die Anordnung des Gebers geht aus Bild 7 hervor. Die Aufnahmen 11 und 12 zeigen die Klopfeschwingungen für die Fälle, dass nur ein Zylinder und dass alle Zylinder klopfen (im übrigen vgl. Bericht Nr.436). Auch hier sind nur die Klopfeschwingungen über 6400 Hz aufgenommen.

Schlussfolgerungen

Es erhebt sich nun die Frage, ob der Beobachtung auf der Braunschens Röhre oder dem Abhören mittels Lautsprecher der Vorzug zu geben ist. Der apparative Aufwand ist, noch einmal kurz zusammengefasst, folgender:

- a) Beim Arbeiten mit der Braun'schen Röhre:
Geber-Siebkreis-Verstärker, Braun'sche Röhre mit Netzanode, Ablenkgertät mit Spannungsquelle oder Kippschwinggerät.

b) Beim Arbeiten mit Lautsprecher:

Geber-Siebkreis-Verstärker-Lautsprecher mit entsprechendem Netzteil. Statt des Lautsprechers kann auch ein Kopfhörer Verwendung finden. Dieser kann wegen der geringen benötigten Leistung direkt an den ersten Verstärker angeschlossen werden. Der Aufwand ist in diesem Falle besonders gering. Wegen der Unannehmlichkeiten, die das Tragen eines Kopfhörers mit sich bringt, dürfte jedoch dieses Verfahren wohl kaum in Frage kommen.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass der apparative Aufwand bei Arbeiten mit einem Lautsprecher geringer ist. Dazu kommt noch der Vorteil, dass man während der Ablesung der Instrumente auch noch die Maschine kontrollieren kann. Das Beobachten eines besonderen Instrumentes oder auch des Schirmes der Braun'schen Röhre fällt weg. Nachteilig ist, dass man bei hohem Störpegel sich stark auf das Lautsprechergeräusch konzentrieren muss. Hier ist gerade die Braun'sche Röhre in Verbindung mit dem Seitenablenkgerät von Vorteil. Beim Klopfen erscheinen hierbei immer an derselben Stelle des Schirmes die interessierenden Schwingungen. Da die Amplitude der Schwingungen ein Mass für die Klopfstärke ist, so lässt sich diese damit besser als mit dem Gehör bestimmen; denn beim Abhören ist ein Vergleich weniger gut möglich.

Danach kann man wohl sagen, dass es am günstigsten ist, wenn man sowohl den Lautsprecher als auch die Braun'sche Röhre gleichzeitig verwendet. Auch die mit den Anordnungen gemachten Erfahrungen sprechen in diesem Sinne.

S c h r i f t t u m

- 1.) O.Wawrzynock: Methode zur Messung der Klopfgeräusche in Verbrennungskraftmaschinen, ATZ 34, 1931, 544, 572, 652.
- 2.) C.F.Taylor, C.S.Draper, E.S.Taylor & G.L.Williams: A New Instrument Devised for Study of Combustion. SAE Journal 34, 1934, 59.
- 3.) K.Generlich: Untersuchungen über das Klopfverhalten von Vergasermotoren und Leichtkraftstoffen auf elektroakustischem Wege. Diss.TH.München 1936.
- 4.) J.Wilke: Prüfmotoren für Klopfwertbestimmung von Kraftstoffen ZdVDI 82, 1938, 1135.
- 5.) R.Lichtenberger u.F.Seeber: Beitrag zur Frage der Klopfmessverfahren ATZ 41, 1938, 372.
- 6.) A.Köchling: Versuche zur Aufklärung des Klopfvorgangs. ZdVDI 82, 1938, 1126.
- 7.) F.Postlethwaite: Measurement of Detonation. Aircr.Eng.10, 1938, 201 und 211. Luftfahrt-Schrifttum des Ausl.4, 1938, 277.
- 8.) J.Ratzke: Ein elektromagnetischer Indikator und Klopfmesser. Jb.d.Deutschen Luftfahrt-Forschung II, 1938, 368.
- 9.) F.Seeber: Prüfung hochklopfester Kraftstoffe in Flugmotoren Einzylinder Luftfahrtforschung 16, 1939, 18.
- 10.) F.Seeber: Neuere Verfahren der Kraftstoffprüfung, Luftfahrtforschung 16, 1939, 431.
- 11.) R.Schütz: Messung der Klopfestigkeit. Deutsche Kraftfahrt-Forschung H. 31, Berlin 1939. ATZ 13, 1939, 364.
- 12.) A.W.Schmidt und K.Generlich: Untersuchung der Klopfgeräusche von Otto-Motoren mit elektroakustischen Messgeräten. Deutsche Kraftf.-Forschung H.33, Berlin 1939.
- 13.) A.W.Schmidt: Untersuchungen über den Klopfvorgang in Mehrzylinder-motoren ZdVDI 1940, 435.
- 14.) S.Kehrer: Klopfmessungen an Otto-Motoren. ATZ V.8234-1.
- 15.) J.Ratzke: Beitrag zur Messung von Klopf-schwingungen an Motoren. ATZ 2, 1940, 4.
- 16.) A.W.Schmidt: Untersuchungen über das Klopfverhalten von Kraftstoffen auf dem Prüfstand und im Fahrbetrieb. Öl und Kohle 36, 1940, 350/62.
- 17.) W.S.Mount: Cathode-Ray Oscillograph in Multicylinder Detonation. Jork SAE-Journal 44, 1939, 135.
- 18.) F.Kneule: Oktanzahl und Kraftstoffbewertung im Fahrbetrieb, ZdVDI 85, 1941, 571

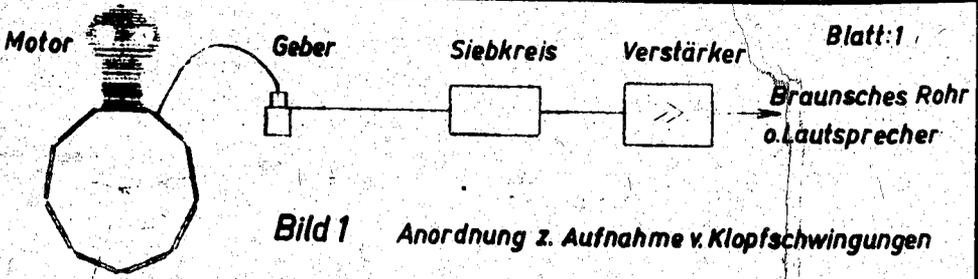


Bild 1 Anordnung z. Aufnahme v. Klopf-schwingungen

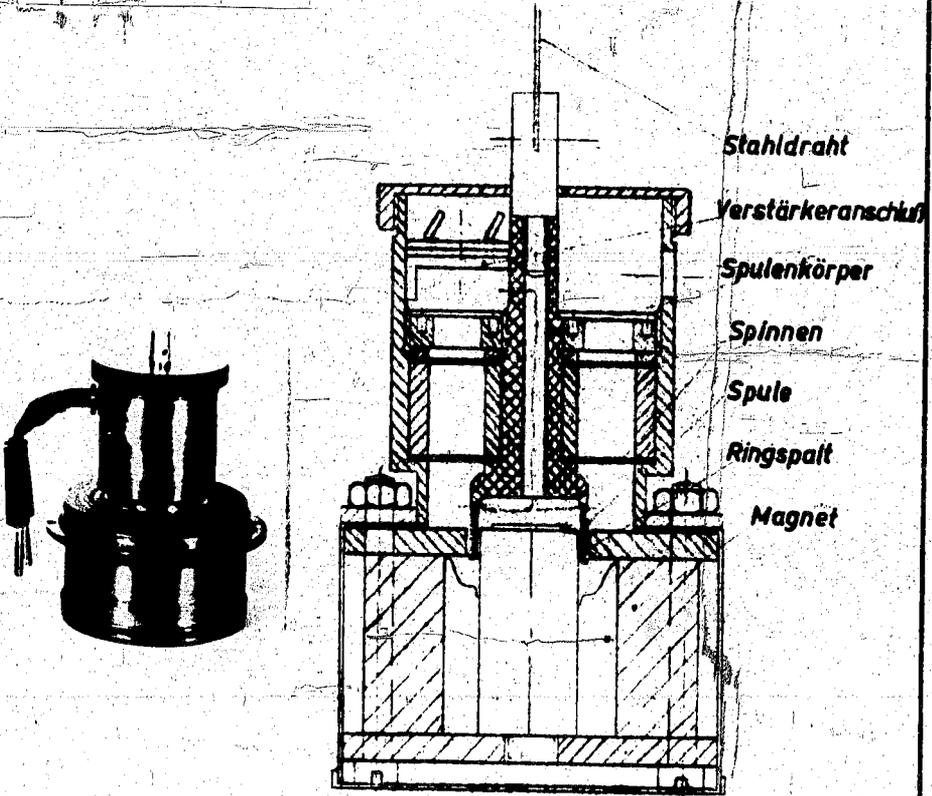


Bild 2a Permanent-dynamischer Geber **Bild 2b**

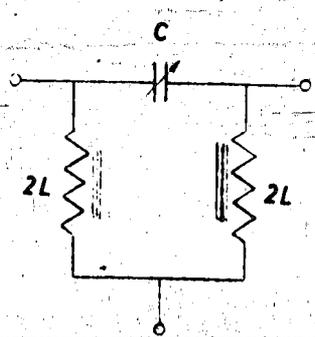


Bild 3

Siebkreis (Kondensatorkette I. Art)
 Grenzfrequenz $f = \frac{1}{4 \pi \sqrt{L \cdot C}}$
 $2L = 0,1 \text{ H}$
 $C = 200 - 2000 \text{ pF}$

8861

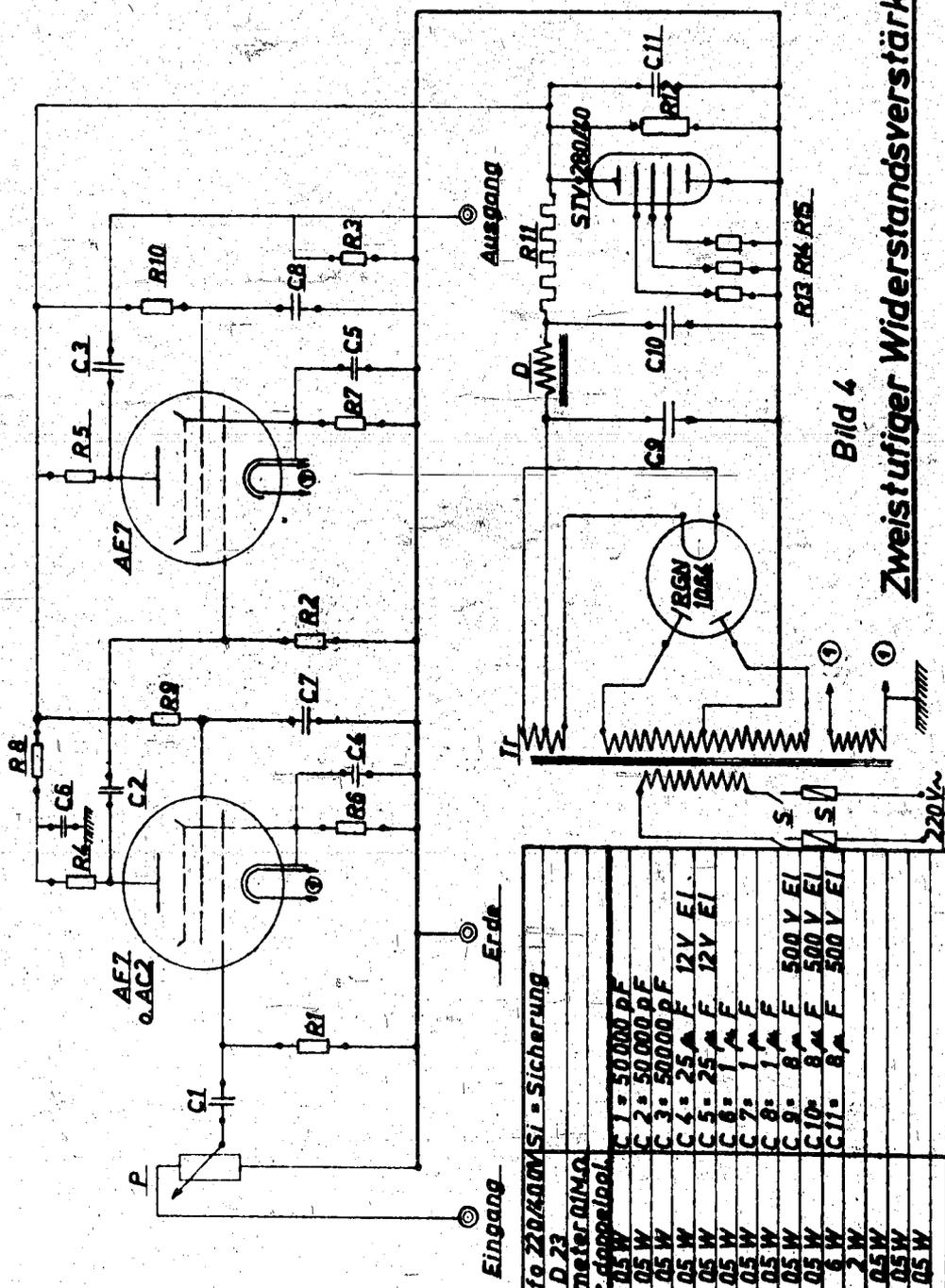


Bild 4
Zweistufiger Widerstandsverstärker

8862

Tr	= Netztrafo 220/400 V	Si	= Sicherung
D	= Drossel D 23		
P	= Potentiometer 0/100 Ω		
S	= Schalter doppelact.		
R1	= 0,1 M Ω	C1	= 50 000 pF
R2	= 0,1 M Ω	C2	= 50 000 pF
R3	= 0,1 M Ω	C3	= 50 000 pF
R4	= 0,1 M Ω	C4	= 25 μF 12 V EI
R5	= 0,1 M Ω	C5	= 25 μF 12 V EI
R6	= 1 K Ω	C6	= 1 μF
R7	= 2 K Ω	C7	= 1 μF
R8	= 80 K Ω	C8	= 1 μF
R9	= 0,2 M Ω	C9	= 8 μF 500 V EI
R10	= 0,2 M Ω	C10	= 8 μF 500 V EI
R11	= 20 K Ω	C11	= 8 μF 500 V EI
R12	= 0,1 M Ω		2 W
R13	= 1 M Ω		0,5 W
R14	= 1 M Ω		0,5 W
R15	= 1 M Ω		0,5 W

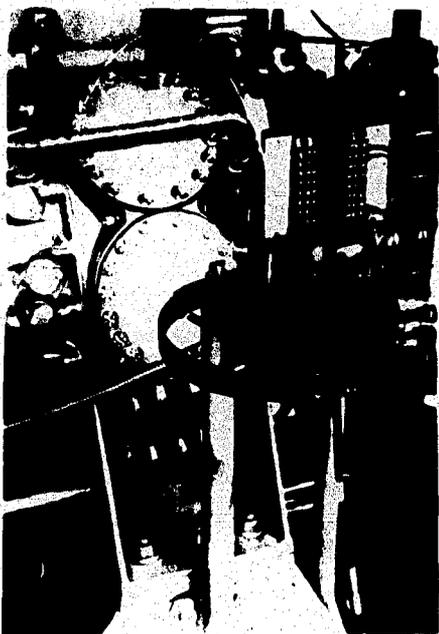


Bild 5



Bild 6



Bild 7

Beispiele für die Anordnung des permanent-
dynamischen Gebers am Motor 8863



Bild 8 Klopfsvingungen am BMW 132-Einzyylinder



Bild 9 Klopfsvingungen am DB 6001-Einzyylinder



Bild 10 Klopfsvingungen am Hesselman-Einzyylinder



Bild 11 Klopfsvingungen am Benz-Vierzyylinder (Zylinder 2 klopft)



Bild 12 Klopfsvingungen am Benz-Vierzyylinder

8864

Aufnahmen der Klopfsvingungen